



8. KONFERENCIJA / 8TH CONFERENCE

ODRŽAVANJE 2024 MAINTENANCE 2024

ZBORNIK RADOVA PROCEEDINGS

UREDNICI / EDITORS:
Ibrahim Plančić
Fuad Hadžikadunić



**Ministarstvo za privredu Zeničko-
dobojskog kantona
(Bosna i Hercegovina)**
Ministry of Economy of Zenica - Doboj
Canton (Bosnia and Herzegovina)



**Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici
(Bosna i Hercegovina)**
Faculty of Mechanical Engineering
- University of Zenica (Bosnia and
Herzegovina)



**Pomorski fakultet Kotor Univerziteta
Crne Gore (Crna Gora)**
Faculty of Maritime Studies Kotor –
University of Montenegro (Montenegro)



**Inženjerski fakultet Harran
Univerziteta Şanlıurfa (Turska)**
Engineering faculty - Harran University,
Şanlıurfa (Türkiye)



**Fakultet tehničkih nauka Univerziteta
u Novom Sadu (Srbija)**
Faculty of Technical Sciences -
University of Novi Sad (Serbia)



**Strojarski fakultet Sveučilišta u
Slavonskom Brodu (Hrvatska)**
Mechanical Engineering Faculty -
University of Slavonki Brod (Croatia)



**8. međunarodna naučno-stručna konferencija sa međunarodnim učešćem
„ODRŽAVANJE 2024“ / 8th research-expert conference with international
participation „MAINTENANCE 2024“**

13 - 14. novembar / November 2024., Zenica, Bosna i Hercegovina

Urednici / Editors:

v. prof. dr. Ibrahim Plančić
prof. dr. Fuad Hadžikadunić

Izdavač / Publisher:

University of Zenica, Fakultetska 3, 72000 Zenica
Tel: +387 32 444-420; Fax: +387 32 444 431; E-mail: rektorat@unze.ba
Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, 72000 Zenica
Tel: +387 32 449-120, 449-143; Fax: +387 32 246-612; E-mail: mf@mf.unze.ba

Za izdavača / For publisher:

Prof. dr. Jusuf Duraković

Tehnička priprema / Technical assistance and DTP:

Amer Neimarlija, dipl. inž., v. as. mr. Emir Đulić, Emir Čaplja

Štampa / Printed by:

Minex Trade Zenica

Za štampariju / For printing shop:

Ibrahim Meškić

Izdanje / Issue:

izdanje 150 primjeraka. / copies

Copyright © 2024

ISSN 1986-583X

8. Konferencija „ODRŽAVANJE 2024“

Zenica, Bosna i Hercegovina, 13 - 14. novembar 2024.

ORGANIZACIONI ODBOR / ORGANIZING COMMITTEE

Dr. Fuad Hadžikadunić, (B&H) - predsjednik / President

Dr. Ibrahim Plančić (B&H)	Dr. Miroslav Miškić (B&H)
Mr. Samir Šibonjić (B&H)	Dr. Sabahudin Jašarević (B&H)
Dr. Tatijana Dlabač (Montenegro)	Dr. Marinko Aleksić (Montenegro)
Dr. Kasim MERMERDAŞ (Türkiye)	Dr. Nusret Imamović (B&H)
Dr. Hüsamettin BULUT (Türkiye)	Đorđe Nedeljkov, Spec. App (Montenegro)
Dr. Boris Dumnić (Serbia)	Mr. Emir Đulić (B&H)
Dr. Goran Šimunović (Croatia)	Mr. Draško Kovač (Montenegro)
Dr. Mustafa Imamović (B&H)	Amer Neimarlija, dipl. inž. - sekretar (B&H)

NAUČNI I RECENZIONI ODBOR

PROGRAM SCIENTIFIC REVIEW COMMITTEE

Dr. Malik Čabaravdić, (B&H) – Predsjednik / President

- > Dr. Jusuf Duraković (B&H)
- > Dr. Fuad Hadžikadunić (B&H)
- > Dr. Ibrahim Plančić (B&H)
- > Dr. Hüsamettin BULUT (Türkiye)
- > Dr. Tatijana Dlabač (Montenegro)
- > Dr. Boris Dumnić (Serbia)
- > Dr. Goran Šimunović (Croatia)
- > Dr. Murat KISA (Türkiye)
- > Dr. Ali KIRCAJ (Türkiye)
- > Dr. Mehmet Azmi AKTACIR (Türkiye)
- > Dr. Špiro Ivošević (Montenegro)
- > Dr. Ilija Čosić (Serbia)
- > Dr. Miroslav Miškić (B&H)
- > Dr. Srđan Kolaković (Serbia)
- > Dr. Venan Hadžiselimović (BiH)
- > Dr. Miroslav Milutinović (B&H)
- > Dr. Tomislav Šarić (Croatia)
- > Dr. Mustafa Imamović (B&H)
- > Dr. Bogdan Marić (B&H)
- > Dr. Jovan Dorić (Serbia)
- > Dr. Slaviša Moljević (B&H)
- > Dr. Marinko Aleksić (Montenegro)
- > Dr. Bojan Lalić (Serbia)
- > Dr. Ninoslav Zuber (Serbia)
- > Dr. Bülent AKTAŞ (Türkiye)
- > Dr. Kadir Turan (Türkiye)
- > Dr. Mehmet Fatih DILEKOĞLU (Türkiye)
- > Dr. Davorka Šaravanja (B&H)
- > Dr. Samir Dizdar (Sweden)
- > Dr. Mirko Karakašić (Croatia)
- > Dr. Maja Čavić (Serbia)
- > Dr. Milan Rackov (Serbia)
- > Dr. Mileta Janjić (Montenegro)
- > Dr. Safet Isić (B&H)
- > Dr. Sead Cvrk (Montenegro)
- > Dr. Ivan Grgurević (Croatia)
- > Dr. Kasim Bajramović (B&H)
- > Dr. Radoslav Tomović (Montenegro)
- > Dr. Boris Stojić (Serbia)
- > Dr. Radomir Đokić (Serbia)
- > Dr. Miodrag Hadžistević (Serbia)
- > Dr. Deda Đelović (Montenegro)
- > Dr. Josip Kačmarčik (B&H)
- > Dr. Edin Begović (B&H)
- > Dr. Danilo Nikolić (Montenegro)
- > Dr. İzzettin Hakan KARAÇIZMELİ (Türkiye)
- > Dr. Dejan Lukić (Serbia)
- > Dr. Lorenc Malka (Albania)
- > Dr. Aleksandar Živković (Serbia)
- > Dr. Marinko Stojkov (Croatia)
- > Dr. Jelena Šaković Jovanović (Montenegro)
- > Dr. Miroslav Vukićević (Montenegro)
- > Dr. Bogdan Marić (B&H)
- > Dr. Ranko Antunović (B&H)
- > Dr. Sabahudin Jašarević (B&H)
- > Dr. Dursun AKASLAN (Türkiye)
- > Dr. Hasan Avdić (B&H)
- > Dr. Amir Halep (B&H)
- > Dr. Čedomir Duboka (Serbia)
- > Dr. Serkan KAYA (Türkiye)
- > Dr. Nasuf Hadžiahmetović (B&H)
- > Dr. Tome Jolevski (Macedonia)
- > Dr. Ljubodrag Tanović (Serbia)
- > Dr. Mihail Aurel Titu (Romania)
- > Dr. Fuad Klisura (B&H)
- > Dr. Gencay SARIİŞİK (Türkiye)
- > Dr. Mustafa Hadžalić (B&H)
- > Dr. Atif Hodžić (B&H)
- > Dr. Sanel Gredelj (B&H)
- > Dr. Džafer Dautbegović (B&H)
- > Dr. Nedeljko Vukojević (B&H)
- > Dr. Nusret Imamović (B&H)
- > Dr. Emir Nezirić (B&H)
- > Dr. Mladen Perinić (Croatia)
- > Dr. Stevan Kordić (Montenegro)
- > Dr. Alma Žiga (B&H)
- > Mr. Draško Kovač (Montenegro)

8. Konferencija „ODRŽAVANJE 2024“

Zenica, Bosna i Hercegovina, 13 - 14. novembar 2024.



Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici (Bosna i Hercegovina)

Faculty of Mechanical Engineering - University of Zenica
(Bosnia and Herzegovina)

U saradnji sa: / In cooperation with:



Ministarstvo za privredu Zeničko-dobojskog kantona (Bosna i Hercegovina)

Ministry of Economy of Zenica - Doboj Canton
(Bosnia and Herzegovina)



Pomorski fakultet Kotor Univerziteta Crne Gore (Crna Gora)

Faculty of Maritime Studies Kotor – University of Montenegro
(Montenegro)



Inženjerski fakultet Harran Univerziteta Şanlıurfa (Turska)

Engineering faculty - Harran University, Şanlıurfa
(Türkiye)



Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu (Srbija)

Faculty of Technical Sciences - University of Novi Sad
(Serbia)



Strojarski fakultet Sveučilišta u Slavenskom Brodu (Hrvatska)

Mechanical Engineering Faculty - University of Slavenski Brod
(Croatia)

8. Konferencija „ODRŽAVANJE 2024“

Zenica, Bosna i Hercegovina, 13 - 14. novembar 2024.

Poštovana/i,

pred Vama je Zbornik radova 8. naučno-stručne konferencije sa međunarodnim učešćem 'ODRŽAVANJE/MAINTENANCE 2024', koja se ove godine održava u Zenici 13. i 14. novembra 2024. godine.

Želimo vjerovati da ćete u njemu pronaći mnogo toga interesantnog za sebe, svoju organizaciju, kolege, studente ili prijatelje.

Ove 2024. godine, kada Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici obilježava 47. godina postojanja i rada, također imamo čast da u organizaciji 8. konferencije 'ODRŽAVANJE / MAINTENANCE 2024' učestvuju renomirane javne i akademske institucije: Ministarstvo za privredu Zeničko-dobojskog kantona (Bosna i Hercegovina), Pomorski fakultet Kotor Univerziteta Crne Gore (Crna Gora), Inženjerski fakultet Harran Univerziteta Şanlıurfa (Turska), Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu (Srbija), Strojarski fakultet Sveučilišta u Slavanskom Brodu (Hrvatska).

Ljubazno se zahvaljujemo Ministru Ministarstva za privredu Zeničko-dobojskog kantona, Dekanici, Dekanima i Menadžmentima Univerzitetâ na ukupnom doprinosu, članovima Organizacionog, Naučnog i Recenzionog odbora Konferencije, te značajnom broju naših partnera, respektabilnih i cijenjenih Kompanija koje su kroz nekoliko oblika učešća dale svoj značajan doprinos. Sa posebnim respektom se zahvaljujemo svim autorima i koautorima kvalitetnih radova, koji kroz ovaj način publiciranja znanja i iskustava daju suštinu samoga Zbornika.

Upravo kroz učešće javnih institucija, predstavnika akademske zajednice i privrednog sektora Evropskog regiona želimo jačati međusobnu saradnju, te dati značajan doprinos u razmjeni znanja, iskustava i informacija iz domena najsavremenijih metoda i tehnologija iz oblasti održavanja različitih složenih sistema i procesa.

Za ovogodišnju 8. naučno-stručnu konferenciju sa međunarodnim učešćem 'ODRŽAVANJE 2024' prijavljeno je 55 radova, a prihvaćeno 49 recenzirana i lektorisana rada. Zbornik je strukturiran kroz poglavlja uvodnih radova konferencije, radove raspoređene u 5 sekcija i 22 tematske oblasti, te odjeljak za prezentacije Kompanijâ.

Sama realizacija Konferencije, pored ostalog, je planirana putem 'face-to-face' i 'on-line' prezentacije uvodnih referata, recenziranih radova po sekcijama, te očekujemo da će se kroz kvalitetne diskusije, pitanja i odgovore dati značajan doprinos u razmjeni savremenih informacija, metodologija i tehnologija iz oblasti održavanja kompleksnih sistema, sa posebnim osvrtom na praktična iskustva iz industrijskog okruženja.

U sklopu konferencije je planirano održavanje 'panela' na temu 'Održavanje i Industry 4.0 – digitalne tehnologije i razvoj kurikuluma u cilju realizacije jače saradnje s privredom', kojim ćemo pokušati osvijetliti potrebu i neophodnost korištenja savremenih trendova u privredi i u domenu održavanja u skladu sa razvojem digitalnih tehnologija, ali i modernizaciju akademskih kurikuluma, kako bi se izlazna znanja, vještine i kompetencije inženjera mašinstva, posebno iz oblasti održavanja potpuno uskladile sa savremenim potrebama industrije.

Nadamo se da će ukupne aktivnosti i sadržaji ispuniti očekivanja učesnika Konferencije.

8. Konferencija „ODRŽAVANJE 2024“

Zenica, Bosna i Hercegovina, 13 - 14. novembar 2024.

Još jednom se iskreno zahvaljujemo svim gore pomenutim učesnicima i institucijama, te svim ostalim zaslužnim, na izuzetno značajnom doprinosu u realizaciji Konferencije i Zbornika.

Uz želju za dobro zdravlje svih i dalje zajedničke uspjehe, želimo da se 8. naučno-stručna konferencija sa međunarodnim učešćem 'ODRŽAVANJE 2024' uspješno realizuje kroz zajedničko zalaganje svih nas, a nadamo se i vjerujemo da će na ovim principima slijedeća 2026. godine biti još uspješnija.

S poštovanjem,

v. prof. dr. Ibrahim Plančić – dekan Mašinskog fakulteta Univerziteta u Zenici i član Organizacionog odbora

prof. dr. Fuad Hadžikadunić - predsjednik Organizacionog odbora

prof. dr. Malik Čabaravdić - predsjednik Naučnog odbora

v. asist. mr. Emir Đulić, as. Amer Neimarlija - sekretari Organizacionog odbora

Zenica, novembar 2024. godine.

8th Conference „MAINTENANCE 2024“

Zenica, Bosnia and Herzegovina, 13 - 14 november 2024

Dear Sir / Ms,

before you is the Proceedings of the 8th research-expert conference with international participation 'MAINTENANCE 2024', which this year is being held in Zenica on November 13 and 14, 2024.

We want to believe that you will find a lot of interesting things in it for yourself, your organization, colleagues, students or friends.

This year 2024, when the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Zenica celebrates its 47th year of existence and work, we also have the honor of having respected public and academic institutions participate in the organization of the 8th conference 'MAINTENANCE 2024': Ministry of Economy of Zenica-Doboj Canton (Bosnia and Herzegovina), Faculty of Maritime Studies Kotor of University of Montenegro (Montenegro), Faculty of Engineering of Harran University Şanlıurfa (Türkiye), Faculty of Technical Sciences of University of Novi Sad (Serbia), Mechanical Engineering Faculty of University of Slavonski Brod (Croatia).

We would like to thank the Minister of the Ministry of Economy of the Zenica-Doboj Canton, the Dean, Deans and Management of the Universities for their overall contribution, the members of the Organizational, Scientific and Review Committee of the Conference, and a significant number of our partners, respectable and valued companies that have given their significant contribution through several forms of participation contribution. With special respect, we would like to thank all the authors and co-authors of quality papers, who, through this way of publishing knowledge and experiences, provide the essence of the Conference Proceeding itself.

Precisely through the participation of public institutions, representatives of the academic community and the economic sector of the European region, we want to strengthen mutual cooperation and make a significant contribution to the exchange of knowledge, experience and information from the domain of the most modern methods and technologies in the field of maintenance of various complex systems and processes.

For this year's 8th research-expert conference with international participation 'MAINTENANCE 2024', 55 papers were submitted, and 49 peer-reviewed and proofread papers were accepted. The collection is structured through chapters of keynote papers of the conference, papers distributed in 5 sections and 22 thematic areas, and a section for Company presentations.

The realization of the Conference itself, among other things, is planned through 'face-to-face' and 'on-line' presentation of keynote papers, peer-reviewed papers by section, and we expect that through quality discussions, questions and answers, a significant contribution will be made to the exchange of contemporary information, methodology and technology in the field of maintenance of complex systems, with special reference to practical experiences from the industrial environment.

As part of the conference, it is planned to hold a 'panel' on the topic 'Maintenance and Industry 4.0 - digital technologies and curriculum development in order to realize stronger cooperation with the economy', which will try to appoint to the need and necessity of using modern trends in the economy and in the field of maintenance in accordance with the development digital technologies, but also the modernization of

8th Conference „MAINTENANCE 2024“

Zenica, Bosnia and Herzegovina, 13 - 14 november 2024

academic curricula, so that the output knowledge, skills and competences of mechanical engineers, especially in the field of maintenance, are fully aligned with the modern needs of the industry.

We hope that the overall activities and contents will meet the expectations of the Conference participants.

Once again, we sincerely thank all the participants and institutions mentioned above, as well as all other deserving ones, for their extremely significant contribution to the realization of the Conference and Proceeding.

With the wish for everyone's good health and continued joint success, we want the 8th scientific-professional conference with international participation 'MAINTENANCE 2024' to be successfully realized through the joint efforts of all of us, and we hope and believe that the following year 2026 will be based on these principles even more successful.

Sincerely,

assoc. prof. dr. sc. Ibrahim Plančić - dean of the Faculty of Mechanical Engineering, University of Zenica and member of the Organizing Committee

prof. dr. sc. Fuad Hadžikadunić - president of the Organizing Committee

prof. dr. sc. Malik Čabaravdić - president of the Scientific Committee

h. as. mr. sc. Emir Đulić, as. Amer Neimarlija - secretaries of the Organizing Committee

Zenica, November 2024.

8. Konferencija „ODRŽAVANJE 2024“
Zenica, Bosna i Hercegovina, 13 - 14. novembar 2024.

SADRŽAJ / CONTENTS

UVODNI RADOVI / KEYNOTE PAPERS

1. ISTRAŽIVANJE UZROKA LOMA NOSAČA TOPIONE KOMORE UZ DIMENZIONISANJE I KONSTRUISANJE NOVIH NOSAČA
RESEARCH INTO THE CAUSES OF MELTING CHAMBER BEAMS BREAKAGE WITH DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF NEW BEAMS
Miškić Miroslav; Benović Aco; Gačić Almedin; Sremčev Nemanja; (Serbia, Bosnia and Herzegovina)..... 1
2. PRIMJENA FEM ANALIZE U PROJEKTOVANJU MAŠINSKIH KONSTRUKCIJA
APPLICATION OF FEM ANALYSIS IN DESIGN OF MECHANICAL STRUCTURES
Dizdar Samir; Tomović Radoslav; Isić Safet; (Sweden, Montenegro, Bosnia and Herzegovina)..... 11
3. DEFINISANJE INTEGRALNE LOGISTIČKE PODRŠKE PRI NABAVCI RATNIH BRODOVA
INTEGRAL LOGISTICS SUPPORT DESIGN DURING THE PROCUREMENT OF WARSHIPS
Aleksić Marinko; Cvrk Sead (Montenegro)..... 21
4. THE IMPORTANCE OF MAINTENANCE OPERATIONS IN NATURAL GAS DISTRIBUTION SYSTEMS AND ANALYSIS OF MAINTENANCE PROGRAM FOR ŞANLIURFA PROVINCE
Bulut Husamettin; Ural Muhamed Nezh (Türkiye) 31

SEKCIJA 1 / SESSIONS 1

5. RELIABILITY AND MAINTENANCE OF HISTORICAL BUILDINGS AND RESTORATION PROCESSES
Dusak Said (Türkiye)..... 43
6. DIGITALNA REVOLUCIJA U CESTOVNOM PRIJEVOZU: IMPLEMENTACIJA PAMETNIH TAHOGRAFA DRUGE GENERACIJE U BOSNI I HERCEGOVINI
DIGITAL REVOLUTION IN ROAD TRANSPORT: IMPLEMENTATION OF THE SECOND-GENERATION SMART TACHOGRAPHS IN BOSNIA AND HERZEGOVINA
Šehović Jasmin; Krilić Vedran (Bosnia and Herzegovina)..... 53
7. NOVA UREDBA O MAŠINAMA (EU) 2023/1230
THE NEW MACHINERY REGULATION (EU) 2023/1230
Lazović Tatjana; Atanasovska Ivana (Serbia) 63
8. KARAKTERISTIKE WEIBULLOVE DISTRIBUCIJE I PRIMJENA U POUZDANOSTI I ODRŽAVANJU KONSTRUKCIJA
CHARACTERISTICS AND APPLICATION OF THE WEIBULL DISTRIBUTION IN STRUCTURAL RELIABILITY AND MAINTENANCE
Gredelj Sanel; Kulenović Fatka; Hodžić Atif (Bosnia and Herzegovina)..... 71
9. PRIMJENA TERMOVIZIJSKE TEHNIKE U UTVRĐIVANJU LOŠIH MEHANIČKIH SPOJEVA U STRUJNIM KRUGOVIMA
APPLICATION OF THERMAL VISION TECHNIQUE IN DETERMINING BAD MECHANICAL CONNECTIONS IN CIRCUITS
Damičević Vjenceslav; Kovačević Domagoj; Stojkov Marinko; Živić Marija; Barac Antun; Đuranović Matej; Holik Mario (Croatia)..... 79

10. ULOGA IGLIČASTIH VENTILA U ODRŽAVANJU OPTIMALNIH TLAKOVA I PREVENTIVNOM ODRŽAVANJU VODOOPSKRBNIH SUSTAVA
THE ROLE OF NEEDLE VALVES IN MAINTAINING OPTIMAL PRESSURES AND PREVENTIVE MAINTENANCE OF WATER SUPPLY SYSTEMS
Ognjenčić Krešimir; Šimunović Goran (Croatia) 89
11. MODELSKO ISPITIVANJE ROTORNOG BAGERA SRS 1200/630
MODEL TEST OF ROTOR EXCAVATOR SRS 1200/630
Rošić Husejin, Kulenović Fatka (Bosnia and Herzegovina) 95
12. DIJAGNOSTIKA JENBACHER MOTORA JMS 416 NA BIOPLINSKOM POSTROJENJU
DIAGNOSIS OF JENBACHER ENGINE JMS 416 AT THE BIOGAS PLANT
Zolić Danijel; Šarić Tomislav; Stojkov Marinko; Lujčić Roberto (Croatia) 105
13. UTICAJ MJERENJA KLJUČNIH PARAMETARA RADA GLAVNOG BRODSKOG DIZEL MOTORA NA PRODUŽENJE PERIODIKE REMONTA
Cvrk Sead; Aleksić Marinko; Kovač Draško; Nedeljko Đorđe; (Montenegro) 117
14. ODREĐIVANJE RADIJACIONIH DOZA U RADNOM PROSTORU LABORATORIJE FIZIKE UNIVERZITETA U TUZLI U SVRHU ISPITIVANJA POTREBE ZA RADIOLOŠKOM ZAŠTITOM
DETERMINATION OF RADIATION DOSES IN THE WORK AREA OF THE PHYSICS LABORATORY OF THE UNIVERSITY OF TUZLA FOR THE PURPOSE OF ASSESSING THE NEED FOR RADIOLOGICAL PROTECTION
Softić Amela (Bosnia and Herzegovina) 127

SEKCIJA 2 / SESSIONS 2

15. ULOGA I ZNAČAJ FABRIČKE SLUŽBE ODRŽAVANJA NA PRIMJERU IZRADA KORITA PUŽNOG TRANSPORTERA
THE ROLE AND SIGNIFICANCE OF THE FACTORY MAINTENANCE SERVICE ON THE EXAMPLE OF MANUFACTURING A SCREW CONVEYOR TROUGH
Plančić Ibrahim; Mehmedović Aldina (Bosnia and Herzegovina) 135
16. METODE ANALIZE OTKAZA I UTVRĐIVANJA POUZDANOSTI ELEMENATA VALJAONIČKOG POSTROJENJA-VALJAČKIH STANOVA
METHODS OF FAILURE ANALYSIS AND DETERMINATION OF THE REALIBILITY OF THE ELEMENTS OF THE ROLLING MILLS
Panjević Adnan; Imamović Mustafa; Jašarević Sabahudin (Bosnia and Herzegovina) 145
17. MAINTENANCE AND SUSTAINABILITY IN THE MEDICAL FIELD: THE IMPORTANCE OF BIOCOMPATIBILITY TESTS
Gumushan Aktas Hatice (Türkiye) 153
18. PROCJENA STANJA STRUKTURNIH PLOČA BRODOVA ZA PREVOZ RASUTOG TERETA U FUKCIJI ODREĐIVANJA STRATEGIJE ODRŽAVANJA
ASSESSMENT OF THE CONDITION OF THE STRUCTURAL PANELS OF BULK CURRIERS IN THE FUNCTION OF DETERMINING THE MAINTENANCE STRATEGY
Krivokapić Ivan; Ivošević Špiro (Montenegro) 163
19. INVENTORY MAINTENANCE TO OPENFOAM TUTORIAL FOR SUBSONIC ROCKET WITH TUNED STABILITY VALUES
Ozkan Ahmet Furkan; Isiker Yusuf; Firatoglu Zeynel Abidin (Türkiye) 173
20. SIGURNOST I ODRŽAVANJE INDUSTRIJSKIH ROBOTA U PROCESU INKREMENTALNOG OBLIKOVANJA LIMOVA
SAFETY AND MAINTENANCE OF INDUSTRIAL ROBOTS IN THE PROCESS OF INCREMENTAL SHEET FORMING
Plančić Ibrahim; Čabaravdić Malik (Bosnia and Herzegovina) 183

21. ORGANIZACIJA SLUŽBE ODRŽAVANJA I REMONTNIH AKTIVNOSTI U RUDNICIMA
ORGANIZATION OF MAINTENANCE AND REPAIR ACTIVITIES IN MINES
Dulić Emir; Neimarlija Amer; Hazić Faris (Bosnia and Herzegovina)..... 191
22. ODREĐIVANJE POUZDANOSTI NA MAŠINI REZNI CENTAR PERTICI SCARABEO SC 65
DETERMINING THE RELIABILITY OF THE MACHINECUTTING CENTRE PERTICI
SCARABEO SC 65
Hazić Faris; Jašarević Sabahudin (Bosnia and Herzegovina)..... 201

SEKCIJA 3 / SESSIONS 3

23. THE EFFECT OF SOILING ON ENERGY PERFORMANCE IN PHOTOVOLTAIC POWER
PLANTS: A CASE STUDY FOR THE CLEANING PROCESS OF HARRAN UNIVERSITY
SOLAR POWER PLANT
Aktacir Mehmet Azmi; Ilkhan Mehmet Akif (Türkiye) 211
24. MAINTENANCE AND OPTIMIZATION OF BIOGAS PRODUCTION: ENSURING MATERIAL
QUALITY
Trišović Zaga (Serbia)..... 221
25. UTICAJ PRIMJENE HIBRIDNOG SISTEMA SA TOPLOTNOM PUMPOM U SISTEM
DALJINSKOG GRIJANJA U VOGOŠĆI
IMPACT OF THE APPLICATION OF A HYBRID SYSTEM WITH A HEAT PUMP IN THE
DISTRICT HEATING SYSTEM OF VOGOSCA
Nusret Imamović, Azrudin Husika, Bećirbašić Azra (Bosnia and Herzegovina) 231
26. ANALIZA AMBIJENTALNIH KONCENTRACIJA BENZENA U ZRAKU ZENIČKE KOTLINE
ANALYSIS OF AMBIENT BENZENE AND TOLUENE CONCENTRATIONS IN THE AIR OF
ZENICA VALLEY
**Birdahić Vehid, Prcanović Halim, Duraković Mirnes, Beganović Sanela (Bosnia and
Herzegovina)..... 239**
27. THE IMPACT OF CBAM ON THE ENERGY SECTOR AND INDUSTRIAL
DECARBONIZATION
Pašić Emina; Imamović Nusret (Bosnia and Herzegovina)..... 247
28. INVESTIGATION ON CONVERSION OF LIGNOCELLULOSIC WASTE INTO BIO-OIL
GÖNCÜ Betül (Türkiye)..... 257
29. COMOROS RENEWABLE ENERGY POTENTIAL
Ahamada Mmadi Faisal; Aslan Mustafa; Aktacir Mehmed Azmi (Türkiye) 263
30. ZAGAĐENOST ZRAKA, KLIMATSKE PROMJENE I AKTIVNOSTI ZA POBOLJŠANJE
STANJA
AIR POLLUTION, CLIMATE CHANGES AND ACTIVITIES TO IMPROVE THE CONDITION
Sućeska Suad (Bosnia and Herzegovina)..... 269

SEKCIJA 4 / SESSIONS 4

31. SIMULACIJA I ODRŽAVANJE UPRAVLJANJA PROCESOM PROIZVODNJE AMBALAŽE
UZ KORIŠTENJE SENZORA BLIZINE
SIMULATION AND MAINTENANCE OF PACKAGING PRODUCTION PROCESS
MANAGEMENT USING PROXIMITY SENSORS
**Badnjar Džemila; Čabaravdić Malik; Tomašević Dženana; Osmanović Almir
(Bosnia and Herzegovina) 279**

32. QUALITY CONTROL SYSTEM OF THE WELDING PROCESS ON BOGIE MANUFACTURING LINE IN THE COMPANY ĐĐ SPECIAL VEHICLES <i>Herceg Arijan; Maglić Leon (Croatia)</i>	287
33. METODOLOGIJA OSPOSOBLJAVANJA ZA SIGURAN RAD TRAINING METHODOLOGY FOR SAFE WORK <i>Imamović Mustafa (Bosnia and Herzegovina)</i>	297
34. UPRAVLJANJE ODRŽAVANJEM VREĆASTOG FILTERSKOG POSTROJENJA U KOMPANIJI ZA PROIZVODNJU ČELIKA MANAGEMENT OF THE MAINTENANCE OF THE BAG FILTER PLANT IN THE STEEL FACTORY <i>Jašarević Sabahudin; Muračević Dženana (Bosnia and Herzegovina)</i>	303
35. ISPITIVANJE PAROVODA U SKLADU SA STANDARDOM EN 13480-5 STEAM PIPING SYSTEM TESTING ACCORDING TO EN 13480-5 STANDARD <i>Špago Damir; Džihović Edin; Nežirić Emir; Šunje Edin (Bosnia and Herzegovina)</i>	313
36. KOMPENZACIJA DIMENZIONALNIH Odstupanja CILINDRIČNIH MJERA KOD 3D PRINTANJA ONYX MATERIJALA <i>Kačmarčik Josip; Neimarlija Amer; Konjatić Pejo (Bosnia and Herzegovina, Croatia)</i>	319
37. STATISTICAL METHODS IN MAINTENANCE PLANNING <i>Karacizme Izzettin Hakan (Türkiye)</i>	329
38. HOME APPLIANCE REPAIR SERVICE SCHEDULING: A SAMPLE APPLICATION <i>Karacizme Izzettin Hakan (Türkiye)</i>	333
39. A HYBRID SOLUTION APPROACH FOR THE MAINTENANCE STRATEGY SELECTION PROBLEM <i>Kaya Serkan (Türkiye)</i>	339
40. SUPPLIER SELECTION WITH MULTI CRITERIA DECISION MAKING METHODS IN AUTOMOTIVE MAINTENANCE SERVICES <i>Kaya Serkan (Türkiye)</i>	347

SEKCIJA 5 / SESSIONS 5

41. ODRŽAVANJE ŽELJEZNIČKIH LOKOMOTIVA U KOMPANIJI ARCELORMITTAL ZENICA MAINTENANCE OF RAILWAY LOCOMOTIVES IN ARCELORMITTAL ZENICA COMPANY <i>Jašarević Sabahudin; Karić Edin; Zulić Neldina (Bosnia and Herzegovina)</i>	355
42. KONCEPCIJA PREVOZA LJUDI TRAKASTIM TRANSPORTEROM CONCEPT OF TRANSPORTING PEOPLE BY BELT CONVEYOR <i>Bajramović Kasim; Bajramović Irfan (Bosnia and Herzegovina)</i>	365
43. UPRAVLJANJE RIZICIMA U ORGANIZACIJI IT SEKTORA RISK MANAGEMENT IN THE ORGANIZATION OF THE IT SECTOR <i>Hadžiselimović Venan; Alić Edin (Bosnia and Herzegovina)</i>	373
44. MJERE ZAŠTITE I UPRAVLJANJE RIZICIMA PRILIKOM PREVOZA RADNIKA TRAKASTIM TRANSPORTERIMA U JAMI PROTECTION MEASURES AND RISK MANAGEMENT RELATING TO THE TRANSPORTATION OF WORKERS BY BELT TRANSPORTERS IN THE PIT <i>Bajramović Kasim; Bajramović Irfan (Bosnia and Herzegovina)</i>	385

45.	MODEL OBRAZOVANJA INŽENJERA ODRŽAVANJA I MOGUĆNOST UNAPRIJEĐENJA MODELA NA PREMISAMA INDUSTRIJE 4.0 THE MODEL OF EDUCATION OF MAINTENANCE ENGINEERS AND THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE MODEL ON THE PREMISES OF INDUSTRY 4.0 Dulić Emir; Neimarlija Amer (Bosnia and Herzegovina)	393
46.	APPLICATIONS OF DIGITAL TWINS IN PREDICTIVE MAINTENANCE OF MECHANICAL SYSTEMS Mešeljević Lamija; Hadžikadunić Fuad (Bosnia and Herzegovina)	405
47.	STEM TOYS: A REVIEW OF APPLICATIONS IN ENGINEERING EDUCATION Žiga Alma (Bosnia and Herzegovina)	415
48.	PROTOTIP VR HEADSET-A I MOGUĆNOST PRIMJENE U ODRŽAVANJU VR HEADSET PROTOTYPE AND APPLICATION IN MAINTENANCE Karić Amel; Tiro Dragi (Bosnia and Herzegovina)	421
49.	ZNAČAJ ODRŽAVANJA I RAZVOJA INFRASTRUKTURNIH KAPACITETA U FUNKCIJI OSIGURAVANJA KVALITETA VISOKOG OBRAZOVANJA NA UNIVERZITETU U ZENICI THE IMPORTANCE OF MAINTENANCE AND DEVELOPMENT OF INFRASTRUCTURE CAPACITIES IN THE CONTEXT OF STRENGTHENING THE EXCELLENCE OF HIGHER EDUCATION AT THE UNIVERSITY OF ZENICA Dino Eminović; Ibrahim Plančić; Nusret Imamović (Bosnia and Herzegovina)	429

8. Konferencija „ODRŽAVANJE 2024“
Zenica, Bosna i Hercegovina, 13 - 14. novembar 2024.

UVODNI REFERATI

KEYNOTE PAPERS

ISTRAŽIVANJE UZROKA LOMA NOSAČA TOPIONE KOMORE UZ DIMENZIONISANJE I KONSTRUISANJE NOVIH NOSAČA

RESEARCH INTO THE CAUSES OF MELTING CHAMBER BEAMS BREAKAGE WITH DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF NEW BEAMS

Prof. dr. Miroslav Miškić
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad

Aco Benović, dipl. inž. maš.
Termoelektrno d.o.o.
Brčko

Almedin Gačić, dipl. inž. maš.
Termoelektrno d.o.o.
Brčko

Prof. dr. Nemanja Sremčev
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad

REZIME

Održavanje podrazumijeva kontinuirano i periodično praćenje rada i radnih parametara sistema i njegovih podsistema. Sva postrojenja, u ovom slučaju termoelektre, imaju svoj vijek eksploatacije u projektovanim uslovima, a dugotrajna eksploatacija postrojenja u promjenljivim uslovima (zagrijavanje, hlađenje) i pod mehaničkim opterećenjima dovode do određenih oštećenja, te je potrebno pratiti rad i sisteme postrojenja kako bi se utvrdilo stvarno stanje i životni vijek dijelova i opreme, tj. kako bi se izradio stručni elaborat. Na osnovu stručnog elaborata rukovodstvo termoelektre donosi plan preventivnog održavanja i zamjene, eventualno rekonstrukcije dijelova i opreme u cilju stabilnosti isporuke električne energije. U ovom radu dat je primjer preventivnog održavanja, gdje je, kao dio revitalizacije postrojenja za proizvodnju električne energije, urađeno dimenzionisanje i konstruisanje novih nosača topione komore, jer se stručno osoblje termoelektre, niz godina, susretalo s problematikom loma postojećih nosača, prilikom toplotnih dilatacija cijevnog sistema postrojenja.

Ključne riječi: Istraživanje, konstruisanje, preventivno održavanje, proizvodni proces, termoelektrana, topiona komora.

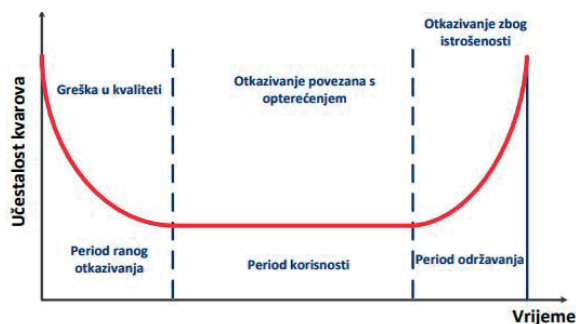
ABSTRACT

Maintenance implies continuous and periodic operation monitoring and monitoring of the system operating parameters and its subsystems. All plants, in this case thermal power plants, have their exploitation lifetime in the designed conditions, and long-term exploitation of the plant, in variable conditions (heating, cooling) and under mechanical loads, lead to certain damages, and it is necessary to monitor the operation and systems of the plant in order to determine the actual condition and lifetime of parts and equipment, i.e. in order to create a professional report. Based on the professional report, the management of the thermal power plant comes up with a plan for preventive maintenance and replacement, possibly reconstruction of parts and equipment in order to stabilize the electricity supply. In this paper, an example of preventive maintenance is given, where as part of the electricity production plant revitalization, the developing and construction of new beams for the melting chamber was done, because the expert staff of the thermal power plant, for many years, encountered the problem of breakage of the existing beams due to thermal expansion of the plant's pipe system.

Key words: Research, construction, preventive maintenance, production process, thermal power plant, melting chamber

1. UVOD

Definicija održavanja prema EFNMS (European Federation of National Maintenance Societies) glasi „Održavanje je funkcija preduzeća kojoj su povjerena stalna kontrola nad postrojenjima i obavljanje određenih popravaka i revizija, čime se omogućava stalna funkcionalna sposobnost i očuvanje proizvodnih i pomoćnih postrojenja te ostale opreme“ [1].



Slika 1. Učestalost kvarova u funkciji vremena

potrebno zamijeniti. Zadatak održavanja je osigurati kontinuiranu raspoloživost postrojenja i opreme u proizvodnji i pružanju sigurnijih radnih uslova [1].

Održavanje mašina, opreme i složenih tehničkih sistema sa aspekta visine neophodnih ulaganja u toku njihovog vijeka trajanja, direktno je u funkciji načina definisanja i ostvarivanja željene efikasnosti (pouzdanosti, gotovosti i pogodnosti održavanja), kako na nivou njihovog projektovanja tako i u toku same njihove eksploatacije. Dobro izabran koncept održavanja, sa pravilnom organizacijom, programiranjem i ostvarivanjem pojedinih aktivnosti na održavanju u toku eksploatacije, uz dobru obučenost kadrova i obezbijeđenu kontrolu održavanja, utiče i na poboljšanje ekonomskih rezultata date organizacije ili preduzeća [2].

Dijagnostika u održavanju treba utvrditi stanje sistema ili dijela sistema bez njegovog demontiranja, a poželjno je i bez zaustavljanja. Okosnica dijagnostike je mjerenje stanja sistema, odnosno mjerenje odabranog parametra. Provjera stanja može biti kontinuirana ili periodična. Kontinuirana provjera se radi stalno i obavljaju je neki uređaji. Periodična provjera se obavlja u pravilnim vremenskim razmacima, a može je obavljati uređaj ili čovjek. Dijagnostička ispitivanja provode se prvenstveno u cilju otkrivanja i nadzora kvara kao inicijalnog uzročnika. U industriji jedan od najvažnijih zahtjeva je svakako održavanje procesa neprekinutim u što dužem vremenskom periodu. To znači: rad bez zastoja, odnosno sa što manje zastoja i to po mogućnosti planskih zastoja, jer svaki zastoj, a naročito oni neplanski, uzrokuju velike ekonomske gubitke te izazivaju dodatna oštećenja opreme te ugrožavaju sigurnost ljudi. [3].

Pouzdanost složenih sistema, projektovanih tako da uspješno obavljaju funkciju, određuje trajanje vremenskog intervala u kome će sistem funkcionisati bez otkaza. Održavanje tehničkih sistema tokom njegovog životnog ciklusa objedinjuje niz pratećih aktivnosti, počev od ideje i definisanja koncepta, ocjene njegove ekonomičnosti, realizacije, eksploatacije, pa sve do otpisa sistema iz upotrebe. Sam proces održavanja sredstava za rad, kao jednog od bitnijih dijelova ukupnog proizvodnog procesa, ima zadatak sprječavanje i otklanjanje otkaza sistema [2].

Formiranje baze podataka i grupisanje naučno-stručnih metoda za ocjenu pouzdanosti, uz kritičku analizu najčešće primjenjivanih i njihovo prilagođavanje specifičnostima složenog tehničkog sistema, poslužili su za formiranje više modifikovanih metoda, koje kao rezultat imaju vremensku zavisnost pouzdanosti rada i vjerovatnoće ispada odnosno otkaza tehničkog sistema. Pri tome je izvršeno izdvajanje i rangiranje najuticajnijih elemenata u okviru složenog tehničkog sistema po njihovoj važnosti u smislu povišenja nivoa pouzdanosti [4].

Na slici 1. prikazana su tri perioda za koja su uobičajeni nazivi:

- I period – period ranih kvarova
- II period – period „konstantnog“ intenziteta kvara,
- III period – period dotrajlosti opreme.

III period je vremenski period u kome intenzitet kvara brzo raste vremenom.

Na početku tog perioda kvarovi nastaju zbog dotrajlosti elemenata, te ih je

Racionalizacijom proizvodnje još „Taylor“ je shvatio da nije dovoljan samo popravak mašine ili uređaja nakon što je došlo do otkaza, nego da se otkaz predvidi, odnosno da do otkaza mašine i ne dođe. Ovim načinom razmišljanja utemeljen je pravac preventivnog održavanja tehničkih sistema. Razvoj tehničko-tehnoloških sistema uslovio je potrebu za praćenjem stanja tehničkih sistema od nastanka do isluženosti, što predstavlja njegov životni ciklus [5].

Nezaobilazan dio životnog ciklusa predstavlja i revitalizacija, rekonstrukcija i modernizacija tehničkih sistema, odnosno postupak produženja radnog vijeka ovih objekata sa pratećom modernizacijom i rekonstrukcijom, uz dodatno poboljšanje tehničko-tehnološke, ekonomske i ekološke prihvatljivosti. Ovaj postupak po svojoj strukturi je izuzetno kompleksan i često se poredi sa rangom realizacije novog tehničkog objekta. Sam proces planiranja i sprovođenja procesa revitalizacije i same eksploatacije postrojenja u okviru razmatranog sistema, realizuje se sa ciljem dostizanja visokog nivoa pogonske sigurnosti, što podrazumijeva definisanje i otkrivanje mogućih izvora nepouzdanosti [2].

Troškove investicionog održavanja treba razlikovati od troškova ulaganja u adaptaciju, rekonstrukciju, modernizaciju ili druge dogradnje na opremi. Takva ulaganja nisu troškovi održavanja već investicije koje povećavaju vrijednost opreme na kojoj su izvršena. [6].

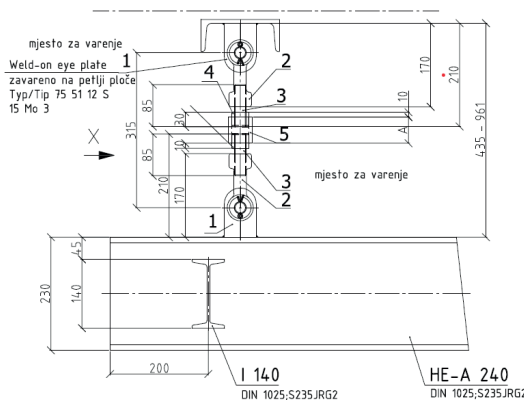
Proces revitalizacije predstavlja produženje radnog vijeka, kojeg uglavnom prati modernizacija i rekonstrukcija i poboljšanje njegove ekološke prihvatljivosti. Ovakav sistemski i sveobuhvatni postupak na tehničkom objektu ili postrojenju, predstavlja nezaobilazan i logičan proces u radnom vijeku objekta. Tako je dijelom revitalizacije postrojenja za proizvodnju električne energije obuhvaćena konstrukcija i zamjena nosača topione komore [2].

2. DEFINISANJE POSTOJEĆEG SISTEMA

2.1. Osnovni podaci o postrojenju i postojećim nosačima

Pod pojmom tehnički sistem podrazumijeva se skup elemenata i relacije između njih i njihovih karakteristika, povezanih u cilju ostvarivanja funkcije cilja, odnosno promjene stanja sistema. Najupštenije posmatrano, svaki sistem, pa i tehnički vrši transformaciju materijala, energije i informacija. Tehnički sistem je vještački sistem koji nastaje posrednim ili neposrednim djelovanjem čovjeka. Svaki tehnički sistem je sastavljen od podsistema odnosno elementarnih ili osnovnih sistema [1].

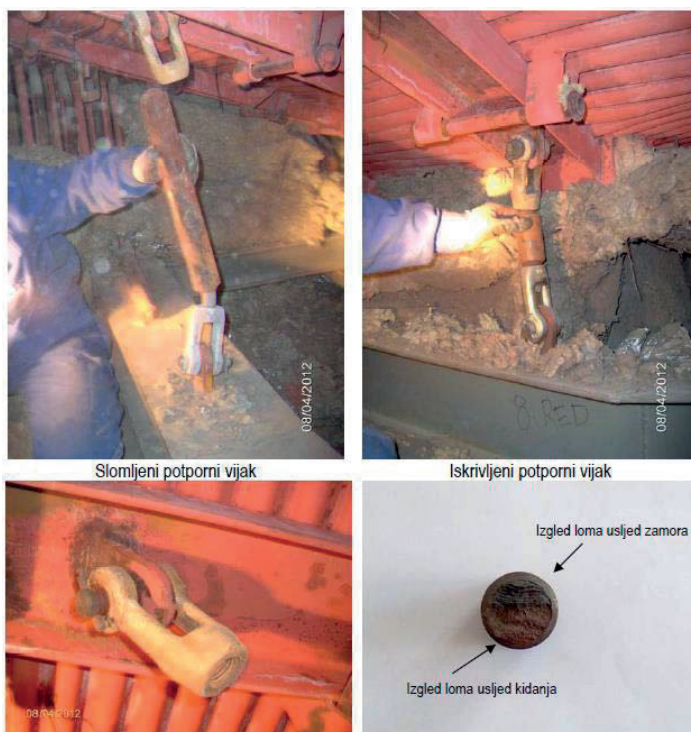
Tehnički sistem, odnosno kondenzacioni blok snage 230 MW, koji je predmet analize u ovom radu ima strmočijevni kotao, sa prinudnom cirkulacijom vode u isparivaču, odvođenjem šljake u tečnom stanju i trostrukom promajom. Podsystem, odnosno postojeći nosači se nalaze na dnu prve promaje, u tavancu, između U-profila dna topione komore koji su veza sa cijevnim sistemom kotla i HEA240 profila koji su vezani za potporne stubove.



Slika 2. Postojeći nosači [7]

2.2. Opis problema

Nakon revitalizacije kotla 2005. godine i izmjena na dijelu konstrukcije, odnosno sistemu bandažiranja kotla u zoni dna topione komore (ložišta kotla) blok je pušten u rad. Nakon određenog perioda eksploatacije, uočena su oštećenja na nosačima topione komore. Nosači su pretrpili trajne plastične deformacije, a veliki broj nosača je slomljen. Zbog velikog broja oštećenih nosača dna ložišta došlo je do deformisanja dna ložišta kotla, zbog čega je 2015. godine zamijenjeno kompletno dno ložišta, te su napravljene određene preinake nošenja dna ložišta. Nakon zamjene kompletnog dna, u narednom periodu eksploatacije, pa sve do danas, se pratilo stanje saniranih nosača i prilikom svakog zastoja bloka vršio se detaljan pregled nosača, te su pisani izvještaji o istim i vršene sanacije, jer se tada nije utvrdio uzrok nastanka pukotina. Na slici ispod se vidi prikaz deformacije nosača topione komore.



Slika 3. Izgled polomljenog nosača topione komore

Ispitivanja i istraživanja su vršena u istom periodu. Uporedno sa praćenjem stanja i ispitivanjem, traženo je rješenje za nosače topione komore koje bi omogućilo siguran i pouzdan rad postrojenja.

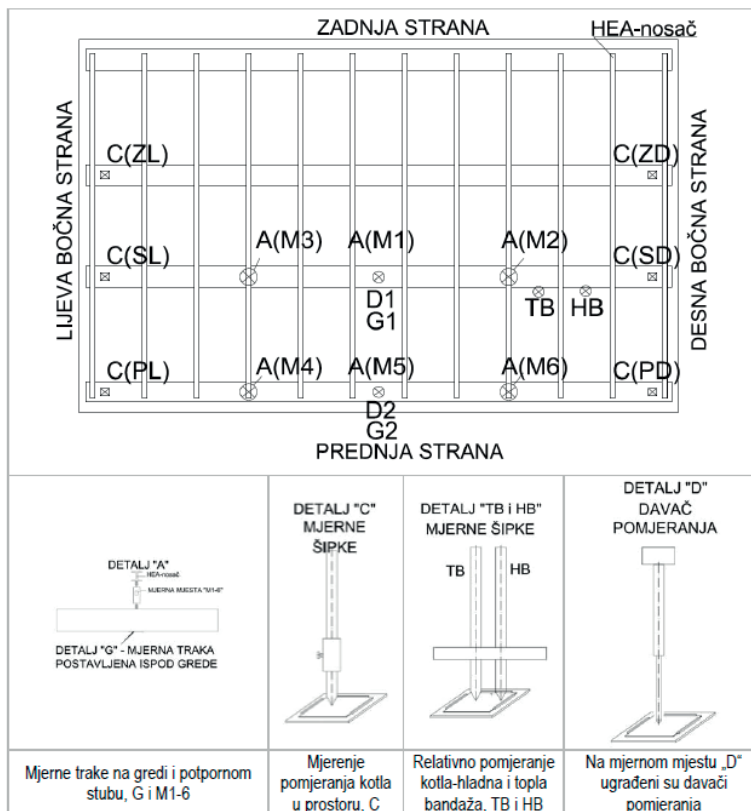
3. ISTRAŽIVANJE I NOVO PROJEKTNO RJEŠENJE

3.1. Istraživanje uroka loma nosača

Obzirom na izvršenu rekonstrukciju, stvorila se potreba za utvrđivanjem uzroka loma nosača topione komore. Urađen je Elaborat pod nazivom „Istraživanja uzroka loma nosećih vijaka na kotlu“ koji nalaže da je potrebno izvršiti snimanje pomjeranja kotla, u toku procesa puštanja u rad (zagrijavanje), na mjestima na osnovu kojih će se moći utvrditi stvarno prostorno pomjeranje kotla, izazvano zagrijavanjem od početne temperature (temperature okoline) do konačne radne temperature, a nakon sanacije slomljenih i oštećenih vijaka. Dakle, Elaboratom su utvrđeni naponi, deformacije i pomjeranja nosećih greda, naponi nosećih svornjaka, te

definisani uzroci lošeg ponašanja nosača. Kontrolna ispitivanja su vršena u skladu sa projektnim zadatkom, a u obimu koji zadovoljava realno stanje.

Izvršena su mjerenja pomjeranja i naprezanja na karakterističnim mjestima radi utvrđivanja stvarnog ponašanja donjeg dijela kotla u različitim režimima rada. Mjerenja su izvršena savremenim mjernih sredstvima u realnom vremenu, tj. koristeći tenzometrijske mjerne trake i akvazične uređaje, te davače pomjeranja i prenosni računar. Na slici ispod data je šema mjernih mjesta.



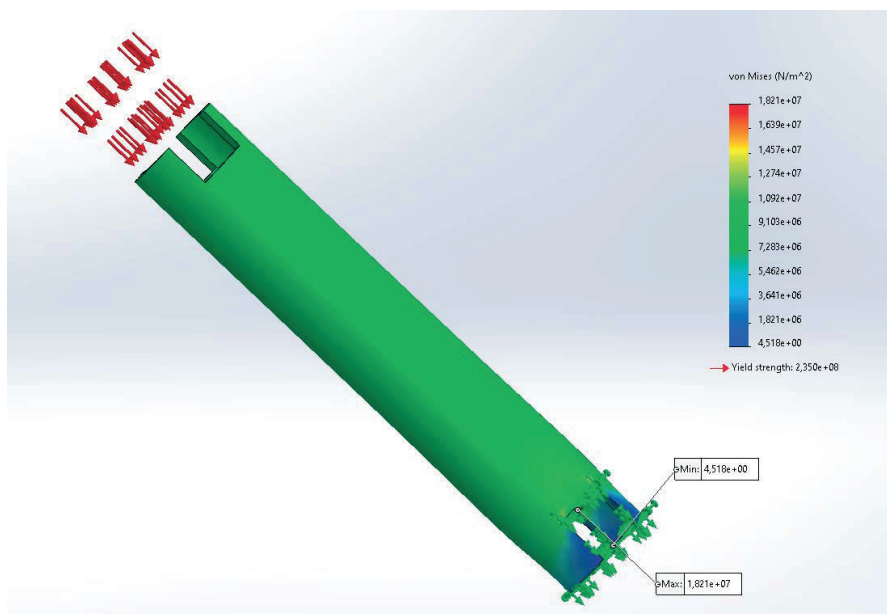
Slika 4. Šema mjernih mjesta [7]

U zaključcima navedenog Elaborata navedeno je da cijeli sistem usljed temperaturnih promjena vrši neravnomjernu translaciju u vertikalnoj i horizontalnoj ravni, da je opterećenje glavnih nosećih greda relativno malo, da se cijeli sistem neravnomjerno zagrijava i hladi naročito u početnoj fazi, te da usljed temperaturnih dilatacija najviše trpe nosači topione komore. Na osnovu istraživanja, u Elaboratu je zaključeno da su postojeći nosači nefunkcionalni i poddimenzionisani, te da isti svojom krutošću ne mogu pratiti preraspodjelu sila sa kotla na noseće grede, što znači da u toku temperaturnih promjena nosači trpe izvijanja i zatezanja, gdje se na površini presjeka javlja inicijalna pukotina, koja u procesu zamora propagira do konačnog loma nosača. Dakle, potrebno je nosače ojačati i konstruisati izvedbu nosača sa više slobodnog oslanjanja.

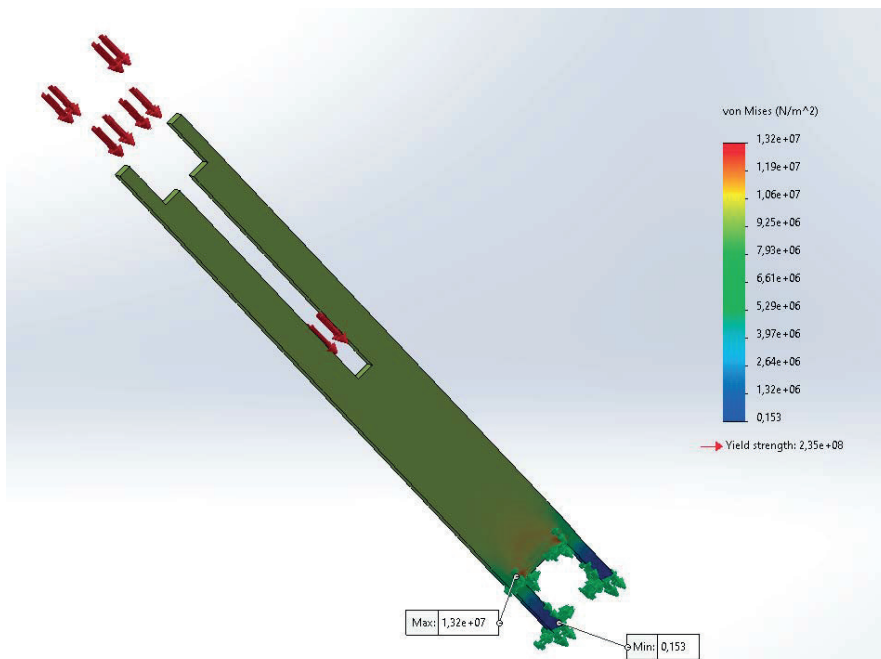
3.2. Projektno rješenje novih nosača

Uvažavajući višegodišnje preglede i sanacije vijaka u toku godišnjih remonata, dostupnih izvještaja, te zaključaka nakon istraživanja uzroka loma postojećih nosača topione komore, definiše se novo projektno rješenje nosača topione komore. Kako je navedeno, postojeći nosači su poddimenzionisani i imaju mogućnost promjene samo u jednoj ravni. Vodeći se svim navedenim novi nosači topione komore su dimenzionisani da izdrže naprezanja definisana prilikom mjerenja i istraživanja uzroka loma postojećih nosača, te zadovolje potrebu za više stepeni slobode kretanja, kako blaga prostorna translacija dijelova kotla, u odnosu na noseće grede, usljed toplotnih dilatacija, ne bi dovela do izvijanja i kidanja nosača topione komore.

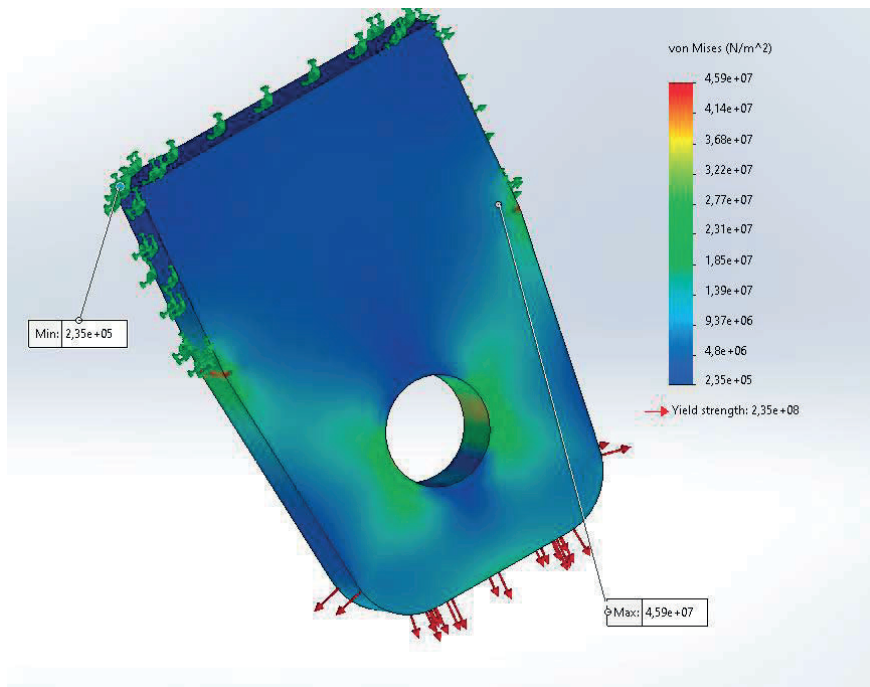
Prethodno izmjerene, evidentirane u dostupnim izvještajima, promjene napona pri zagrijavanju i hlađenju kotla iznose ± 10 MPa, te su zateznog ili pritisknog karaktera u zavisnosti da li se radi o zagrijavanju ili hlađenju kotla, te u zavisnosti od položaja nosača na dnu topione komore. Na novom projektnom rješenju urađena je numerička simulacija opterećenja pojedinačnih dijelova nosača topione komore, na vrijednosti navedenih napona, a rezultati numeričke simulacije su prikazani na slikama ispod.



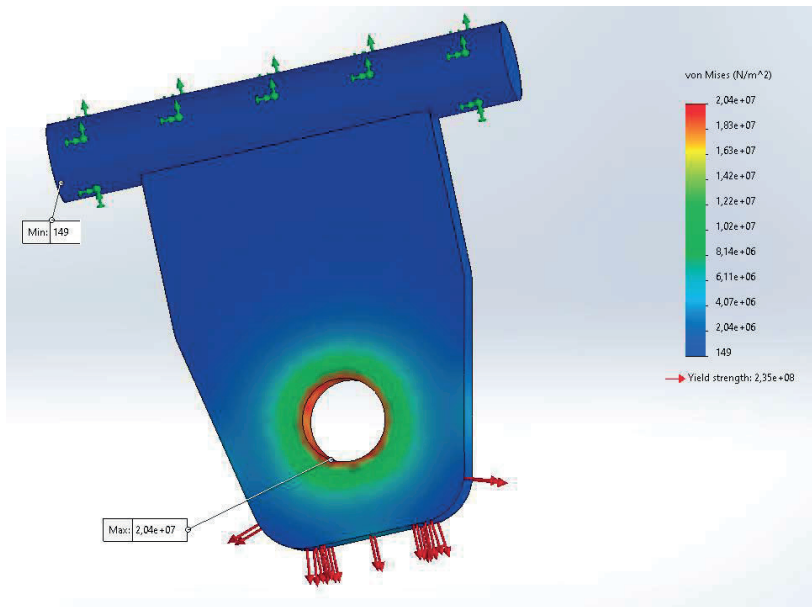
Slika 5. Simulacija opterećenja pojedinačnog komada – Cijev $\text{Ø}88,9 \times 10$, mat. 16Mo3



Slika 6. Simulacija opterećenja pojedinačnog komada – Unutrašnji komad 1, mat. 16Mo3]



Slika 7. Simulacija opterećenja pojedinačnog komada – Uška 1, mat. 16Mo3 [8]



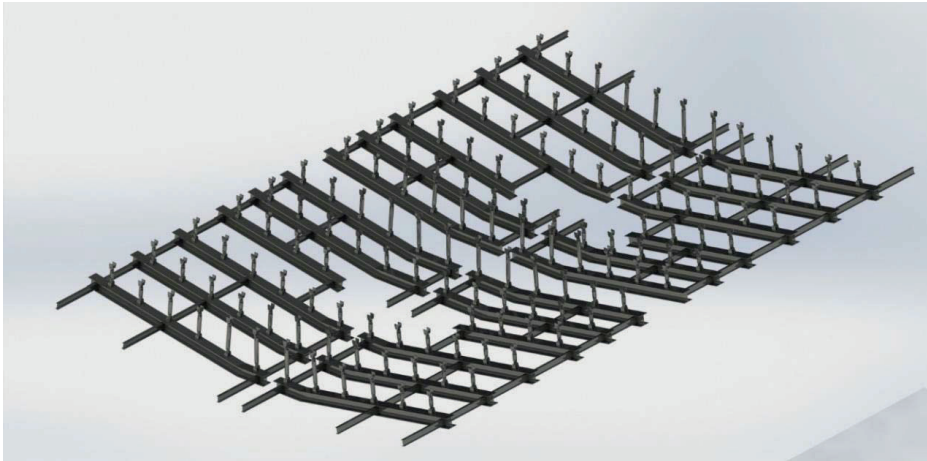
Slika 8. Simulacija opterećenja pojedinačnog komada – Uška 2, mat. 16Mo3

Analizom uzroka loma postojećih nosača, vršena su mjerenja pomjeranja pri zagrijavanju i hlađenju. Uzimajući u obzir rezultate mjerenja, koja navode neravnomjerno zagrijavanje i hlađenje kotla, te prateće toplotne dilatacije, došlo se do zaključka da novo projektno rješenje treba da ima više stepeni slobode kretanja, koje će dozvoliti promjene i pomjeranje ne samo u jednoj ravni, što je izvedeno korištenjem više uški i bolcnova, koje omogućavaju više stepeni slobode kretanja. Također, zadovoljen je uslov projektnog zadatka koji nalaže da novo projektno rješenje treba biti kompatibilno sa preostalim dijelom bandaža na kotlu koji se ne mijenja, te da kao takvi čine funkcionalnu cjelinu.

Novo projektno rješenje pojedinačnih nosača, te prikaz dna topione komore su prikazani na slikama ispod.



Slika 9. Novo projektno rješenje nosača topione komore [8]



Slika 10. Dno topione komore



Slika 11. Dio dna topione komore

4. ZAKLJUČAK

Elektroenergetske kompanije uvode sve veći trend optimizacije procesa proizvodnje sa ciljem smanjenja troškova, te povećanja proizvodnosti tehničkog sistema, kroz korištenje metode preventivnog održavanja prema vremenu. Sa aspekta filozofije prilaza održavanju, u posljednje vrijeme, u održavanju različitih industrijskih grana, a u ovom slučaju termoelektrana najviše pažnje privlači održavanje prema pouzdanosti. Metoda održavanja prema pouzdanosti uključuje analizu otkaza u procesu odlučivanja o održavanju, naročito kada se radi od revitalizaciji postrojenja. U ovom radu je prikazan primjer jednog dijela revitalizacije kotlovskeg postrojenja, u kojem su rekonstruisani nosači topione komore.

Analizom rezultata numeričke simulacije opterećenja pojedinačnih dijelova nosača možemo doći do zaključka da su pojedinačni dijelovi dimenzionisani tako da naponi intenziteta 10 MPa nemaju negativan uticaj i ne izazivaju plastičnu deformaciju dijelova nosača. Pored toga, zadovoljavanjem potrebe za više stepeni slobode kretanja, te poštivanjem uslova da se novi nosači konstruišu na način da su kompatibilni sa postojećim sistemom bandažiranja možemo reći da su ispunjeni zahtjevi iz projektnog zadatka, te da novo rješenje nosača topione komore mogu nesmetano funkcionisati kao podsistem kotlovskeg postrojenja.

5. REFERENCE

- [1] Hadžikadunić F., Petković D.: Zbornik radova, Univerzitet u Zenici, 2022.
- [2] Milovanović Z., „Termoenergetska postrojenja – Tehnološki sistemi, projektovanje i izgradnja, eksploatacija i održavanje“, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, 2011.
- [3] Mijović B., „Održavanje strojeva i uređaja“, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2019.
- [4] Papić Lj., Milovanović Z., „Održavanje i pouzdanost tehničkih sistema“, Istraživački centar DQM, Prijedor, 2007.
- [5] Janković Ž., „Održavanje tehničkih sistema“, Fakultet Zaštite na radu u Nišu, Niš, 2017.
- [6] Brdarević S., Halep A., „Održavanje“, Univerzitet u Zenici, Zenica, 2013.
- [7] Vukojević D., „Istraživanje uzroka loma nosećih vijaka na kotlu“, Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet, 2012.
- [8] Šiljegović Z., „Projekat konstrukcije nosača topione komore kotla“, Termoelektro Brčko, Brčko, 2024.

APPLICATION OF FEM ANALYSIS IN DESIGN OF MECHANICAL STRUCTURES

PRIMJENA FEM ANALIZE U PROJEKTOVANJU MAŠINSKIH KONSTRUKCIJA

Samir Dizdar,
BerDiz Consulting AB, Andra Långgatan 48, 41327 Gothenburg, Sweden

Radoslav Tomović,
University of Montenegro, Mechanical Engineering Faculty, Bul. Džordža Vašingtona
bb, 81000 Podgorica, Montenegro

Safet Isić,
University “Džemal Bijedić” of Mostar, Mechanical Engineering Faculty, Univ.
Campus, 88104 Mostar

ABSTRACT

The aim of this paper is to show how proper application of FEM analysis can be used to find efficient solutions for the design of mechanical structures. The article shows two examples from the field of maintenance/improvement of existing structures.

- *The design of the inspection openings on the tanks is considered. For inspection purposes, manhole hatch installation is required on several tanks. The manhole hatch is designed with standard API 650.*
- *Micro cracks have been found near some of the welds on the Hydrogen Reformer HG unit at refinery. This paper investigates the root cause of this damage and suggests improvements to prevent such damage from occurring.*

Key words: FEM analysis, cracks, fatigue.

REZIME

Svrha ovog rada je pokazati kako se pravilnom primjenom FEM analize mogu pronaći efikasna rješenja za projektovanje mehaničkih konstrukcija. U radu su prikazana dva primjera iz oblasti održavanja/poboljšanja postojećih konstrukcija.

- *Razmatran je dizajn inspeksijskih otvora na rezervoarima. Iz sigurnosnih razloga potrebna je ugradnja inspeksijskih otvora na nekoliko rezervoara. Inspeksijski otvori su dizajnirani prema standardu API 650.*
- *Mikro pukotine su pronađene u blizini više zavarenih spojeva na konstrukciji hydrogen reformer-a u rafineriji. Ovaj rad istražuje osnovni uzrok nastanka pukotina i predlaže poboljšanja na datoj konstrukciji kako bi se spriječilo ponovno pojavljivanje pukotina.*

Ključne riječi: MKE analiza, pukotine, zamor.

1. FEM ANALYSIS OF INSPECTION MANHOLE ON LARGE STEEL TANKS

For inspection purposes, assembly of manhole hatch on all tanks is required. The manhole hatch is designed applying standard API 650 [1]. Fig.1 shows a sketch of a water storage tank with radius of 5,1 [m] and a height of 20 [m]. Detail “A” (Fig.1) shows in more detail all the parts included in the manhole hatch [2].

1.1. Tank analysis problem formulation

Stress analysis and evaluation of the water storage tank with the manhole hatch have been conducted in order to prove that the tank will not fail in various working conditions. Based on the results obtained in Ansys [3], the evaluation is done in accordance with EN-13445 [4].

The load acting on the tank mainly comes from the hydrostatic pressure of the stored liquid, which increases proportionally from top to bottom, as shown in Fig.1. The maximum pressure in the tank is 2 [bar] at the bottom of the tank. The operating temperature of the tank, for which the analysis needs to be performed, is 50 [°C]. FEM analysis was made for the construction of tanks with four different wall thicknesses (9,6; 15; 20 and 25 mm) [2].

Several materials have been used for different part of construction. EN-10028 [5] is used to retrieve material properties.

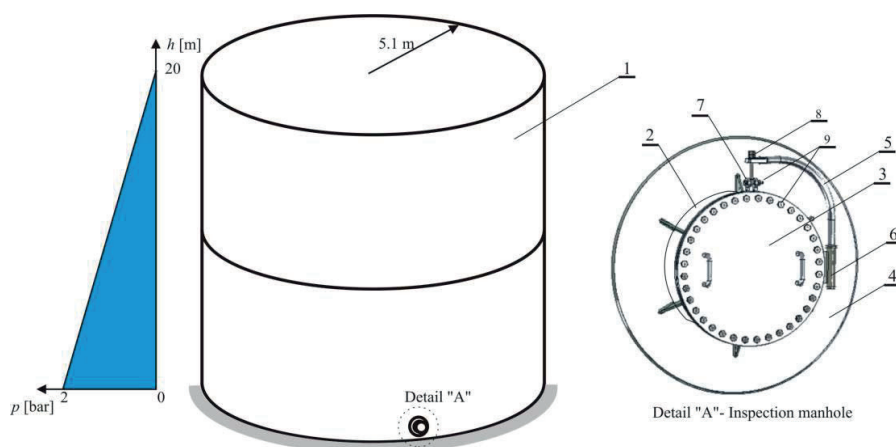


Fig. 1 Tank to be analysed and inspection manhole to be inserted.

1.2. Tank analysis procedure

FEM analysis in Ansys 19.2 [3] was performed to analyze the stress and strain levels in all parts of the tank. The analysis was performed according to the procedure shown in Fig.2

In the first analysis (shown in Fig.2 a.), the hydrostatic pressure of the stored liquid (0 bar at the top and 2 bar at the bottom of the tank – Fig.1) is applied to the shell model (entire tank). Then, from the result, boundary conditions to sub-model are retrieved.

FEM model of the entire tank is too large and the computation time would be very long (if mesh is more refined and made of solid elements). At the same time it will be very difficult to check results with high accuracy in such large model. Submodeling is a technique that may be applied in situations where high accuracy is required in a relatively small region of a larger model. The area where the manhole hatch is mounted is a typical example where the application of submodel technique is the most optimal solution. The analysis was performed according to the procedure shown in Fig.2 b).

Sub-model is made of solid elements and it is much smaller model than the model of the entire tank. On this sub-model is possible to investigate stresses and strains in materials with

high accuracy (because the model is small and it doesn't take long time to calculate). The mesh model of the submodel is shown in the Fig. 3.

The FEM analysis of the 3D-model of the entire tank was used to obtain boundary conditions to form a submodel of the manhole. The displacements from the coarse model are mapped to the boundary locations on the submodel in the form of DOF constraints (i.e., applied displacements).

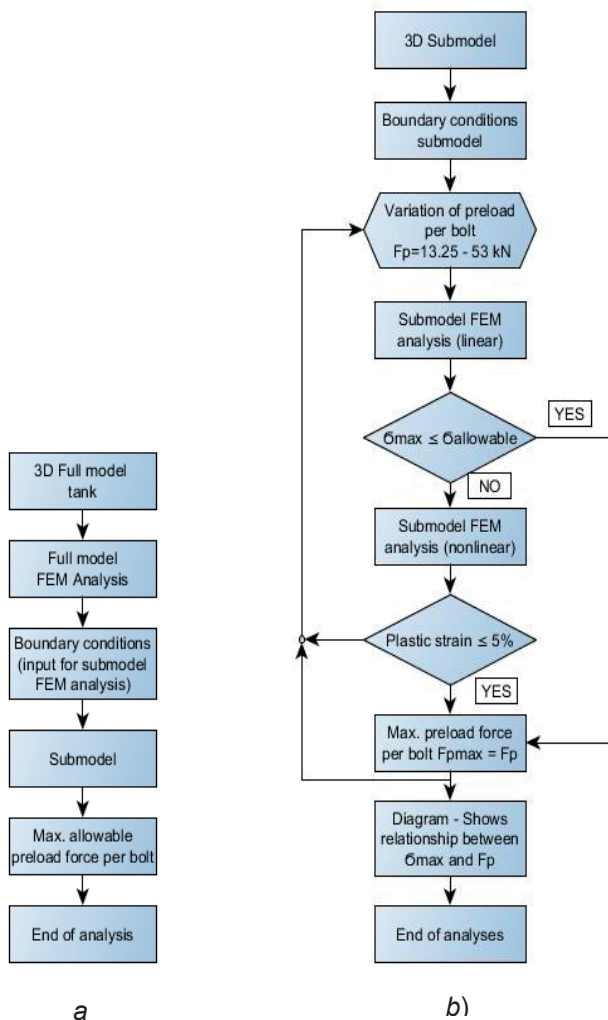


Fig. 2 Flow charts of model (a) and submodel (b) FEM analysis

Fig. 4 shows the deformations of the cylindrical shell with a thickness of 9,6 [mm]. As shown, the maximum displacements in the shell near the bottom are 11,193 [mm]. The manhole hatch is placed in that area. Based on experience one can guess that displacements will course a high stresses in the area.

In addition to the hydrostatic pressure, a bolt preloads are applied to the submodel. In Ansys, there are standard tools for defining loads. With these tools it is possible to define different types of loads, even loads in the form of bolt pretension. In relation to the prescribed

pressure on the seals, it was calculated that preload of the bolts should vary between 13.25 – 53 [kN]. By changing the preload of the bolts, it is necessary to obtain those preload values that will not cause excessive stresses in the area of manhole hatch and which will at the same time ensure that liquid doesn't leak through the manhole hatch.

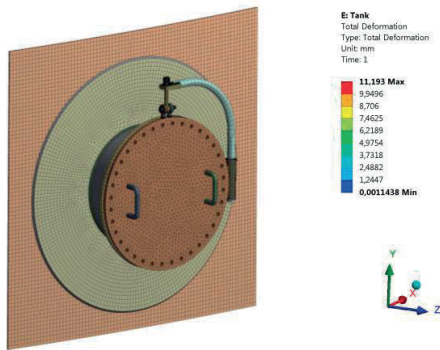


Fig. 3 Final finite elements mesh of the submodel

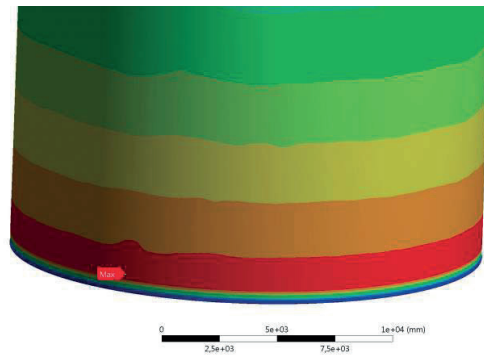


Fig. 4 Total deformations shell model

In the first step of the submodel analysis, a linear FEM analysis is performed. In case the result shows higher stress values than allowed, then a non-linear analysis will be performed. According to standard EN-13445 [4], the plastic strain shouldn't exceed 5% if design is approved. Plastic analysis is done to avoid redesign procedures, which in reality can be expensive and sometimes difficult to perform.

Identical FEM analysis was made for tank construction with four different wall thicknesses (9.6; 15; 20 and 25 mm) [2].

1.3. Results and discussion

Using FEM analysis, the values of the maximum stress in the area of the manhole hatch were obtained for different values of bolt preload and different values of the tank wall thickness. Equivalent von-Mises stress was used to estimate the magnitude of the stress in the elements of the examined structure.

As shown in Fig.5, "Equivalent (von-Mises) Stress" is about 418 MPa, which is much higher than allowed stress. It is very large area with high stresses, in other words it isn't possible to interpret it as local stresses. Stresses is too high and (therefore) design couldn't be approved. Redesign can be expensive and sometimes difficult to implement for various practical and economic reasons. To avoid redesign, plastic analyzes were performed. There, according to standard, plastic strain shouldn't exceed 5% if the design is approved.

The results of the nonlinear plastic analysis with an applied internal pressure 2 [bar], a bolt preload force 39.75 [kN] and a wall thickness of 9,6 [mm] are shown in Fig.6. Maximum plastic strain in the structure was 4.05% and the design could be approved according to the standard EN-13445 [4].

FEM analyses were also performed for other defined values of bolt preload. For a preload of 13.75 [kN] the maximum stress are within the allowable limits. For preloads of 26.5 and 39.75 [kN], the maximum stresses exceed the permitted values, but for these preloads the plastic deformations are within the permissible limits. For a preload of 53 [kN] and the maximum stress and plastic deformations exceed the permitted values [2].

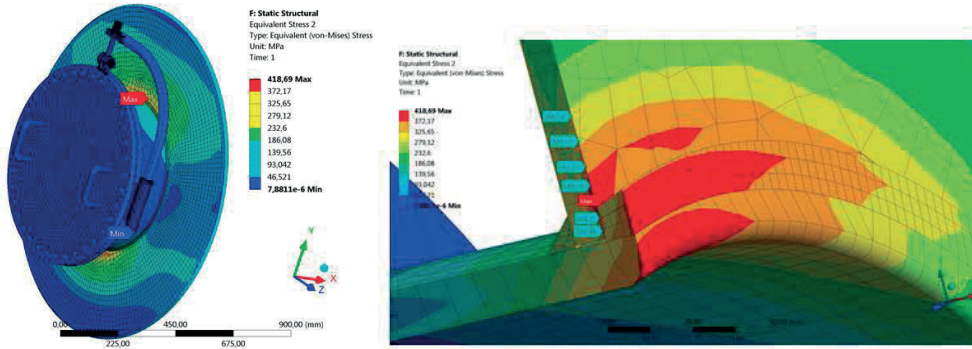


Fig. 5 Equivalent (von-Mises) Stress (The result for tank with a wall thickness of 9,6 mm and preload force on the bolt 39.75 kN)

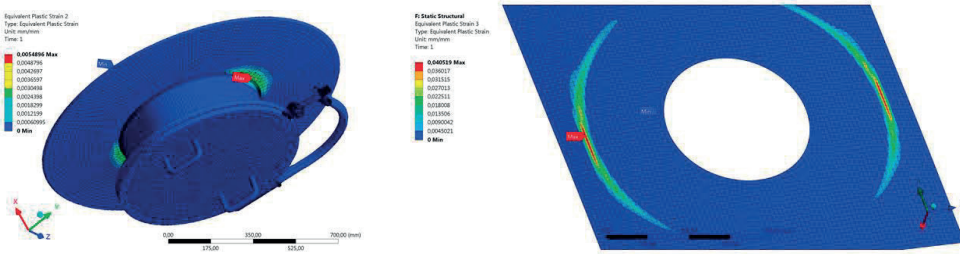


Fig. 6 Equivalent Plastic Strain

2. ROOT CAUSE ANALYSIS OF MICRO CRACKS OF HYDROGEN REFORMER

Micro cracks have been found on several of the pipes in the HF system unit [6] [7]. To continue to operate, the root cause needs to be determined and potential actions need to be taken. The purpose of this paper is to analyze the micro cracks in the outlet system and try to establish a root cause for this damage, as well as suggesting how to avoid further damage or prevent such damage in future installations.

Hence, not all parts of the system are evaluated in detail. The focus lies on the parts containing the welds where micro crack damages have been found, in particular three locations where the most severe damages are observed. Following the notation of [7] these three welds are called S3, S4 and S7. Their locations are shown in Fig.7.

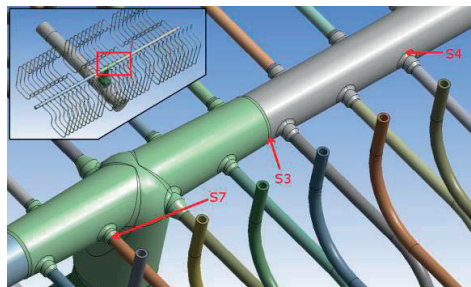


Fig.7: The location of the three most severe damages. The damages at S3, S4 and Analysis

Several different methods are used to try to determine the cause of the observed damages. The system is investigated with numerical finite element (FE) analyses as well as with analytical and theoretical methods. Welding and inspection books are studied to analyze the choice of materials and welding procedure. The different methods are meant to provide a substantial width in the investigation and hopefully increase the understanding and to prevent damages like these from occurring in the future.

The system is evaluated according to the ASME B31.3 standards [8]. API papers [1] are also considered. ASME B31.3 is used for process piping and will be used to evaluate stresses in the system for design purposes. A Swedish code BSV97 [9] is used for calculation of wind and snow loads on different structures.

2.1.1. Pipestress Analysis

The software Pipestress [10] is used to make a model of the piping system and to obtain loads and movements at different points throughout the system. Pipestress is a one dimensional software that is used to model large piping systems including supports of different kinds. The software is very efficient at calculating the response of the system to different loads and thereby identifying weak points in its design.

2.1.2. Ansys FE-analysis

The software ANSYS Mechanical [3] is used as a verification of the Pipestress results as well as to provide detailed results regarding stress concentrations and stress directions at points of interest. Furthermore, thermal transients and effects due to creep properties of the material are investigated using ANSYS.

2.1.3. Loads

The system is evaluated for sustained loads and thermal range loads. The sustained loads considered are internal pressure and dead weight. The loads are evaluated in accordance with reference [8]. No wind loads have been applied in the calculation, but recorded data suggest that the contribution is small. The temperatures (T) and pressure for the different parts of the system, according to specifications, are presented in Table 1. The load combinations are presented in Table 2.

Table 1. Temperature and pressure conditions according to specifications

Part	Design		Operation	
	Temp. [°C]	Pressure [MPa]	Temp. [°C]	Pressure [MPa]
Transfer Line	300	2.8	250	2.48
Manifold	890	2.8	860	2.48
Pig Tails	890	2.8	860	2.48

Table 2. Load cases

Load case	Loads	Allowed stress
Sustained Loads	DW+DP	S_A (from table)
Thermal Range	TE(+DW)	$S_A=1.25 S_c+0.25 S_h$
Sustained Loads	DW+OP	S_A (from table)
Thermal Range	TE(+DW)	$S_A=1.25 S_c+0.25 S_h$
Combined (Creep)	DW+OP+TE	

2.2. Results

Many of the results are presented with the term utilization. The utilization U for a component is the fraction between the actual and allowed stress.

A utilization below 1 ($U < 1$) means the component is qualified, a utilization above 1 ($U > 1$) means that a more detailed analysis needs to be performed or requires a change in design.

2.2.1. Pipe stress analysis results

Results are presented for Sustained Loads and Thermal Range Loads with utilization in accordance with ASME B31.3 302.3.5 (c) and (d) [8]. The load cases considered are the conditions for design and operation. Utilizations for the different load cases for the different models are given in Table 3.

Table 3. Utilization

Part	Design		Operation	
	Sustained	Thermal Range	Sustained	Thermal Range
Current State	1.36	0.90	1.02	0.83
C.S. Sliding		0.82		0.77
Improved State	0.84	0.90	0.63	0.83

Table 4 shows the stresses at the welds S4, S7 described in the BerDiz report, reference [7], as well as the stress at the node with highest utilization in the model.

Note that the node SS02 is in the Manifold (Sub Header) and therefore uses a different material with higher allowable stress.

Table 4. Stresses at S4, S7 and the highest stress MPa. The node number where the stress occurs is Pipestress is presented in paranthesis.

		Design stress [MPa]		Operation stress [MPa]	
		Sustained	Thermal R.	Sustained	Thermal R.
Current State	Maximum	9.36 (PO3L)	130.4 (PJ27)	9.16 (PO3L)	120.4 (PJ27)
	S4 (S518-PD10)	7.45	110.2	7.25	104.4
	S7 (S004-PE30)	7.39	117.1	7.19	110.7
Current State (Sliding)	Maximum	11.6 (PMIL)	119.1 (S002)	11.45 (PMIL)	112.5 (S002)
	S4 (S518-PD10)	7.46	108.3	7.26	102.5
	S7 (S004-PE30)	7.4	118.7	7.2	112.1
Improved State	Maximum	5.76 (PO82)	130.4 (PJ27)	9.49 (SS02)	120.4 (PJ27)
	S4 (S518-PD10)	4.17	110.2	3.97	104.4
	S7 (S004-PE30)	3.88	117.1	3.68	110.7

2.2.2. Ansys analysis results

Overall, the ANSYS results are in good agreement with the Pipestress results. Another fundamental difference from the Pipestress results is that circumferential stresses due to inner pressure is included in the ANSYS results.

Three different types of analyses are performed with ANSYS:

- Static structural analyses of the sustained (pressure + dead weight) loads and the thermal expansion load (including dead weight)
- Creep analyses, to study the creep strain over time at different temperatures.
- Thermal transient analyses, to study the temperature and local thermal stress distributions at start-ups, shut-downs and trips.

The maximum stresses are summarized in Table 5 for the respective load cases.

Table 5. Load Cases

		Maximum stress [MPa]	
		Inside	Outside
Design	Sustained (PD+DW)	36	13
	Thermal expansion ($TE_{890^{\circ}C}+DW$)	75	150
Operation	Sustained (PO+DW)	32	12
	Thermal expansion ($TE_{820^{\circ}C}+DW$)	70	137
Thermal Transient	Increasing ($860-20$) $^{\circ}C/4h$	40	25
	Decreasing ($20-860$) $^{\circ}C/4h$	130	60

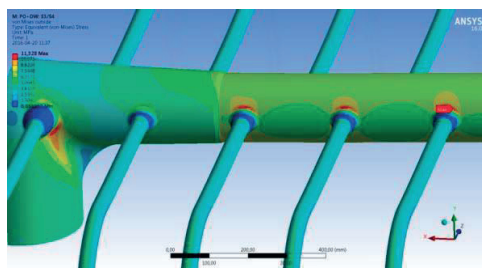


Fig.8: The von Mises stress on a section of the manifold’s outer surface under PO+DW loads. The central southern pig tail group is on the bottom of the plots and thus S4 is where the maximum is labelled.

The non-linear behavior of creep makes the results from the creep analyses very sensitive to the particular values used for the temperature and material properties. Thus, the creep results are here chosen to be summarized with a plot rather than a table. In this way, one may judge the behavior of the creep in the model. One of the locations found to be quite sensitive to creep is the upper part of the weld between manifold and pig tail weldolets, e.g. where the damage at S4 where found. The strain at such a point is plotted against time for various temperatures in Fig. 9. The strong temperature dependence is evident from the plot where it can be seen that changing the temperature from 820 $^{\circ}C$ to 860 $^{\circ}C$ reduces the time to reach a particular strain almost by a factor of 10.

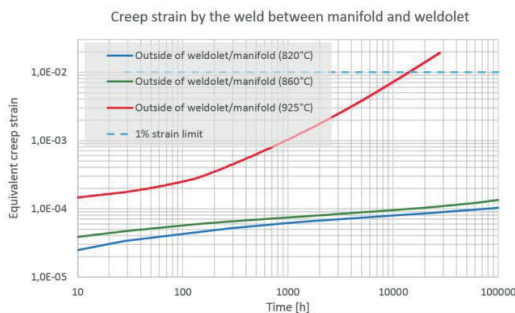


Fig .9: The strain over time at the weld between manifold and weldolet, e.g. S4’s location. The 1% strain limit at which creep damages might emerge is plotted as a dashed line

The following list summarizes the conclusions which can be drawn from the ANSYS results regarding the damages at S3, S4 and S7.

- S3: The evaluated stresses around S3 for the different load cases do not on their own suggest that there would be any damages there at this time nor in the near future. Perhaps together with the residual stresses, discussed in the next section, they could contribute to damages.
- S4: The stresses due to sustained loads around S4 exceed the allowed limit in the design case and are highly utilized in the operational case. However, the region is shown to be sensitive to creep strain but with current data it is difficult to make accurate predictions regarding its life time. Furthermore, the thermal stress range is moderate and fatigue will thus give negligible contributions.
- S7: The thermal stress range at this weld is large but lie 2% below the allowed limit in the operational case. However, this limit is rather conservative, in particular in this case where the actual number of cycles is so small. Furthermore, a comparison of the strain range with the low-cycle fatigue data of the similar INCOLOY 800H alloy [11] shows that the evaluated strain is roughly 50 times smaller than that which would cause failure.

2.2.3. Creep analysis results

The evaluated utilization at the current time with regard to expected lifetime varies by use of data from references [8], [11] and [12]. They are presented in Table 6 for the different references. The corresponding expected lifetime for these temperatures at the stress of 14.7 MPa is presented in Table 7. From the results, it is clear that the materials differ in rupture life, with the ASME material being considerably weaker. The ASME material has a safety factor applied to it to get the allowable stress given in the code [8]. This explains most of the difference but since the determining material value is unknown a compensation for the safety factors cannot be made. Furthermore, the ASME material is specified for the weldolets, to which two of the critical welds are connected. The contribution from fatigue is very low. Considering that the utilization from fatigue is combined with the utilization from creep as a sum of squares, when the creep-fatigue utilization is evaluated, the contribution from fatigue becomes completely dismissible.

Table 6. : Utilization at present time of operation for different operational temperatures

Oper. Temp.	PARALLOY [11]		INCOLOY [10]		ASME B31.3 [7]	
	10 [MPa]	14.7 [MPa]	10 [MPa]	14.7 [MPa]	14.7 [MPa]	10 [MPa]
820 °C	0.002	0.005	0.002	0.01	0.16	0.43
840 °C	0.006	0.01	0.006	0.03	0.38	0.99
860 °C	0.02	0.04	0.02	0.11	0.86	2.20
880 °C	0.05	0.1	0.07	0.35	1.89	4.75

Table 7. : Expected life (rupture life) [h] at constant stress 14.7 MPa

Oper. Temp.	PARALLOY [11]	INCOLOY [10]	ASME B31.3 [7]
	14.7 [MPa]	14.7 [MPa]	14.7 [MPa]
820 °C	9610000 h	4320000 h	100000 h
840 °C	3250000 h	1270000 h	43700 h
860 °C	1140000 h	391000 h	19700 h
880 °C	417000 h	125000 h	9100 h

3. CONCLUSION

In the first example, „Fem analysis of inspection manhole on large steel tanks“, the elastic analyzes showed that the stresses in the material were too high and design couldn't be approved. After the plastic analysis the design could be approved with restriction on preload force in the bolts 40 kN/per bolt.

The similar analyses have been made taking into consideration varying thicknesses of the wall. The results shows that the greater thickness gave smaller deformations and stresses. The conducted analyzes have shown that there is no need for redesign of the structure, which in this case would produce high costs, and can sometimes be difficult to perform.

In the second example, „*Root cause analysis of micro cracks of hydrogen reformer*“, the HG unit seems to have been manufactured and evaluated in accordance with applicable standards and codes, save the questionable existence of an applied wind load, which would not influence the result significantly.

Moving the constant hanger supports according to the improved Pipestress model would greatly reduce the creep driving forces, e.g. sustained loads. The analyses over all shows that the system is very sensitive to the loads from the constant hangers. The movements of the pipes from sustained loads are very small; this indicates that the system is very sensitive to small changes during installation.

The Ansys analysis indicates that creep could be the root cause of the damage at the S4 weld. However, the point most sensitive to creep in the model lies on the inside of the manifold, which suggest that creep damages could be worse there. In general, the observed crack orientations are consistent with the direction of the principal stresses. However, the magnitude of the principal stresses are typically not large enough to, by themselves, be the cause of the observed damages, indicating the presence unknown stresses, for example residual stresses.

4. REFERENCES

- [1] API 650, Welded Tanks for Oil Storage, (2013), American Petroleum Institute.
- [2] “FEM analysis of inspection manhole on large steel tanks”, (R. Tomović, S. Dizdar, S. Isić, S. Tuka and I. Karabegović), Part E: Journal of Process Mechanical Engineering – SAGE Author Services, USA.
- [3] ANSYS R19.2, Mechanical Enterprise (accessed on January 2019).
- [4] EN-13445-3-2009, Unfired pressure vessels, Issue 4 (2012-07), Swedish Standards Institute.
- [5] EN-10028-2-2003, Flat products made of steels for pressure purposes, Swedish Stand. Institute.
- [6] “Root cause analysis of micro cracks of hydrogen reformer HG”, (S. Dizdar, R. Tomović and A. Vučina), 8. Internacionalna Naučna Konferencija IRMES 2017, Trebinje, BiH.
- [7] BerDiz Teknisk Rapport, Replikprovning HG, 2015.
- [8] ASME B31.3,2012.
- [9] Boverket, Boverkets handbok om snö and vindlast, 1997, 2nd edition.
- [10] DST Computer Services S.A., Pipestress, version 5.0.
- [11] INCOLOY® alloy 800T & 800HT®, Special Metals Corporation, 2004.
- [12] DONCASTER PARALLOY, Heat resistant alloy technology centrispun tubes and statically cast fittings, fabricated coils, catalyst tubes and manifolds.

DEFINISANJE INTEGRALNE LOGISTIČKE PODRŠKE PRI NABAVCI RATNIH BRODOVA

INTEGRAL LOGISTICS SUPPORT DESIGN DURING THE PROCUREMENT OF WARSHIPS

prof. dr. sci. Marinko Aleksić dipl. inž.
Razvojno-istraživački centar Polix Berane &
Fakultet za pomorstvo i turizam Bar

dr. sci. Sead Cvrk dipl. inž.
Univerzitet Crne Gore,
Pomorski fakultet Kotor

REZIME:

Ovaj rad istražuje definisanje Integralne logističke podrške (ILS) u procesu nabavke ratnih brodova, s fokusom na kompleksnost dizajna, održavanje i dugoročnu održivost. Integralna logistička podrška je ključna za efikasnost tokom cijelog životnog ciklusa broda, jer obuhvata izradu tehničke dokumentacije, održavanje, nabavku rezervnih dijelova i obuku posade. Analiziraju se relevantni standardi, važnost NATO kodifikacione klauzule, obezbjeđenje kompjuterizovanog sistema upravljanja održavanjem (CMMS) i upravljanje zastarjelošću ugrađene tehnologije. Ilustracija koncepta uključuje primjer patrolnog broda, koji se nabavlja za Mornaricu Crne Gore.

Ključne riječi: ratni brod, integralna logistička podrška, kodifikacija, upravljanje zastarjelošću

ABSTRACT:

This paper investigates Integrated Logistics Support (ILS) design in the warship procurement process, with a focus on the complexity of design, maintenance and long-term sustainability. Integral logistics support is key to efficiency throughout the ship's life cycle, as it includes the creation of technical documentation, maintenance, procurement of spare parts and crew training. The relevant standards, the importance of the NATO codification clause, the provision of a computerized maintenance management system (CMMS) and the management of the obsolescence of embedded technology are analyzed. The illustration of the concept includes an example of a patrol boat, which is being procured for the Navy of Montenegro.

Keywords: warship, integral logistics support, codification, obsolescence management

1. UVOD

Nabavka ratnog broda je izuzetno kompleksan zadatak, jer obuhvata veliki broj međusobno povezanih tehničkih, logističkih i operativnih aspekata. Integracija svih ovih elemenata zahtijeva precizno planiranje, pažljivo definisanje sistema i visok nivo prilagođenosti specifičnim misijama i uslovima. To je složen posao koji uključuje dugoročne logističke planove, obuku, stalno unapređenje tehnologija i održavanje borbene spremnosti. Složenost zadatka nabavke ratnog broda proizlazi iz više tehničkih, operativnih i logističkih zahtjeva, koji su daleko kompleksniji nego kod civilnih brodova ili drugih vojnih sistema. [1]

Ratni brodovi nisu samo transportna sredstva. Oni se projektuju prema specifičnim potrebama mornarice, misijama i geografskom području operacija. Na primjer, brodovi koji se koriste za patroliranje u obalnim vodama (OPV brodovi - engl. Offshore Patrol Vessel) mogu biti manji, ali moraju biti vrlo pokretni i sposobni da brzo reaguju na prijetnje [2], dok veći ratni brodovi kao fregate ili razarači imaju različite zahtjeve u pogledu autonomije i borbene sposobnosti. Pogonski sistemi (dizel, gasno-turbinski ili kombinacija) koji moraju omogućiti visoke performanse u svim vremenskim i morskim uslovima. Oni moraju biti dovoljno snažni da omoguće visoku brzinu, ali i efikasni kako bi se smanjila potrošnja goriva i produžila operativnost na moru. Plovidbenost i stabilnost moraju biti takvi da brod može bezbjedno i efikasno operirati u različitim područjima, uključujući mirne obalske vode i turbulentne okeane. [3]

Navigacioni i komunikacioni sistemi moraju omogućiti sigurno upravljanje i komunikaciju sa drugim brodovima, avionima i komandnim centrima, uz izbjegavanje detekcije od strane neprijatelja. Radari i senzori moraju biti efikasni za nadzor vazdušnog, površinskog i podvodnog prostora, što je ključno za bezbjednost broda i uspješno obavljanje misija. Elektronski sistemi za upravljanje brodom, naoružanjem i obaveštajnim informacijama (engl. *C4ISR - Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance*) moraju biti neometano integrisani.

Naoružanje i borbeni sistemi kao što su topovi, raketni sistemi, torpeda, protivvazdušni sistemi i drugi oružani sistemi moraju biti integrisani sa sistemima za nadzor i upravljanje vatrom. Brod mora biti sposoban da izvede širok spektar zadataka, od obalske patrole i nadzora do ofanzivnih i defanzivnih operacija, što zahtijeva visok nivo integracije različitih sistema. [4]

Ratni brodovi su opremljeni velikim brojem sofisticiranih tehnologija koje moraju međusobno funkcionisati kao jedinstveni sistem. Kako se tehnologija stalno razvija, ratni brodovi moraju biti dizajnirani s fleksibilnošću za nadogradnju. Naoružanje i senzori mogu se unaprijediti s novim tehnologijama kao što su elektromagnetno, lasersko oružje ili napredni raketni sistemi. Zbog toga je jedan od obaveznih zahtjeva obezbjeđenje rezerve električne energije koju mogu proizvesti brodski agregati. [5] Softverske nadogradnje omogućavaju poboljšanje performansi sistema bez potrebe za većim fizičkim promjenama.

Pored toga, veoma važan zadatak je da se brodovi održe operativnim i efikasnim tokom dugog vremenskog perioda eksploatacije. Kako bi se postigao ovaj cilj, neophodno je implementirati efikasan integrisani logistički sistem (engl. *ILS - Integrated Logistics Support*), koji obuhvata sve aspekte podrške potrebne za održavanjem, upotrebom i modernizacijom ratnih brodova tokom njihovog radnog vijeka. U ovom članku razmatramo šta je ILS, koji standardi ga definišu i ključne elemente ovog sistema, ilustrovano primjerom nabavke OPV brodova za potrebe Mornarice Vojske Crne Gore.

ILS – integralna logistička podrška je proces planiranja, razvijanja i implementacije logističke podrške za složene sisteme poput ratnih brodova, sa ciljem da se obezbijedi maksimalna operativnost uz minimalne troškove tokom cijelog životnog ciklusa sistema. Taj pristup ima za cilj optimizaciju podrške za sisteme tokom njihovog čitavog životnog ciklusa, osiguravajući spremnost za misiju. To znači da ILS ne obuhvata samo tehničko održavanje broda, već i obuku

posade, nabavku rezervnih dijelova, planiranje modernizacije i analizu rizika od potencijalnih otkaza. [6]

Prema različitim izvorima, ILS je dizajniran da minimizira troškove tokom životnog ciklusa sistema, često na nivou podsistema ili komponente. Glavni fokus ILS-a je da poboljša dostupnost sistema i opreme koordinacijom i integracijom svih logističkih aspekata, uključujući zalihe, opremu, radnu snagu, objekte, obuku, podršku podacima, transport i usluge podrške. [7,8]

Za ratne brodove, ovaj sistem je od posebnog značaja zbog složenosti samog broda, kao i okruženja u kojem se koristi – bilo da je riječ o obalskoj zaštiti, patrolnim misijama ili borbenim operacijama.

2. STANDARDI INTEGRALNE LOGISTIČKE PODRŠKE

Da bi planirali i pružili efikasnu integralnu logističku podršku (ILS), Mornarica se može ili osloniti na utvrđena pravila bivše države ili koristiti MIL i NATO standarde, koji su više usklađeni sa praksom stranih proizvođača odbrambene industrije i brodogradnje. Ovi standardi definišu metode, alate i procedure koji se primjenjuju kako bi se postigla dugoročna efikasnost, operativnost i održivost vojnih sistema

U skladu sa starim Pravilnikom o opremanju Vojske [9] prilikom nabavke naoružanja i vojne opreme (NVO) iz uvoza, moraju se uzeti u obzir određeni uslovi. Prilikom uvoza gotovih sredstava NVO obavezno se nabavlja i odgovarajuća dokumentacija o opisu, rukovanju, održavanju i baždarenju, spisak kompleta, imenik (katolog) sastavnih dijelova i remontna dokumentacija sa normativima rezervnih dijelova, kao i kontrolna dokumentacija sa metodima ispitivanja i standardima.

U ugovore sa inostranim partnerima se unose odredbe koje obezbjeđuju i garantuju i sve ostale tehničke i materijalne osnove budućeg procesa opremanja: rezervni dijelovi i sklopovi za početni stok i određeni period eksploatacije, specijalna pogonska sredstva (gorivo, mazivo, tečnost) i specijalna oprema za održavanje (pokretne radionice, alat, mjerna, kontrolna i ispitna oprema, kontejneri za čuvanje i drugo). Takođe; obezbjeđuju se obuka kadra, izgradnja potrebnih objekata i ostalo što je neophodno za normalnu eksploataciju i održavanje.

NATO standard ALP-10 - NATO smjernice o integralnoj logističkoj podršci za multinacionalne programe naoružanja [10] navodi devet elemenata ILS-a. Standard se odnosi na programe naoružanja u kojima dvije ili više zemalja NATO-a kolektivno upravljaju logističkom podrškom materijalnog rješenja, u obliku jednog ili više sistema od interesa, kroz njegove faze životnog ciklusa. Uključuje zajedničke, kooperativne, multinacionalne, kao i zajednički finansirane programe naoružanja, a može se primijeniti i na nacionalne programe naoružanja. Dok se ILS može primijeniti na sve programe naoružanja, nivo implementacije će zavistiti od stepena inovativnosti i složenosti rješenja u materijalnom smislu, okruženja za podršku i dostupnosti resursa kao što su finansiranje i specijalizovano osoblje.

Američke vojne publikacije kao što su OPNAVINST 4700.7M - Politika održavanja za brodove mornarice [11] i standardi MIL-STD-1369 - Program integrisane logističke podrške [12] i NAVSUP PUB 548 - Priručnik za snabdijevanje integrisanom logističkom podrškom [13] navode deset ključnih elemenata ILS-a. OPNAVINST 4700.7, koji predstavlja zvanični priručnik za ILS u američkoj mornarici, naglašava da se ILS mora planirati od najranijih faza projektovanja broda do njegovog povlačenja iz službe. To uključuje faze projektovanja, proizvodnje, testiranja, upotrebe, održavanja i modernizacije. Cilj je smanjiti troškove održavanja i obezbijediti visoku operativnost brodova kroz preventivne mjere i adekvatnu logističku podršku. Mornarica je deo šireg vojnog sistema, pa se ILS mora uskladiti s drugim granama vojske i saveznicima, kao što su članice NATO-a. Priručnik naglašava potrebu za stalnim unapređenjem sistema, kako bi se mornarica prilagodila promjenama u tehnologiji i operativnim potrebama. Veliki naglasak se stavlja na kontinuiranu obuku i edukaciju posade i

tehničkog osoblja kako bi se osigurala spremnost na rad sa najnovijim tehnologijama i sistemima. Analiza rizika i potencijalnih otkaza je važan deo ILS-a. Priručnik definiše metode za predviđanje mogućih problema i njihovo efikasno rješavanje.

3. ELEMENTI INTEGRALNE LOGISTIČKE PODRŠKE

Elementi integralne logističke podrške su dizajnirani da budu međusobno zavisni i pokrivaju različite logističke aspekte u nabavci sistema za mornaricu:

1. Planiranje održavanja – Planiranje preventivnog i korektivnog održavanja broda, uključujući alate, rezervne dijelove i obuku tehničkog osoblja. Planiranje održavanja uključuje: nivoi popravke, vremena popravke, pogodnost za održavanje, potrebne opreme za podršku, uspostavljanje programa održavanja koristeći održavanje zasnovano na stanju, održavanje usmjereno na pouzdanost ili softversku podršku nakon proizvodnje
2. Podrška snabdijevanju – Osiguravanje dostupnosti potrebnih komponenti i rezervnih dijelova u svakom trenutku, kako bi se izbjegli dugotrajni zastoji. Podrška snabdijevanju obuhvata sve upravljačke akcije, procedure i tehnike neophodne za određivanje zahteva za nabavku, katalogizaciju, prijem, implementaciju, skladištenje, prenos, izdavanje i odlaganje rezervnih dijelova, dijelova za popravku, ažuriranja i zaliha. Ovo uključuje početne rezerve za zalihe rezervnih dijelova i podršku, kao i nabavku, distribuciju, ažuriranje i dopunu zaliha za podršku



Slika 1. Elementi ILS-a za OPV 60
Izvor: Slika generisana na CHATGPT

3. Objekti za održavanje i obuku – Odnosi se na izgradnju ili sticanje potrebne infrastrukture za rad i obuku. Objekti i infrastruktura se sastoje od trajnih i polutrajnih nekretnina potrebnih za podršku sistemu. Uključuje studije za definisanje tipova objekata (npr. obuka, skladištenje opreme, održavanje, skladištenje zaliha, skladištenje municije, kompjuterski hardverski/softverski sistemi, mrežni i komunikacioni sistemi) ili poboljšanja objekata, lokacije, prostornih potreba, ekoloških i sigurnosnih zahtjeva i opreme.
4. Pakovanje, rukovanje, skladištenje i transport – Ovaj ILS element se sastoji od resursa, procesa, procedura, razmatranja dizajna i metoda kako bi se osiguralo da su svi sistemi, oprema i prateći predmeti očuvani, upakovani, rukovani i transportovani na odgovarajući način, uključujući ekološka razmatranja i očuvanje opreme za skladištenje.
5. Tehnički podaci – Obezbjedivanje tehničkih priručnika, uputstava za održavanje i šema sistema koje posada i tehničko osoblje mogu koristiti za brzo otklanjanje otkaza. Tehničke informacije i podaci su informacije neophodne za rad, održavanje, popravku, podršku i odlaganje sistema tokom njegovog životnog vijeka. Cilj je identifikovati standarde koji će se koristiti za pružanje informacija i podataka kao što su:
 - Tehnička dokumentacija, uključujući interaktivne elektronske tehničke priručnike,
 - Ilustrovane liste i katalozi sastavnih dijelova,
 - Identifikacija i klasifikacija sistema,
 - Opis i rad sistema (opis sistema se može dati u obliku modela, ilustracija, izvornih kodova, tekstualnih opisa, između ostalog.),
 - Servisiranje i održavanje sistema,
 - Sigurnosna dokumentacija,
 - Dijagnostička podrška,
 - Potporni dijagram toka, sistem i šematski dijagram,
 - Softverska i hardverska dokumentacija,
 - Mrežna i komunikacijska dokumentacija,
 - Dokument o zahtjevima za održavanje i popravke na tvorničkom nivou.

Tehničke informacije i podaci mogu se pružiti putem različitih medija uključujući papir, grafiku, video i digitalno. Prava na podatke i isporuku podataka, kao i korištenje bilo kakvih vlasničkih podataka, treba da budu obrađeni kao dio ovog elementa i uključeni u cjelokupni plan programa.
6. Oprema za podršku i testiranje – Planovi za testiranje sistema radi osiguranja njegove pouzdanosti i funkcionalnosti, kao i alati i sistemi neophodni za dijagnostiku i testiranje. Primjeri opreme za podršku i testiranje su povezani krajnji predmeti za višestruku upotrebu, oprema za održavanje, alati, metrološka i oprema za kalibraciju.
7. Radna snaga i osoblje – Ovaj element uključuje identifikaciju, planiranje i podršku dostupnosti kvalifikovanog osoblja potrebnog za rad, održavanje i podršku sistema tokom njegovog životnog ciklusa.
8. Obuka i podrška obuci – Obuka i podrška obuci posade i tehničkog osoblja se sastoje od procesa, procedura, tehnika, uređaja i opreme za obuku, koji se koriste za obuku osoblja za rad, održavanje i podršku sistema, kako je utvrđeno analizom potreba za obukom. Analiza potreba za obukom može uzeti u obzir sljedeće: obuka za novu opremu, pomagala za obuku, uključujući simulatore, podrška pomagalima za obuku, vrsta obuke (npr. učionica, na daljinu, na poslu, itd...), okruženje za obuku.
9. Računarski resursi – podrška logističkim operacijama sa IT infrastrukturom. softverska podrška i okruženje za izvještavanje. Jedan od najefikasnijih načina za prikupljanje,

pregled i analizu ovih podataka je korištenje softverskog alata CMMS (engl. Computerized Maintenance Management System) za planiranje resursa. Ovaj alat može biti rudnik podataka koji povezuje tehničke informacije, finansijske informacije i informacije o nabavci. Prednosti softverskog alata mogu biti:

- Praćenje operativne dostupnosti tokom životnog vijeka opreme,
- Kreiranje i praćenje kriterijuma performansi za podršku opreme,
- Održavanje baze podataka za upravljanje konfiguracijom, nabavku i održavanje u realnom vremenu,
- Pružanje kapaciteta za procjenu prijedloga inženjerskih promjena, praćenje odobrenih promjena, uz uključivanje informacija o troškovima,
- Pružanje praćenja krajnje stavke i vidljivosti opreme,
- Praćenje i održavanje sličnosti sa inženjerskim aktivnostima koje podržava industrija.

10. Pouzdanost i održivost – Identifikacija ključnih rizika od otkaza i planiranje unapred za zamjenu kritičnih komponenti prije nego što dođe do otkaza. To podrazumijeva FMEA (engl. *Failure Mode and Effects Analysis*) ili RCM (engl. *Reliability Centered Maintenance*) analize.

Ove metode, alati i procedure imaju za cilj postizanje dugoročne operativne efikasnosti i održivosti sistema u vojnoj logistici.

4. DEFINISANJE ILS PRI NABAVCI OPV BRODOVA ZA CRNU GORU

Mornarica Vojske Crne Gore je, kao članica NATO-a, preduzela korake ka modernizaciji svojih kapaciteta kroz nabavku OPV ratnog patrolnog broda. Ovi brodovi su ključni za obavljanje misija obalske zaštite, nadzora teritorijalnih voda i patroliranje u Jadranskom moru. Modernizacija Mornarice Vojske Crne Gore usmjerena je na nabavku dva nova patrolna broda srednje klase, s ciljem povećanja operativnih sposobnosti za suočavanje sa savremenim bezbjednosnim izazovima. Ova nabavka, uz ostalu modernizaciju značajno će unaprijediti pomorsku svijest i sposobnost Mornarice da zaštiti nacionalne interese Crne Gore. Ovo će omogućiti Vojsci Crne Gore (VCG) da ispuni i nacionalne i NATO obaveze u pogledu ciljeva sposobnosti, posebno u patroliranju crnogorskom pomorskom zonom, kao i učešće u međunarodnim misijama širom Jadrana i centralnog Mediterana. [14]

Proces nabavke, započet 2019. godine kao dio Plana razvoja odbrane (2019-2028), uključivao je opsežnu komunikaciju sa različitim međunarodnim brodograditeljima, uključujući DEARSAN (Turska), DAMEN (Holandija), Elbit (Izrael) i KERSHIP (Francuska), između ostalih. Nakon detaljne procjene, KERSHIP patrolni brod OPV 60 i Damen Stan Patrol 5509 identifikovani su kao najpogodnije platforme za potrebe VCG. Nakon detaljnih razgovora, Ministarstvo odbrane je odlučilo da nastavi sa KERSHIP-om radi završnih pregovora. Ova nova plovila, u kombinaciji sa saradnjom sa drugim nacionalnim institucijama, unaprijediće pomorsku bezbjednost, zaštitu granica, operacije traganja i spašavanja i zaštitu životne sredine, ispunjavajući i potrebe nacionalne bezbjednosti Crne Gore i njene međunarodne obaveze.

Prema definisanim zahtjevima brod koji predstavlja rješenje za crnogorske potrebe je projekat OPV 60 dužine 58,2 metra koji je u ponudi brodogradilišta KERSHIP. Deplasman takvog broda je preko 550 tona. Maksimalna brzina je 21 čvor. Brodogradilište navodi da takav brod može da ostane na moru do 25 dana pri brzom krstarenju od 12 čvorova i da pređe 4.500 milja.

Prema planu odbrane, nivo ambicije Crne Gore je da jedan patrolni brod može ostati najmanje 80 dana godišnje na moru. U okviru učešća u zadacima NATO-a definisano je da jedan brod može da se pridruži misiji na Sredozemnom moru u trajanju od tri mjeseca u jednoj godini da sa jednim brodom učestvuje u najmanje dvije pomorske vježbe saveza. [15]



*Slika 2. model OPV 60 koji će kupiti Crna Gora
Izvor: OPV 60, <https://www.kership.com/en/vessels/opv-60>*

Prema dostupnim podacima, tokom pregovaranja zahtijevano je ispunjenje svih elementa ILS-a, sa kompletnom dokumentacijom i rezervnim dijelovima, i to više nego što redovno proizvođač nudi. Prilikom projektovanja broda poštovaće se evropski standardi za brodogradnju, a postignuto je da brod bude jednostavan za rukovanje i održavanje.[16] Modularni princip gradnje ovim brodovima daje veliku fleksibilnost i potencijal za buduće eventualne nadogradnje i opremanje dodatnim naoružanjem i opremom tokom očekivanog životnog vijeka plovila od 30+ godina. [17]

Dogovoren je garantni rok opreme u trajanju od dvije godine. Interesantno je da je ugovorena obaveza industrijskog dobavljača da obezbijedi isporuku relevantnih proizvoda opreme sa nomenklaturnim NATO brojem u skladu sa standardom STANAG 4177. Šta to znači? To znači da će se primjenjivati kodifikaciona klauzula NATO kodifikacionog sistema, koja obavezuje dobavljače da dostave sve neophodne informacije za kodifikovanje rezervnih dijelova. Za sve proizvode koji su već kodifikovani biće dostavljani kodifikacioni brojevi. Poznato je da se na taj način olakšava nabavka rezervnih dijelova u vojnim sistemima. [18]

Takođe je ugovorena obaveza industrijskog dobavljača da nastavi sa proizvodnjom rezervnih dijelova opreme za period od najmanje deset godina nakon isporuke. Ova stavka se odnosi na upravljanje zastarjelošću, što se sve više uvodi kao element ILS – standarda, jer je veoma važan segment savremenim upravljanjem životnog ciklusa mornaričke i vojne opreme.[19] Ovi brodovi, kao i sva vojna oprema, su skupi i namijenjeni su dugom vijeku trajanja, ali u stvari mnogi njihovi sastavni elementi mogu biti zamijenjeni čak i prije faze proizvodnje.[20] Upravljanje zastarjelošću odnosi se na proces identifikacije, praćenja i reagovanja na zastarevanje komponenti, tehnologija i sistema koji se koriste na ratnim brodovima. Zastarijevanje može nastati zbog tehnološkog napretka, nedostupnosti dijelova, promjene standarda i regulativa, kao i ekonomskih faktora kada zbog visokih troškova održavanje i podrška za zastarjele sisteme često postaju neisplativi.

5. ZAKLJUČAK

Integralna logistička podrška - ILS igra ključnu ulogu u uspješnoj nabavci i dugoročnoj upotrebi ratnih brodova. Primjena ILS-a osigurava da se svi aspekti, od tehničkog održavanja do obuke osoblja, sprovedu na efikasan način, uz optimizaciju resursa tokom cijelog životnog ciklusa broda. Nabavka patrolnih brodova OPV 60 predstavlja primjer implementacije Integralne logističke podrške, kao strateški korak naprijed u modernizaciji Mornarice Vojske Crne Gore, omogućavajući ispunjavanje nacionalnih i međunarodnih obaveza. Osiguranje održivosti primjenom NATO i MIL standarda za ILS, kao i dugoročnim logističkim aranžmanima garantuje da će brodovi ostati operativni i spremni da odgovore na savremene bezbjednosne izazove. Uvrštavanjem Kodifikacione klauzule u ugovor o nabavci omogućava se neometana primjena NATO kodifikacije, što dodatno olakšava pravovremenu nabavku odgovarajućih rezervnih dijelova. Upravljanje zastarjelošću tehnologije, kao bitan segment ILS-a, omogućava proaktivno planiranje zamjene i modernizacije sistema prije nego što postanu nedostupni zbog nedostatka dijelova usljed zastarijevanja ili promjena u tehnologiji. Time se osigurava da brodovi ostanu operativni i tehnološki relevantni tokom dugog perioda eksploatacije, Ovaj holistički pristup optimizuje resurse i smanjuje dugoročne troškove održavanja, garantujući da će Mornarica imati adekvatnu logističku podršku za svoje operativne zadatke.

6. REFERENCE

- [1] Kincaid, JD. (2024). *Vojna brodogradnja i modernizacija: strategije i izazovi*, Naval War College Review
- [2] OPV. (2024). Preuzeto sa Defence IQ: <https://www.defenceiq.com/glossary/offshore-patrol-vessel>
- [3] Ured za informacije američke mornarice, Pomorska moć (2018). *Budućnost površinskih brodova*. Preuzeto sa: <https://www.navy.mil>
- [4] Friedman, N. (2016). *Vodič Pomorskog instituta za svjetske sisteme pomorskog oružja*. Annapolis: Naval Institute Press.
- [5] Destroyers (2024). *DDG 1000*. Preuzeto sa Americas Navy: <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2391800/>
- [6] NAVSUP (2024). *Integrated Logistics Services*. Preuzeto sa: <https://www.navsupsup.navy.mil/Products-Services/Integrated-Logistics-Services/>
- [7] Leonardo (2024). *Integrated Logistics Support (ILS) for Naval Operations*. Preuzeto sa: <https://www.leonardodrs.com/what-we-do/products-and-services/integrated-logistics-support-ils-for-naval-operations/>
- [8] CSMI Technology Services (2024). *What Is Integrated Logistics Support*. Preuzeto sa: <https://csmi.com/what-is-integrated-logistics-support/>
- [9] SVL br. 25. (1996.). *Pravilnik o opremanju Vojske Jugoslavije naoružanjem i vojnom opremom u miru*. Službeni Vojni List, Beograd.
- [10] ALP-10 NATO Standard (2017). *Guidance On Integrated Logistics Support For Multinational Armament Programmes*, preuzeto sa: <https://www.scribd.com/document/446290048/ALP-10-EDC-V1-E-NATO-Logistics-Program-ILS-pdf>
- [11] OPNAVINST 4700.7M (2019). *Maintenance Policy For Navy Ships*. Preuzeto sa Department of the, Chief of Naval Operations: <chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwww.secnav.navy.mil%2Fdoni%2FDirectives%2F04000%2520Logistical%2520Support%2520and%2520Services%2F04-700%2520General%2520Maintenance%2520and%2520Construction%2520>
- [12] MIL STD 1369 (1971). *Integrated Logistics Support Program Requirements*, Preuzeto sa: <https://www.scribd.com/document/230673893/MIL-STD-1369>
- [13] NAVSUP PUB 548 (1998). *Integrated Logistic Support Supply Handbook*, Preuzeto sa: <https://www.scribd.com/doc/217360973/P548-Navy-ILS-Handbook>

- [14] Vlada Crne Gore (2024). *Informacija o potpisivanju Tehničkog aranžmana između Ministarstva odbrane Crne Gore i ministra odbrane Republike Francuske o nabavci dva patrolna broda od strane Crne Gore s Predlogom tehničkog aranžmana*. Preuzeto sa Vlada Crne Gore: <https://www.gov.me/dokumenta/1b76f7a7-d5fe-42d1-b0b6-cd71b747e031>
- [15] Dragan Krapović (2024). *Nabavka patrolnih brodova*. Preuzeto sa CDM Portal: <https://www.cdm.me/politika/poslanici-usvojili-predlog-o-nabavci-dva-patrolna-broda-iz-francuske/>
- [16] Kership (2024). *OPV 60 Offshore Patrol Vessel*. Preuzeto sa: <https://www.kership.com/en/vessels/opv-60>
- [17] Siša Luković. (2024, avgust 10). *Francuzi grade dva patrolna broda za 120 miliona*. Preuzeto 2024, avgust 10 sa: <https://www.vijesti.me/vijesti/drustvo/719419/francuzi-grade-dva-patrolna-broda-za-120-miliona>
- [18] Vlada Brazila (2024). *ACodP-I*. Preuzeto sa: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gov.br/caslode/pt-br/arquivos/central-de-conteudo/ACodP1_EJul2022.pdf
- [19] Vlada Crne Gore (2024). *Tehnički aranžman između Ministarstva odbrane Crne Gore i ministra odbrane Republike Francuske o nabavci dva patrolna broda od strane Crne Gore*. Preuzeto sa: <https://www.gov.me/dokumenta/1b76f7a7-d5fe-42d1-b0b6-cd71b747e031>
- [20] Rowse, T. (2024). *Obsolescence Management in the Military*. Preuzeto sa ROWSE BLOG: <https://www.rowse.co.uk/blog/post/obsolescence-management-in-the-military>

THE IMPORTANCE OF MAINTENANCE OPERATIONS IN NATURAL GAS DISTRIBUTION SYSTEMS AND ANALYSIS OF MAINTENANCE PROGRAM FOR ŞANLIURFA PROVINCE

Hüsametdin Bulut, Prof. Dr.
Harran University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering
Osmanbey Campus, Şanlıurfa, Türkiye

Muhammed Nezir Ural, Mechanical Engineer (MSc)
Aksa Natural Gas Distribution Inc.
Akpiyar Mahallesi Balıkayağı Bulvarı, Karaköprü, Şanlıurfa, Türkiye

ABSTRACT

Maintenance is of utmost importance in the continuous and safe supply of natural gas to settlements via pipeline. In natural gas distribution systems, maintenance operations must be carried out in order to minimize gas leaks and explosion risk, reduce energy losses and save energy, provide uninterrupted service and comply with the obligations under the legislation. In this study, the importance of maintenance of the systems on the natural gas distribution line and the control and maintenance stages applied are examined. The maintenance and repair costs and working hours of the last five years for the natural gas distribution line in Şanlıurfa province were analyzed. It was observed that the increase in maintenance costs and durations for Şanlıurfa is related to the aging and wear and tear of the natural gas distribution infrastructure and equipment over time, as well as the pandemic and global economic crises. Inspection and maintenance works on natural gas distribution lines have been found to increase safety and contribute to preventing potential failures by increasing the efficiency of the system. In order to ensure continuous natural gas supply to end consumers, it has been determined that the creation of annual maintenance programs and their traceability in digital environment is extremely important. In addition, it has been determined that keeping the necessary records and creating operation and maintenance manuals to manage operation and maintenance operations in natural gas supply are important issues.

Keywords: Natural gas distribution network, operation, maintenance, Şanlıurfa.

1. INTRODUCTION

Natural gas is a non-renewable energy source that plays a critical role in meeting the energy needs of societies and stands out with its environmentally friendly features. The safe, uninterrupted and continuous delivery of this energy source to the end consumer depends on the effective operation of natural gas distribution lines. However, the safe and efficient operation of these lines is not only based on the quality during the construction phase; regular and meticulous maintenance operations are also of great importance. Over time, these lines may be subject to wear and deterioration due to environmental factors, mechanical stresses

and intensity of use. Therefore, regular maintenance works play a critical role in preventing potential hazards and ensuring energy supply security.

Within the scope of the license, natural gas distribution companies are under certain legal and technical obligations to ensure the safety and continuity of distribution lines. These obligations include regular maintenance and inspection work, effective use of gas leakage detection systems, and the creation and periodic review of emergency response plans. In addition, operating the network in accordance with current legislation and safety standards, minimizing environmental impacts and ensuring user safety are among the primary responsibilities of licensed companies. These obligations are of great importance in terms of protecting energy supply security and public safety.

The main threats to natural gas distribution lines include damage to pipelines during construction activities, underground leaks, and damage caused by rodents. In addition, natural disasters such as earthquakes and floods can cause cracks, breaks, displacements, and damage to connection points in underground pipelines, leading to energy outages and gas leaks. Gas leaks and leaks grow over time, reducing energy efficiency and increasing security risks. Regular inspections and the use of leak detection technologies are of great importance against these risks. In this study, the maintenance stages in natural gas supply to residential areas were analyzed and the operation and maintenance in natural gas supply for Şanlıurfa province were explained with sample applications.

2. NATURAL GAS SUPPLY

Maintenance and operational processes are of critical importance in the distribution process of natural gas from source to consumer. Because natural gas transportation and distribution systems are lines where gas is transported under pressure and require high security, maintenance work carried out in this process both increases security and ensures the efficiency of the system. Figure 1 shows a schematic representation of natural gas supply from source to end consumer via pipelines.

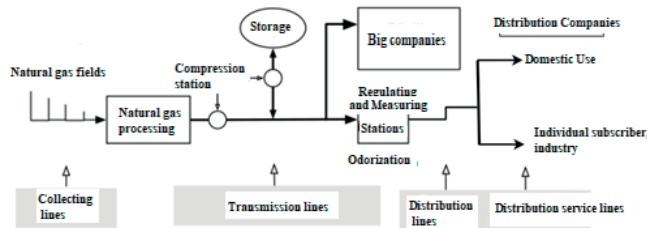


Figure 1. Natural gas lines from source to end consumer

2.1. . Natural Gas Distribution Line

Natural gas distribution lines refer to the line that the gas taken from the City Entry Station, which is the delivery point of the national gas supplier BOTAŞ, follows until it reaches the end user within the city. This line constitutes the last section of the natural gas transportation system and ensures that the gas is distributed safely and efficiently from industrial facilities to homes. Distribution lines vary according to the different needs of the infrastructure and consist of steel (ST), Polyethylene (PE) and service pipelines at a certain pressure level [1].

2.2. . Pressure Regulating and Metering Stations

Natural gas needs to be stored, measured and reduced to the appropriate pressure in order to be distributed safely to industry and residences. For this purpose, there are Regulating and

Metering Stations (RMS) on natural gas distribution lines. RMS stations are classified as Type A, Type B and Type C according to the level of gas pressure reduction [2]. Type A stations are systems operating under high pressure and include heaters. These stations also include ball valves, regulators, filters, manometers, thermometers, gas safety valves and measurement meters. Type B and C stations are designed for lower pressure needs and include some of these components [3].

3. MAINTENANCE AND SAFETY IN DISTRIBUTION LINES

Regular maintenance on natural gas distribution lines minimizes security risks and ensures uninterrupted service. Valves are located at strategic points to direct gas flow along distribution lines and to provide gas cut-off in emergency situations. Cathodic protection is a technique used to protect metal pipelines and other underground structures from corrosion. Regular cathodic protection measurements should be made to prevent oxidation and corrosion of metal pipes in natural gas systems. The cathodic protection system is checked regularly in measurement boxes [4].

In order to ensure traceability of natural gas lines and on-site determination of maintenance needs, line marker poles have been placed indicating the route of the line. These poles indicate the underground location of the line and provide accurate information to maintenance teams.

By monitoring the natural gas distribution pipeline with digital monitoring and analysis systems, the performance of the system can be tracked and maintenance needs can be proactively identified. In this way, faults on the distribution lines can be detected instantly and interruptions can be prevented by rapid intervention [5]. Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems are an important part of digitalization in the natural gas sector. The SCADA system plays an important role in fault prediction, energy optimization and risk management with remote control, automation and data analysis. In this way, operational costs are reduced, energy efficiency is increased and systems become more secure. Natural gas distribution companies monitor and control the gas distribution line instantly with the SCADA system. Anomalies occurring on the line are sent to the control centre as a SCADA warning via SMS and email.

3.1. Maintenance of RMS/A Type Stations

A- Type Gas Pressure Regulating and Metering Station – RMS/A is an important part that plays a key role in regulating gas pressure in gas supply and ensuring its safe distribution. Regular maintenance of these stations is vital for the efficiency and safety of the operation. During maintenance processes, operations such as preventing gas leakage risks, maintaining the sensitivity of regulators and measuring devices, checking valves and cleaning filtration systems are meticulously carried out. Thus, the continuity and safety of natural gas are guaranteed, and possible interruptions and risks are minimized. Şanlıurfa RMS/A OSB station is shown in Figure 2.

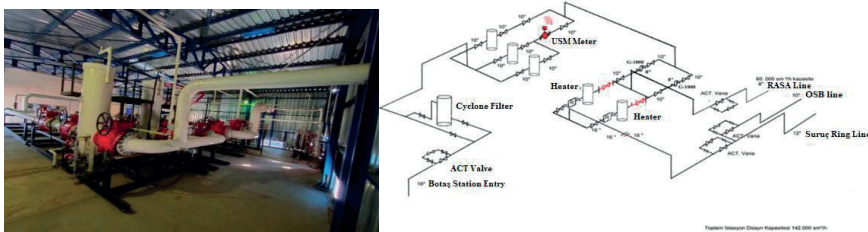


Figure 2. Şanlıurfa RMS/A OSB Station

In the RMS/A Type station, simple but critical operations such as filters, gas leakage, environmental lighting and area cleaning are performed on a monthly basis. Main equipment such as regulators, safety valves and meters are checked at longer intervals of 3 or 6 months. General maintenance of the system, such as complete maintenance of regulators, meter calibration and generator maintenance, are carried out annually. The maintenance and control operations carried out in the RMS/A Type station are given below. Figure 3 shows pictures of some maintenance and controls. As can be seen from the figures, occupational health and safety rules must be followed.

1. Filter and Equipment Control: The cleaning and functionality of filters is a critical process in RMS/A stations. During gas flow, clogging or contamination of the filter can cause disruptions in natural gas flow. This control process is usually carried out monthly. During the control of filters, gas pressure levels and flow rates are carefully examined.
2. Regulator and Equipment Control: Regulators are one of the most important components of the station and reduce the pressure of the gas and transfer it to the system. Regulator maintenance is carried out every 6 months and the regulators are tested to see if they adjust the gas pressure correctly. At the same time, the opening and closing mechanisms of the regulator valves are checked.
3. Safety and Relief Valve Control. These valves are activated in case of excessive pressure increase and ensure the safety of the system. Regular control of safety and relief valves is an important precaution especially in cases where pressure problems occur. Valves are checked every 6 months and tested for mechanical free operation.
4. Meter and Equipment Control: Meters are important equipment that ensures accurate measurement of natural gas. Checking whether the meters are working properly is critical for accurate calculation of gas quantity. Maintenance of meters is done annually and the measurement accuracy of the meters is tested. At the same time, the mechanical and electrical equipment on the meter is reviewed.
- 5 .. Gas Leakage Control. Gas leaks are one of the biggest risk factors in natural gas systems. Therefore, leakage control should be carried out at regular intervals in RMS/A stations. During leakage control, all pipelines, valves and connection points are scanned with gas detectors. When a leak is detected, immediate intervention is carried out.
6. Automation and Communication System Control: Automation and communication systems in RMS/A stations enable remote monitoring and control of the stations. Periodic maintenance of these systems is of vital importance, especially in emergency situations, for the activation of automatic systems. UPS (Uninterruptible Power Supply) system maintenance is also included in these processes. Battery levels, energy backup capacities and connection checks of UPS systems are performed.



Figure 3. Some Maintenance and Control Procedures

3.2. Steel Valve Inspection and Maintenance

It helps protect valves, connection points and other equipment that are important for the safe transportation and distribution of natural gas. Manhole covers are resistant to external factors

(such as weather conditions, vehicle traffic). Before the manhole cover is opened, gas leakage is checked (Figure 4) and the ventilation hole is tested. In addition, the manhole cover is physically checked by looking at the surrounding concrete, cleanliness, water availability and paint coating conditions.

1. Valve Nameplate Control: It is checked whether the plate is in place and the information on it is legible.
2. Gas Leakage Control: Detectors are used to check whether there are any leaks in the valve discharge and lubrication pipes.
3. Check the Drain and Lubrication Valve: Ensure that the valves are in the closed position. Check the paint, coating materials and signs of corrosion on the valve.
4. Valve Position Control: It is examined whether the valve is in the correct position. The operation of the body discharge valve is tested (Figure 5).
5. Reducer Control: The reducer cover, body and rotation shaft box are visually inspected for cracks or breaks. The reducer is tested by quarter turning.

Before entering the valve room, gas leaks are checked. The paint coating of the valve and connection group is checked for damage. The valve's sealing bearings are cleaned and lubricated. The reducer is cleaned and lubricated with grease. These maintenance steps should be performed regularly to ensure the effective operation of steel valves and the safety of the system. These operations are carried out by field personnel such as maintenance engineers, technicians and team leaders. Valves are checked every 6 months, while comprehensive maintenance is applied annually.



Figure 4. Manhole Cover Leakage Test



Figure 5. Embedded Valve Control

3.3. RMS/B (Regional Regulator) /RMS/ C (Customer Station) Control and Maintenance Processes

The stations that reduce the 20 bar pressure natural gas in the steel line to 4 bar and deliver it to the polyethylene distribution line in order to meet the gas demand of a certain region are called RMS/B (Regional Regulator). Inspection and maintenance procedures are carried out to regulate gas pressure, control gas flow and maintain the functionality of various equipment at the Regional Regulator and customer stations. The following maintenance and inspections are carried out:

1. Embedded Valve Control: The solidity of the valve cover, its surroundings and the ground structure is checked. Gas leakage is checked from the sleeve with a measuring device.
2. General Valve Control: Valves that must be closed and open are checked and their functionality is tested.
3. Cabin Checks: The external appearance of the cabin, paint, hinges, wire fences and bases are checked. Before opening the cabin, the ventilation ducts are checked for leaks. If a leak is detected, the cabin is carefully opened and the leak is pinpointed.
4. Pressure Controls: Inlet and outlet pressures are measured and processed into the system.
5. Differential Manometer Check: The differential pressure is checked.

6. Filter and Equipment Maintenance: Filters are checked for cleanliness and functionality. If there is any clogging in the filters, they are replaced.
7. Meter and Equipment Maintenance: Meters and connected equipment are checked for functionality and maintained as necessary.
8. Regulator and Equipment Maintenance: Regulators are periodically maintained to maintain the accuracy of pressure settings.
9. Safety and Relief Valve Maintenance: Safety valves are checked once a month and when faulty valves are detected, they are replaced after taking environmental safety into account.
10. Steel Valve Maintenance: Steel valves are periodically inspected and maintained. Necessary precautions are taken against corrosion by checking paint and coating.
11. Insulation Gasket Control: Physical control and electrical leakage controls are performed to ensure that the insulation gasket is protected from high electric current. Short circuit measurements are performed with a multimeter.
12. Polyethylene Valve Control and Maintenance: Polyethylene (PE) valves are one of the critical components of natural gas lines. Below are the inspection and maintenance tasks of PE valves:
 13. Gas Leakage Control: Before opening the valve cover, a gas leakage check is made from the ventilation holes of the cover. A gas detection device is used for this process and the suction hose of the device is immersed at least 5 cm from the cover hole to measure the gas. If a leak is detected, the necessary interventions are made. If the leak cannot be eliminated, the valve may need to be replaced with a new one.
 14. Valve Cover and Level Control: The valve cover (side -hole cover) must be at the same level as the surface on which it is located. In areas open to vehicle traffic, the cover must be 1 cm above the ground and 2 cm above the ground in other areas. If the cover cover pipe is broken, slipped or damaged, it is repaired and the interior is cleaned.
 15. Valve Maneuver Controls: Valve opening and closing operations are performed at certain rates (20%) to check whether the valve shafts are working properly. Problems detected during this process are recorded in the maintenance list. Valve opening and closing operations should be performed at least once a year, especially in the summer months.
 16. Cleanliness Check: If mud, water deposits or other foreign substances have accumulated in the inner parts of the valves, these areas are cleaned. If there are cracks or breaks in the cover or lid, they are replaced. If cleaning is not done, the valve may not close completely or may not open completely when closed. In this case, there may be a risk of gas leakage in the valve core.
 17. Nameplate Control: The valve's nameplate and the information on it are checked.
 18. Surrounding Concrete and Frame Condition: The concrete and frame condition around the valve is checked. Cover pins and cotter pins (elements that secure the nuts) are checked, cleaned and adjusted if necessary.

3.4. End of Line Pressure and Odour Measurement

In natural gas distribution networks, the end-of-line pressure measurement is performed regularly before the gas reaches the end consumer to ensure that the gas is delivered safely and efficiently. The measured and recorded pressure values are used to check whether the pressure is in the appropriate range in the network. Typically, the end pressure in natural gas distribution networks should be between 21 mbar and 25 mbar, but these values may vary depending on the system and region used. If the measured pressure values are below or above normal, it may be a sign that there is a problem in the line. A drop in pressure usually indicates a gas leak, a pipeline blockage, or a problem with the regulators. In such a case, the line is checked in detail by the technical team and the necessary corrective measures are taken.

End-of-line odour measurement is critical for the safe use of gas in natural gas networks. Natural gas is naturally odourless and is added with a special chemical, usually THT (Tetra Hydro Theophene) is added. In this way, gas leaks can be detected by smelling. End-of-line odour measurement is done to ensure that the gas is odorized at a sufficient level. End-of-line odour measurement is done at the point where the natural gas reaches the end user or at points near the end of the network. This is usually the customer station or the regional regulator outlet. The odour level in the network should be equal at all points in the gas distribution line; therefore, measurements can be made at different points. If the measured odour level is low, there may be a problem with the odorization system of the gas. In this case, adjustments may need to be made to the odorized unit. The odour level of the gas can be increased by adding odorants.

4. COST OF MAINTENANCE AND REPAIR PROCESSES IN NATURAL GAS DISTRIBUTION ENTERPRISES: ŞANLIURFA CASE

Maintenance and repair processes can create a significant cost for natural gas utilities, which ensure that the infrastructure remains operational at all times and guarantee uninterrupted service to consumers. Figure 6 shows the ratio of maintenance and repair costs to total operating expenses in Şanlıurfa province gas distribution company by years [6]. Figure 6 shows an increasing trend in the share of maintenance and repair in total operating expenses by year. The increase in the maintenance and repair rate observed between 2020 and 2024 has emerged as a result of many factors such as aging of the infrastructure, increasing labour costs, inflation and energy price increases, and new subscriptions and network expansion projects. Reducing these costs in natural gas companies can be possible with strategies such as effective maintenance planning, technological investments, and energy efficiency. However, if the increase in inflation and input costs continues, natural gas companies need to focus on long-term planning and optimization strategies in order to balance these costs. The increase in costs seen in 2021 and later is due to ongoing supply chain problems, increases in energy and raw material prices, and production costs, despite the recovery from the pandemic effects worldwide.

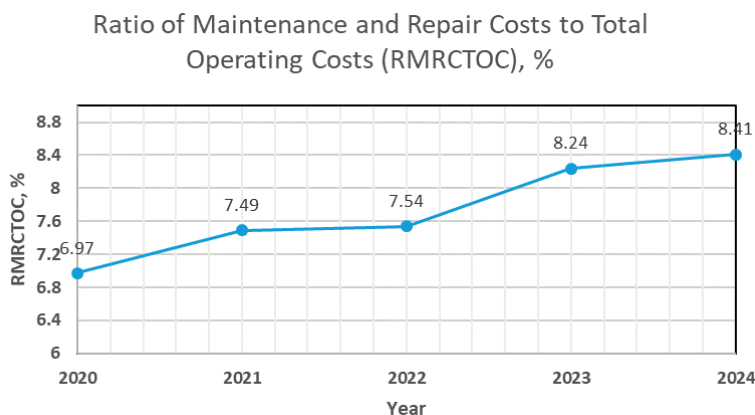


Figure 6. Change in the ratio of maintenance and repair costs to total operating expenses in Şanlıurfa province gas distribution company over the years.

Figure 7 shows the change in natural gas maintenance and repair times over the years [6]. The increase in maintenance hours every year indicates that the equipment in the network is

aging or the network is being expanded and therefore requires more maintenance. As infrastructure systems wear out over time, maintenance requirements increase accordingly. In addition, this increase also shows that the growth of the company, commissioning of more equipment or completion of new projects require more maintenance time. Maintenance hours per person have generally remained stable. In general, despite the increase in maintenance needs and jobs over the years, the fact that the time per person has not increased too much in the graph shows that the number of personnel has been increased in balance with the maintenance process or that efficiency has been achieved in maintenance processes. Figure 7 shows that although maintenance activities have generally increased, the workload per person has been kept under control by optimizing the workforce. This situation reveals the importance of planning and optimization in maintenance processes.

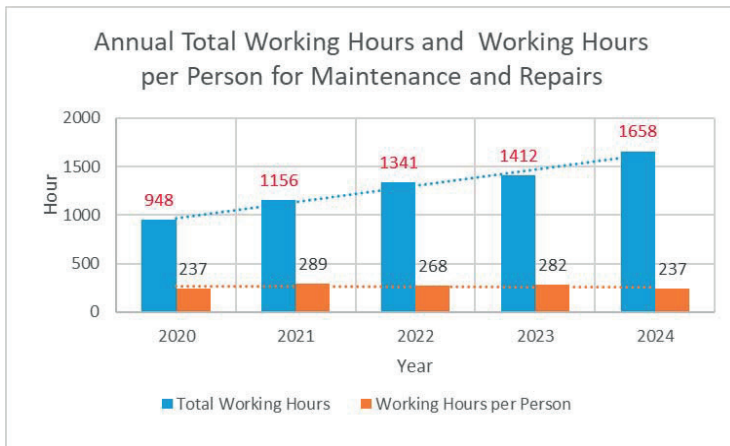


Figure 7. Change in Natural Gas Maintenance and Repair Times over the years

5. PREDICTIVE MAINTENANCE CONTROL

Table 1 shows the predictive maintenance checks and periods of equipment and systems in natural gas distribution lines [6]. The check period of each equipment is determined according to its importance in operation. For example, systems that require regular maintenance such as filters and meters are checked monthly, while less critical equipment such as steel valves and electrical installations are checked at longer intervals. Planned periods allow maintenance teams to use their workforce efficiently and help prevent potential failures. Thus, the safety and operational efficiency of natural gas systems are maintained.

6. PERIODIC PLANNED MAINTENANCE

Maintenance processes and estimated times for systems and equipment in natural gas distribution lines are given in Table 2 [6]. Maintenance is performed every 1, 2, 3 or 5 years depending on the importance of the equipment. For example, critical equipment such as filters, regulators, meters and valves are checked at more frequent intervals, while maintenance of other systems is performed at longer intervals. Maintenance times vary according to the complexity of the process and generally range from 60 to 360 minutes per piece of equipment.

Table 1. Predictive maintenance controls and durations in natural gas distribution lines

Process Description	Control Period (Month)				Planned Estimated Implementation Time (min /man)
	1	3	6	12	
Filter and Equipment Control	X				30
Control of Meters and Equipment	X				30
Regulator and Equipment Control		X			30
Safety and Relief Valve Control		X			30
Inlet and Outlet Actuated Valve Control		X			30
Steel Valve Control			X		30
Heating System Control	X				120
Gas and Smoke Detectors Control			X		30
Station Area General Environmental Control	X				30
Automation/Communication/UPS System Control			X		30
Electrical Installation Control				X	30
Gas Chromatograph Unit Control		X			240
Gas Leak Control	X				30
Generator Control		X			120
Control Switches Control			X		30
Insulation Gasket Control			X		30
Cathodic Protection Transformer/Rectifier/Drainage Unit			X		30
Natural Gas Stations Grounding Measurement Control				X	20
Transformer Facility Control				X	20
Odor Injection Unit Control	X				240

Table 2. Periodic Planned Maintenance and Durations

Process Description	Maintenance Period (Year)				Planned Estimated Implementation Time (min /man)
	1	2	3	5	
Filter and Equipment Maintenance	X				120
Maintenance of Meters and Equipment				X	360
Regulator and Equipment Maintenance		X			240
Safety and Relief Valve Maintenance		X			60
Inlet and Outlet Actuated Valve Maintenance		X			60
Steel Valve Maintenance		X			120
Heating System Maintenance	X				180
Station Piping, Instrumentation and Chassis Paint			X		360
Automation/Communication/UPS System	X				60
Cathodic Protection	X				60
Gas Chromatograph Unit Maintenance	X				60
Gas, Flame and Smoke Detector Maintenance		X			60
Generator Maintenance	X				240
Air Conditioning and Combi Boiler Maintenance	X				60
Control Switch Maintenance	X				60
Fragrance Injection Unit Maintenance	X				360
Transformer Facility Maintenance		X			60

7. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

This study has shown that maintenance and control activities carried out in natural gas distribution lines are very important in terms of increasing safety and sustainability of system efficiency. Regular control and maintenance of natural gas distribution lines minimizes gas leaks and explosion risks, ensuring energy supply security. Reducing safety risks in lines where natural gas is transported under high pressure is not only a legal obligation but also a vital importance in terms of public safety.

Maintenance operations carried out on different components of distribution lines such as pipelines, regional regulators and customer stations should be supported by technical

operations such as gas leak detection, keeping cathodic protection systems active and regular checks of regulators. Especially in regions exposed to natural disasters such as Şanlıurfa, the security of the system should be increased by increasing the durability of the infrastructure and establishing emergency response plans. Regular maintenance operations carried out within this scope contribute to reducing costs by increasing energy efficiency and also minimizing environmental risks.

In the study, it was observed that with the use of digital monitoring systems (e.g. SCADA), maintenance needs can be determined proactively and possible faults can be detected at an early stage, thus accelerating the intervention process. This digitalization process has enabled maintenance programs to be carried out more efficiently and ensured the effective use of the workforce. Data analysis and remote monitoring opportunities provided by digitalization offer great advantages, especially for distribution networks spread over large geographical areas. Each maintenance process must be recorded and tracked through systems such as SAP PM (Plant Maintenance) Maintenance and Repair module.

The study found that the increase in maintenance costs and durations for Şanlıurfa is related to the aging and wear of the natural gas distribution infrastructure and equipment, as well as the pandemic and global economic crises. The increases in the costs of maintenance activities reveal the need for large-scale renewal projects in the system and the importance of continuously modernizing the infrastructure. It was concluded that in order for the network to operate safely and efficiently in the long term, periodic control and maintenance activities should be carried out regularly and this process should be supported by digital monitoring.

In summary, this study has revealed that maintenance operations in natural gas distribution lines are critical not only in ensuring safety but also in increasing energy savings and system efficiency. In particular, the integration of digitalization and maintenance management processes is of strategic importance in ensuring the sustainability of the energy infrastructure. As in the Şanlıurfa example, making natural gas distribution systems traceable on digital platforms is one of the best practices in terms of preventing failures and optimizing maintenance processes.

REFERENCES

- [1] Şahingöz, D. (2016). İstanbul Applied Gas and Energy Technologies Research Engineering Industry and Trade Inc., *UGATEM Publication No: 39*, <https://www.ugetam.com.tr>, (In Turkish).
- [2] Yılmaz, N.F., Demir, Y. (2006), *Natural Gas Pressure Reducing and Metering Stations*, Plumbing Engineering Journal (Tesisat Mühendisliği Dergisi), Vol.0, No.93, pp. 20-28. (In Turkish).
- [3] Gazbir, Publication Commisison, *Natural Gas City Entry Station (RMS-A) Operation and Maintenance Guide. GAZMER Publication No:11*, <https://www.gazmer.com.tr>, (In Turkish).
- [4] Gazmer, *Cathodic Protection*. Natural Gas Education and Technology Center, <https://www.gazmer.com.tr>, (In Turkish).
- [5] EPDK, (2021), Energy Market Regulatory Authority (EMRA), *Türkiye Natural Gas Market Annual Sector Report*, EPDK Publication, <https://www.epdk.gov.tr>, (In Turkish).
- [6] Şanlıurfa Aksa Doğalgaz Dağıtım A.Ş., <https://www.aksadogalgaz.com.tr>, (In Turkish).

8. Konferencija „ODRŽAVANJE 2024“
Zenica, Bosna i Hercegovina, 13 - 14. novembar 2024.

SEKCIJA 1
SESSION 1

RELIABILITY AND MAINTENANCE OF HISTORICAL BUILDINGS AND RESTORATION PROCESSES

Said Dusak, Dr.
Istanbul Governorship, Investment Monitoring and Coordination Presidency
Istanbul, Türkiye

ABSTRACT

Historical buildings are part of the cultural heritage of all humanity, and it is essential that we preserve and pass them on to future generations. These structures are subjected to various external conditions, such as rain, snow, wind, and natural disasters like landslides, earthquakes, and storms, which can lead to degradation and deterioration over time. To ensure the longevity and structural integrity of historical buildings, it is crucial to preserve, maintain, retrofit, and restore them while respecting their cultural significance. Restoration serves as a vital process to maintain and enhance the reliability of historical buildings. This paper focuses on suitable materials and techniques for restoring damaged and deteriorated historical structures, with emphasis on the maintenance, repair, and reinforcement procedures for buildings in Istanbul.

Keywords: Restoration, Reliability, Maintenance

1. INTRODUCTION

Historical buildings are essential representations of cultural heritage, providing a window into the past and reflecting the architectural, social, and technological advancements of the time they were constructed. They play a crucial role in shaping national identity and are often regarded as symbols of cultural continuity. As Feilden states [1], “the conservation of historic buildings is a cultural imperative, ensuring that future generations can witness the craftsmanship and architectural ingenuity of their ancestors.” However, as these buildings age, they face numerous challenges that can compromise their structural integrity, aesthetic value, and cultural significance. These challenges are heightened by environmental conditions, material vulnerabilities, and human activities, all of which contribute to the gradual degradation of historical structures.

Türkiye, with its rich historical and cultural heritage, is home to numerous historical buildings that reflect its unique position as a crossroads of civilizations. However, these buildings are vulnerable to degradation over time, largely due to environmental factors such as pollution, humidity, and the high seismic risk in regions like Istanbul. Natural factors, particularly earthquakes, pose a significant threat to the structural integrity of historical buildings. For instance, Türkiye is located on active seismic fault lines, making earthquakes a frequent and dangerous occurrence. Historical buildings, which were not built according to modern engineering standards, are particularly susceptible to earthquake damage[2]. A study highlights the vulnerability of historical buildings in Istanbul, noting that the majority of

these structures suffer from inadequate maintenance and seismic retrofitting, making them more likely to collapse during significant seismic events[3]. Another work also emphasizes the importance of assessing the seismic performance of historical buildings and implementing multi-level restoration techniques that consider the original construction methods[4]. In addition to seismic activity, the adverse effects of environmental pollution are also critical factors in the deterioration of historical buildings. According to a research, pollutants such as sulfur dioxide and nitrogen oxides contribute to the chemical weathering of building materials, particularly stone and metal, which are commonly used in historical structures. In an study the authors emphasize that “the corrosion of building materials caused by atmospheric pollutants accelerates the deterioration of historical monuments, threatening their long-term preservation” [5]. Moreover, improper restoration techniques, often carried out without sufficient understanding of the building’s original construction materials and methods, can lead to further damage. According to another study[6], “many restoration efforts in Türkiye have been compromised by the use of modern materials that are incompatible with the original structures, leading to long-term deterioration rather than preservation.”

Given these factors, this paper aims to explore the methods and materials suitable for restoring historical buildings. This study will delve into the causes of degradation in historical buildings, examine the different types of deterioration that occur in building materials, and propose effective strategies for restoration and long-term preservation. Istanbul’s seismic activity and environmental conditions present specific challenges, but with appropriate maintenance and restoration techniques, it is possible to protect these invaluable structures for future generations.

2. DETERIORATION IN HISTORICAL BUILDINGS

Historical structures, having endured for centuries, often experience various forms of deterioration that threaten their stability, function, and appearance. The understanding of these processes is critical for successful restoration, preservation, and maintenance. Several environmental and human-induced factors contribute to the degradation of historical buildings, including weather, pollution, biological activity, and seismic activity. In Figure 1, a wooden structural element damaged by moisture and insects is shown, while Figure 2 depicts a structure damaged by an earthquake.



Figure 1. Moisture and insect-damaged wooden beam.



Figure 2. Earthquake-damaged structure.

3. TYPES OF DETERIORATION

Each material used in historical buildings reacts differently to environmental conditions and time. The most common materials—stone, wood, lead, iron, and brick—exhibit various forms of degradation that require distinct approaches for restoration.

3.1. Deterioration in Stones

Stone has been a fundamental material in historical buildings due to its durability and strength. However, even stone is subject to various forms of decay, particularly in environments with significant exposure to moisture, pollution, and biological growth. Physical weathering, caused by freeze-thaw cycles, is one of the most common mechanisms of stone decay. When water infiltrates stone surfaces and freezes, it expands, causing microfractures that lead to gradual disintegration over time [7]. Chemical weathering is another significant concern, especially in urban areas with high levels of air pollution. Acid rain, caused by sulfur dioxide and nitrogen oxides from industrial emissions, accelerates the deterioration of calcareous stones like limestone and marble, which are common in historical buildings in Istanbul [8]. This form of weathering alters the chemical structure of the stone, leading to surface loss, discoloration, and structural weakening. In Figures 3 and 4, material deterioration in a stone minaret due to the effects of earthquakes, wind, rain, freezing, and thawing can be seen, and Figure 5 shows the minaret after restoration.

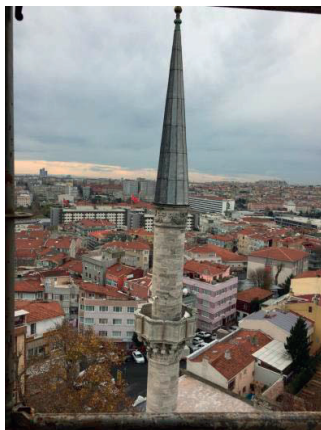


Figure 3,4. Deterioration of Stone.

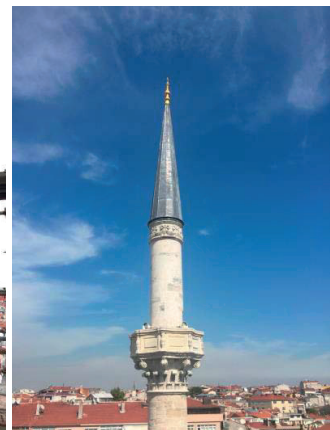


Figure 5. After restoration.

3.2. Deterioration in Wood

Wood is commonly used in historical buildings, particularly for structural components, flooring, and decorative elements. However, wood is highly susceptible to biological decay caused by fungal growth and insect infestations. Fungal decay, such as dry rot and wet rot, occurs when moisture infiltrates wooden elements, providing an ideal environment for fungi that feed on cellulose, breaking down the structure of the wood [9].

Insect damage is another common issue, with wood-boring insects such as termites and beetles capable of causing severe structural damage over time. Infestations often go unnoticed until significant weakening has occurred, necessitating thorough inspections and preventive treatments. The combination of moisture control, pest management, and protective coatings is essential for preserving wooden elements in historical buildings. Figure 6 shows

the deterioration of a wooden building facade, and in Figure 7, the deterioration of a structure made of a mixture of wood and earth caused by weather conditions is observed.



Figure 6. Deterioration of wood.



Figure 7. Deterioration of plaster and wood.

3.3. Deterioration in Lead

Lead has historically been used in roofing in historical buildings due to its durability and malleability. However, lead is vulnerable to corrosion in polluted environments, especially when exposed to acidic rain and industrial pollutants [10]. Lead corrosion can result in the thinning of material, leaks, and eventual failure of structural elements. The presence of lead in historical buildings also presents environmental and health concerns, requiring careful handling during restoration to prevent contamination.

In addition to external corrosion, lead's malleable nature means it can warp or deform under mechanical stress or thermal expansion, necessitating regular maintenance to ensure its continued functionality in roofing. In Figure 8, the deterioration of the lead and stone material of a minaret finial is visible, and in Figure 9, the renovated state of the lead covering on the domes of a madrasa building is shown.

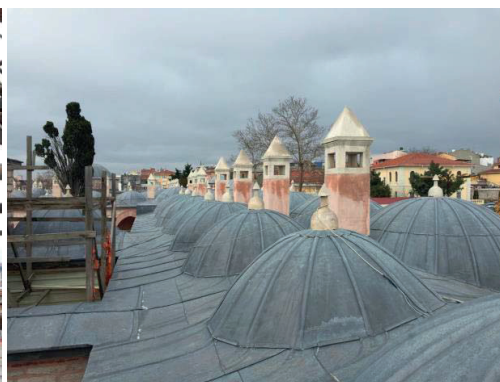


Figure 8. Deterioration of lead covering and stone. Figure 9. Restored lead covering.

3.4. Deterioration in Iron

Iron and steel are commonly used in both structural and decorative elements of historical buildings. However, corrosion is a major issue for these materials when they are exposed to moisture and oxygen, particularly in environments with high humidity or saline air, such as coastal cities like Istanbul. Rusting causes the iron to expand, which can lead to cracking in surrounding stone or masonry, a process known as rust jacking. The internal corrosion of iron used for structural reinforcement can be particularly damaging, as it often remains hidden until significant damage has occurred. As a result, regular inspection and maintenance are crucial to identifying and addressing corrosion early. Treatments such as protective coatings and the use of non-corrosive alloys are often employed in the restoration of historical buildings to mitigate the effects of corrosion[11]. In Figure 10, the repaired and protection-painted condition of an iron tension rod element that was damaged due to corrosion is seen.

3.5. Deterioration in Bricks

Bricks, widely used in Ottoman-era buildings in Istanbul, are vulnerable to several forms of deterioration, particularly frost damage and salt crystallization. Frost damage occurs when moisture trapped within the porous structure of bricks freezes and expands, causing cracks and spalling over time. This is exacerbated in climates where temperatures fluctuate above and below freezing. Salt crystallization is another major issue, particularly in coastal or polluted urban areas. When water containing dissolved salts penetrates the brick, it evaporates, leaving behind salt crystals that expand and exert pressure on the brick's internal structure, leading to cracking and surface loss.



Figure 10. Repaired iron deterioration.



Figure 11. Brick deterioration.

4. CAUSES OF DETERIORATION

The factors contributing to the degradation of historical buildings are multifaceted and can be broadly categorized into environmental factors, human-induced factors, and natural disasters. Understanding these causes is critical for the development of effective restoration strategies that can prolong the lifespan of historical buildings and preserve their cultural significance.

4.1. Environmental Factors

Moisture is one of the primary causes of deterioration in historical buildings, as it contributes to the decay of almost all building materials. Whether in the form of rain, humidity, or

groundwater infiltration, moisture accelerates biological decay, chemical reactions, and physical weathering[12]. In humid climates, high moisture levels exacerbate the degradation of materials such as wood, stone, and brick. Additionally, air pollution plays a significant role in accelerating deterioration. Urban areas, particularly those with heavy industrial activity, are often exposed to high levels of pollutants such as sulfur dioxide, nitrogen oxides, and particulate matter, which contribute to the acidification of rainwater. Acid rain accelerates the chemical weathering of building materials, especially calcareous stones like limestone and marble[5,13]. Temperature fluctuations can also cause significant damage to building materials.

4.2. Human Activities

In addition to environmental factors, human activities such as urban development, inappropriate restoration methods, and neglect can significantly contribute to the degradation of historical buildings. Urban development, especially in rapidly growing cities like Istanbul, can lead to vibrations from nearby construction, mechanical damage to adjacent structures, and increased levels of pollution, all of which accelerate material decay [3]. Figure 12 shows an example of damage to a historical structure caused by moisture and human intervention. In Figure 13, the deterioration on historical structures located in the city centers of major cities due to environmental and weather conditions is visible.



Figure 12,13. Damage to historical structures from environment and human intervention.

Furthermore, improper restoration techniques are a major concern. Many restoration projects use modern materials, such as cement-based mortars or incompatible coatings, that are not suitable for the original building materials. These interventions can cause long-term damage by introducing rigidity or by trapping moisture within the structure, leading to accelerated decay[6]. For example, replacing traditional lime-based mortars with modern cement can cause differential thermal expansion and cracking, as cement is less flexible than lime. The inappropriate use of cleaning methods, such as high-pressure sand cleaning techniques, can also cause irreversible damage to fragile surfaces.

4.3. Natural Disasters

One of the most significant threats to historical buildings, particularly in Türkiye, is the risk of seismic activity. Istanbul, situated near the North Anatolian Fault, is highly prone to earthquakes. Many historical buildings were not originally designed to withstand seismic

forces, making them particularly vulnerable to structural failure during an earthquake [2]. Without adequate seismic retrofitting, such buildings are at risk of collapse, endangering both their historical significance and the lives of those who use them. Some researchs emphasizes the importance of advanced seismic retrofitting methods, ensuring that reinforcements do not undermine the cultural and architectural value of these structures[4].

5. PREVENTION OF DETERIORATION

Preventive measures are essential for minimizing the degradation of historical buildings and extending their lifespan. The implementation of systematic maintenance and monitoring protocols is critical to identifying and addressing issues before they escalate into larger, more costly problems.

5.1. Regular Inspections and Maintenance

One of the most effective ways to prevent significant damage to historical buildings is through regular inspections. Early detection of minor issues such as cracks, biological growth, or moisture ingress allows for timely interventions that can prevent the need for extensive restoration later on. Regular maintenance activities, such as clearing gutters, ensuring proper drainage, and repairing minor cracks, can significantly reduce the likelihood of water damage and other environmental degradation. Regular maintenance is the best and the cheapest strategy for preserving historical buildings. In Figures 14 and 15, partial and minor deteriorations in the decorations are repaired and consolidated before they reach an advanced stage, with simple maintenance and minor repairs.

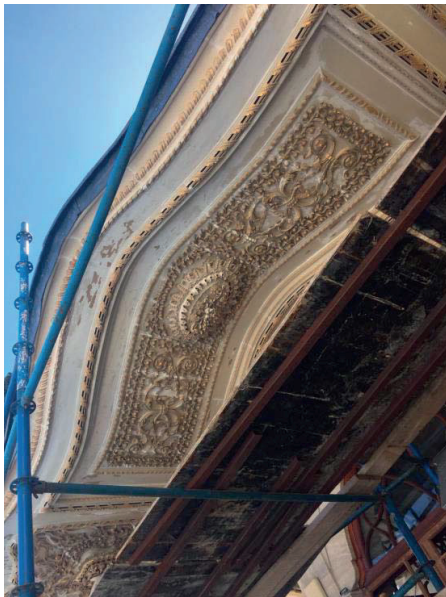


Figure 14-15. Consolidation of decorations with simple repair and strengthening.

5.2. Moisture Control

Given the role that moisture plays in the degradation of almost all building materials, moisture control is a critical preventive measure. This includes ensuring that drainage systems are functioning properly, repairing roof leaks, and installing protective barriers to prevent water infiltration. In humid regions, moisture control is particularly

important for preserving wooden elements, which are vulnerable to fungal growth and insect infestations[4].

5.3. Corrosion Inhibitors

For metal components, especially iron and steel, the application of corrosion inhibitors and protective paints is essential to prevent rusting. These treatments form a barrier that protects the metal from exposure to moisture and air, significantly reducing the risk of corrosion[11]. Regular monitoring and reapplication of these protective treatments are necessary to ensure their continued effectiveness over time.

6. RESTORATION PROCESSES

Restoration is the process of repairing and strengthening historical buildings while preserving their architectural and historical significance. Successful restoration requires a careful balance between modern intervention techniques and respect for the building's original materials and construction methods.

6.1. Cleaning, Repair and Maintenance

The first step in any restoration project is cleaning the building's surfaces to remove dirt, pollutants, and biological growth that contribute to material degradation. However, cleaning must be done using methods that are gentle enough to avoid damaging the original materials. Once the building is cleaned, repair work can begin. Damaged elements, such as cracked or spalled stone or brick, must be repaired or replaced using materials that are compatible with the original structure. For instance, lime-based mortars should be used to repair masonry, as they are more flexible and breathable than modern cement-based mortars[8]. Care must be taken to ensure that any replacement materials match the appearance and properties of the original materials as closely as possible, to preserve the building's historical character. In Figures 16 and 17, the restoration process of a minaret that was damaged by earthquakes and weather conditions is seen.



Figure 16-17. Restoration process of the minaret.

6.2. Structural Reinforcement

In regions like Istanbul, where seismic activity poses a significant threat to historical buildings, structural reinforcement is often necessary. However, these reinforcements must be carefully designed to preserve the building's historical character while ensuring its safety. The critical balance between strengthening historical structures and maintaining their original integrity through modern seismic retrofitting techniques is very important. The strengthening of a brick wall in a historical structure using carbon textile and high-strength lime mortar is depicted in Figure 18, and the same technique is shown for a dome in another structure in Figure 19.



Figure 18-19. Strengthening of brick wall and dome with carbon fiber material.

7. IMPORTANCE OF MAINTENANCE IN HISTORICAL BUILDINGS

The importance of regular maintenance in preserving historical buildings cannot be overstated. Maintenance is an ongoing process that involves regular monitoring and the repair of minor issues before they become major problems. Proper maintenance ensures that historical buildings remain structurally sound and aesthetically pleasing, while also minimizing the need for costly and invasive restoration projects.

7.1. Preventive Conservation

Preventive conservation involves taking steps to protect historical buildings from potential damage by addressing environmental and structural risks. This includes improving drainage systems, repairing roof leaks, and reinforcing foundations to prevent moisture infiltration and structural weakening. Regular inspections and minor repairs, such as repointing mortar joints or replacing damaged tiles, can help prevent more extensive damage in the future.

7.2. Long-term Preservation

Long-term preservation of historical buildings relies heavily on consistent and proactive maintenance strategies. By addressing small issues through routine care, it is possible to avoid significant structural damage that may require extensive restoration interventions. For example, the regular cleaning of facades to remove pollutants and biological growths, or sealing cracks to prevent water infiltration, are both examples of simple, cost-effective

maintenance that can have a lasting impact on the durability of a structure. In seismic regions, it is particularly important to monitor the structural integrity of buildings and ensure that they are retrofitted as needed to withstand potential earthquakes.

8. CONCLUSION

Historical buildings represent invaluable cultural and architectural assets that connect us to the past and provide a sense of identity and continuity. Preserving these structures is a complex task that requires a deep understanding of the various forms of degradation they face, including environmental factors, human activities, and natural disasters. By developing and implementing strategies for preventive conservation, appropriate restoration, and long-term maintenance, it is possible to protect these buildings for future generations. Cities like Istanbul, with its rich cultural heritage and challenging environmental conditions, serve as important case studies for understanding the best practices in historical building preservation. In conclusion, the successful preservation of historical buildings relies on a comprehensive approach that integrates regular maintenance, the use of compatible materials, and modern engineering techniques when necessary. Through thoughtful conservation efforts, we can ensure that future generations continue to experience and learn from the rich architectural and cultural heritage embodied in these buildings.

6. REFERENCES

- [1] Feilden, B. M. (2003). *Conservation of Historic Buildings*. Architectural Press.
- [2] Erdik, M. (2000). "Seismic Vulnerability of Historical Buildings in Istanbul." *Engineering Structures*, 22(9), 1187-1195.
- [3] Türk, A., Şener, S., & Yıldırım, O. (2020). "Seismic Assessment and Retrofit Strategies for Historical Buildings in Istanbul." *Journal of Earthquake Engineering*, 24(2), 301-319.
- [4] Dusak, S., Cesur, E. S., & Sayin, B. (2023). "Multi-level seismic performance assessment and comprehensive restoration considering the original state of a historic madrasah built in 1498 in the Forum of Constantine (4th century CE)." *Structures*, 53, July 2023. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.060> .
- [5] Özdemir, Z., Şahin, M., & Demir, K. (2018). "Impact of Air Pollution on the Degradation of Historical Buildings in Istanbul." *Environmental Science and Pollution Research*, 25(17), 16729-16742.
- [6] Çizgen, M. (2016). "Incompatible Modern Restoration Materials in Historical Buildings and Their Long-term Effects." *Türkiye Journal of Cultural Heritage Preservation*, 10(1), 32-45.
- [7] Grossi, C. M., Brimblecombe, P., & Esbert, R. M. (2007). "Weathering of stone-built structures." *Building and Environment*, 42(3), 1145-1151.
- [8] Brimblecombe, P., Grossi, C. M., & Harris, I. (2013). *Air Pollution and Architectural Heritage*, Springer.
- [9] Chung, Y. M., Marone, F., & Xiao, Y. (2014). "Long-term performance and maintenance of wooden historical buildings." *Journal of Cultural Heritage*, 15(3), 278-289.
- [10] Fabbri, B., Venturini, R., & Pieraccini, M. (2009). "Corrosion and restoration of lead-based elements in historical buildings." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(5), 276-283.
- [11] Broomfield, J. P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*. E & FN Spon.
- [12] Smith, B. J., McAlister, J. J., & Rothwell, J. J. (2016). "Environmental factors in the decay of historical buildings." *Environmental Earth Sciences*, 75(6), 1-12.
- [13] Brimblecombe, P., Grossi, C. M., & Harris, I. (2013). *Air Pollution and Architectural Heritage*, Springer.

**DIGITALNA REVOLUCIJA U CESTOVNOM PRIJEVOZU:
IMPLEMENTACIJA PAMETNIH TAHOGRAFA DRUGE
GENERACIJE U BOSNI I HERCEGOVINI**

**DIGITAL REVOLUTION IN ROAD TRANSPORT:
IMPLEMENTATION OF THE SECOND-GENERATION SMART
TACHOGRAPHS IN BOSNIA AND HERZEGOVINA**

Doc. dr. Jasmin Šehović

**Univerzitet u Sarajevu – Mašinski fakultet, Odsjek za motore i vozila
Vilsonovo šetalište 9, Sarajevo**

Vedran Krilić, Mr. dipl. ing. maš.

**Mervik d.o.o. Sarajevo
Vilsonovo šetalište 10, Sarajevo**

REZIME

Ovaj rad istražuje ulogu pametnih tahografa kao ključnog alata za prikupljanje podataka o vožnji koji doprinose povećanju efikasnosti upravljanja voznim parkom. Analizirano je iskustvo implementacije pametnih tahografa u Evropi, ukazujući na činjenicu da slična istraživanja nisu provedena u Bosni i Hercegovini. Kroz detaljnu analizu, prikazana je evolucija tahografskih uređaja, kao i zakonski okviri na međunarodnom i evropskom nivou. Posebna pažnja posvećena je pravnim propisima u Bosni i Hercegovini, koji zahtijevaju usklađivanje s međunarodnim standardima vezanim za pametne tahografe. Na kraju, rad se fokusira na korake koje je preduzela Federacija Bosne i Hercegovine kako bi prevazišla postojeće izazove, uključujući statističku analizu trendova u ovoj oblasti tokom posljednjih deset godina. Rad daje uvid u trenutnu situaciju i potrebu za daljim razvojem u implementaciji pametnih tahografa u Bosni i Hercegovini.

Ključne riječi: pametni tahograf, vozni park, pravni propisi, vozilo, sigurnost saobraćaja

1. UVOD

U svijetu koji se neprestano mijenja, tehnološki napredak neumoljivo oblikuje svaki aspekt života, a cestovni prijevoz nije izuzetak. Tahografi, kao kontrolni uređaji za praćenje i regulaciju vožnje, prošli su dug put od svojih početaka. Ono što je nekad bio jednostavni mehanički uređaj, evoluiralo je u složenu digitalnu tehnologiju koja pruža ne samo podatke o vožnji i odmorima vozača, već i uvid u složene obrasce ponašanja u saobraćaju. Ova digitalna revolucija u tahografima odrazila se na sve, od vozača do velikih prijevoznih kompanija, mijenjajući način na koji se upravlja cestovnim prijevozom. S pojavom pametnih tahografa industrija je doživjela još jedan val inovacija. Ovi uređaji nisu samo povećali efikasnost i sigurnost, već su također omogućili bolju usklađenost s regulativama i smanjenje mogućnosti

za manipulaciju podacima. Međutim, unatoč ovim napretcima, postoji mnogo toga što još uvijek nije istraženo.

U Bosni i Hercegovini, kao i u ostatku svijeta, uvođenje pametnih tahografa druge generacije predstavlja značajan korak naprijed. Ovi tahografi nisu samo tehnološki napredniji, već su dizajnirani da se integrišu s drugim digitalnim sistemima unutar vozila, pružajući tako još veći nivo kontrole i uvida u transportne operacije. Međutim, s ovim napretkom dolaze i pitanja: Kako će ova nova generacija tahografa uticati na dnevne operacije? Kako će se prijevoznici prilagoditi novim zahtjevima? I što je najvažnije, kako će ove promjene uticati na sigurnost na cestama?

U Bosni i Hercegovini se do sada nije niko bavio ovim istraživanjem, niti postoje dostupni literaturni izvori koji analiziraju prednosti i nedostatke digitalne transformacije tahografa kao obaveznih uređaja u svim novim vozilima. Međutim, postoje dostupni rezultati nekih istraživanja van Bosne i Hercegovine, uglavnom iz zemalja Evropske unije, koje su se sa ovim izazovima susrele prije Bosne i Hercegovine.

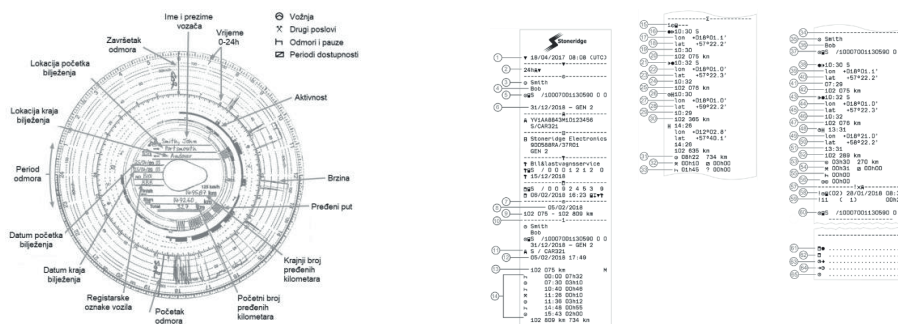
Moderni digitalni tahografi omogućavaju primjenu tehnika mašinskog učenja za predviđanje ključnih aspekata cestovnog saobraćaja, poput vremena putovanja, što predstavlja revolucionarni korak u optimizaciji urbanih transportnih sistema [1]. Napredni algoritmi zaštite, kao što je blockchain tehnologija, osiguravaju nepromjenjivost i vjerodostojnost podataka, čineći tahografe ključnim za pouzdano praćenje aktivnosti vozača i poštovanje zakonskih regulativa [2]. Podaci iz tahografa omogućavaju optimizaciju parkiranja na autocestama ili brzim cestama otkrivanjem obrazaca parkiranja i uticaja blizine odredišta, dostupnosti sadržaja i broja parkirnih mjesta na izbor i trajanje parkiranja [3]. Korištenjem GPS podataka iz tahografa, istraživanje u Južnoj Koreji je prikazalo analizu saobraćajnih uslova u stvarnom vremenu kroz kreiranje dinamičkih mapa toka saobraćaja, što poboljšava efikasnost u javnim i privatnim sektorima saobraćaja [4]. Iako postoje još mnogi izvori koji pominju prednosti uvođenja digitalnih, a posebno pametnih tahografa, postoje i izvori koji dovode u pitanje prije svega privatnost, a samim tim i informacionu sigurnost ovih uređaja. Paket mobilnosti koji je uveden u Litvaniji i Latviji istražuje uticaj novih pravila na preduzeća cestovnog prijevoza, naglašavajući izazove u prilagođavanju novim pravilima i njihov uticaj na radne uslove vozača i operativne troškove preduzeća [5]. Analiza funkcionalnosti digitalnih tahografa u Evropskoj uniji pokazuje da, iako nude bolju zaštitu od prevara i preciznije praćenje rada vozača, njihova implementacija zahtijeva složene procedure održavanja i čuvanja podataka [6]. Uticaj novih tehnologija na digitalne tahografe, kao što su bežična komunikacija i satelitsko pozicioniranje, mijenja sigurnosni okvir, donoseći nove prijetnje koje zahtijevaju napredne sigurnosne mjere za očuvanje integriteta i povjerljivosti podataka [7]. Novi pametni tahografi povećavaju operativne sposobnosti nadzornika i poboljšavaju detekciju kvarova i prekršaja, ali također mogu predstavljati rizik za privatnost i sigurnost vozača [8]. Pitanje privatnosti dodatno je naglašeno istraživanjem mogućnosti rekonstrukcije ruta na osnovu podataka iz tahografa koji bilježe samo brzine, bez GNSS (eng. Global Navigation Satellite System) pozicija. Ova metoda, koja je korištena za pronalazjenje nestale osobe, ukazuje na rizik od zloupotrebe podataka i ugrožavanje privatnosti vozača [9].

Cilj ovog rada je pružiti pregled aktivnosti tokom uvođenja pametnih digitalnih tahografa druge generacije u Bosni i Hercegovini, s posebnim fokusom na zakonske okvire, tehničke aspekte ovih uređaja, te analizu podataka o broju ispitanih tahografa u Federaciji Bosne i Hercegovine.

2. EVOLUCIJA TAHOGRAFSKIH UREĐAJA

Uvođenje tahografa unutar Evropske ekonomske zajednice (EEZ) 1986. godine označilo je značajan korak ka povećanju sigurnosti na putevima i praćenju radnog vremena vozača. Uvođenjem obavezne upotrebe tahografa, ručne evidencije vozača, poznate kao "personal log" ili kolokvijalno "knjiga laži", izgubile su centralnu ulogu u verifikaciji perioda vožnje i odmora. Kako su pravni propisi postajali sve strožiji, tako su i zahtjevi prema tahografima rasli, a tehnološki napredak, posebno u oblasti digitalizacije, omogućio je sve efikasnije ispunjavanje tih zahtjeva.

Prva generacija digitalnih tahografa, koja je uvedena 1. maja 2006. godine, predstavljala je prekretnicu u praćenju vozačkih aktivnosti. Ovi tahografi, kao što su modeli DTCO 1 do 3 kompanije VDO, donijeli su postepenu zamjenu analognih tahografskih listića, doprinoseći značajno smanjenju mogućnosti manipulacije podacima. Digitalizacija je omogućila preciznije i sigurnije praćenje radnog vremena vozača, čime se značajno unaprijedila bezbjednost na putevima. Na slici 1 je prikazana razlika između zapisa na tahografskom listiću analognog tahografa i ispisa iz digitalnog tahografa.



a) Tahografski listić analognog tahografa

b) Ispis iz digitalnog tahografa

Slika 1. Razlika u zapisima analognog i digitalnog tahografa

Digitalni tahografi imaju značajne prednosti u odnosu na analogne, uključujući veću preciznost i tačnost podataka, smanjenu mogućnost manipulacije, te lakši pristup i dugotrajnu pohranu informacija. Ovi uređaji poboljšavaju sigurnost na cestama i omogućavaju efikasnije upravljanje voznim parkom kroz automatsko generisanje izvještaja i integraciju s drugim sistemima. Druga generacija digitalnih tahografa, poznata kao inteligentni ili "pametni" tahografi, uvedena je 15. juna 2019. godine. Ovi uređaji su postali obavezni za ugradnju u nova vozila preko 3,5 tona koja učestvuju u prekograničnom saobraćaju. Cilj ove regulative je bio da se omogući poštena međunarodna konkurencija i poboljša sigurnost na evropskim putevima. Osim opsežnijeg snimanja podataka, ovi tahografi su donijeli poboljšanu zaštitu podataka kroz GNSS (Globalni Navigacijski Satelitski Sistem) pozicioniranje i DSRC (Dedicated Short Range Communication) daljinsku komunikaciju. Također, ovi uređaji omogućavaju prijenos podataka za inspekciju putem senzora na putevima, što dodatno doprinosi poboljšanju sigurnosti. Treća generacija, odnosno druga verzija inteligentnih tahografa, uvedena je 21. avgusta 2023. godine, sa obavezom ugradnje u nova vozila preko 3,5 tona. Ovi uređaji su unaprijeđeni kako bi bolje dokumentovali prekogranične prelaskе, kao i kabotažu i upućivanje vozača, što doprinosi boljoj evidenciji i transparentnosti u međunarodnom saobraćaju. Prikaz pametnog tahografa druge generacije sa ključnim funkcijama je data na slici 2.



Slika 2. Pametni tahograf druge generacije sa ključnim funkcijama [10]

Pametni tahografi (slika 2) su opremljeni sensorima i GNSS tehnologijom praćenja, koja bilježi informacije kao što su brzina, pređena udaljenost, vrijeme vožnje i odmora, pa čak i lokaciju vozila. Ovi podaci se pohranjuju na tahografsku karticu, koja je lako dostupna nadležnim organima za potrebe inspekcije, kao i vozaču putem odgovarajuće aplikacije. Osim toga, podaci s pametnih tahografa mogu biti dostupni menadžerima voznog parka, omogućavajući efikasno upravljanje s fokusom na optimizaciju voznog parka, kao i vođenje i obuku za poboljšanje performansi vozača teških vozila.

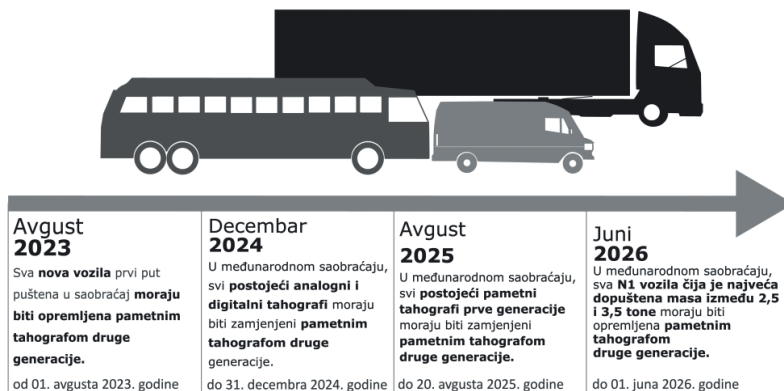
Ključne karakteristike pametnih tahografa

- Precizno bilježenje radnih sati i perioda odmora. Pametni tahografi precizno bilježe radne sate vozača i periode odmora, osiguravajući veću usklađenost s međunarodnim i nacionalnim propisima.
- GNSS tehnologija za praćenje lokacije. Pametni tahografi su opremljeni GNSS tehnologijom za praćenje lokacije, omogućavajući precizno bilježenje lokacije vozila u stvarnom vremenu.
- Upravljanje voznim parkom. Pametnom tahografu se može pristupiti putem odgovarajuće aplikacije, omogućavajući praćenje performansi vozača i vozila.
- Sigurno pohranjivanje podataka. Podaci koje bilježe pametni tahografi sigurno su pohranjeni na tahografskim karticama i lako dostupni nadležnim organima za potrebe inspekcije, kao i vozaču putem odgovarajuće aplikacije na njegovom pametnom telefonu.

Novine s pametnim tahografima druge generacije uključuju automatsko bilježenje prelaska državnih granica pomoću Galileo satelitskog sistema, Bluetooth povezivanje s pametnim telefonima za upravljanje tahografom i praćenje aktivnosti vozača, mogućnost označavanja utovara i istovara tereta, te prošireni kalkulator za obračun radnih aktivnosti. Vozači više ne moraju ručno bilježiti prelazak granice, ali i dalje moraju ručno označiti početak i kraj vozačke smjene. Osim ovoga, uvođenje pametnih tahografa druge generacije je uveliko olakšalo inspekciju na cesti, a neke države EU imaju i inspektore samo za nadzor tahografskih uređaja na cesti.

Pored obavezne ugradnje u nova vozila, od 2023. godine uvedeni su i novi rokovi za prilagođavanje postojećih vozila koja se koriste za međunarodni transport. Ove regulative omogućavaju postepenu nadogradnju i prilagođavanje postojećih vozila novim standardima,

čime se osigurava kontinuirano unaprjeđenje bezbjednosti na putevima. Rokovi ugradnje pametnih tahografa druge generacije za vozila koja vrše međunarodni prijevoz se mogu vidjeti na slici 3.



Slika 3. Rokovi implementacije pametnih tahografa druge generacije [11]

3. ZAKONSKE OSNOVE IZ OBLASTI TAHOGRAFA

Uvođenje tahografa u Bosni i Hercegovini nije izolovan proces, već dio šireg regulatornog okvira koji uključuje usklađivanje sa evropskim i međunarodnim propisima. Evropska unija, kroz svoje direktive i regulative, postavila je jasne propise za korištenje tahografa s ciljem povećanja sigurnosti na cestama, zaštite radnih prava vozača, te osiguravanja poštovanja vremena vožnje i odmora.

3.1. Međunarodni i propisi Evropske unije

Evropska unija je prepoznala značaj tahografa i kroz niz pravnih propisa uspostavila okvir koji reguliše njihovu primjenu i tehničke specifikacije.

Početak regulative na nivou Evropske unije započeo je s Uredbom (EU) br. 3821/85 [12], koja je postavila osnovne tehničke zahtjeve za tahografe. Ova uredba, zajedno sa Uredbom (EU) br. 2135/98 [13] koja je uslijedila, doprinijela je usklađivanju tahografa s modernim zahtjevima i tehnologijama. Sa ciljem unaprjeđenja praćenja radnog vremena i povećanja sigurnosti, Uredba (EU) br. 561/2006 [14] donijela je dodatne propise o primjeni tahografa u odnosu na radno vrijeme i period odmora vozača.

S novim tehnološkim dostignućima, evropski zakonodavni okvir je dalje unaprijeđen kroz Uredbu (EU) br. 165/2014 [15], koja je postavila nove standarde za digitalne tahografe, uključujući obavezne zahtjeve za zaštitu podataka i preciznost mjerenja. Najnovija izmjena, Uredba (EU) br. 2020/1054 [16], dodatno je ažurirala regulative u vezi s pametnim tahografima, uvodeći savremenije tehničke specifikacije i funkcionalnosti.

Pored evropskih propisa, AETR (Accord Européen sur le Transport des Marchandises par Route) [17] sporazum iz 1970. godine ima ključnu ulogu u međunarodnom okviru. Ovaj sporazum, koji je potpisan pod pokroviteljstvom UN-a, uspostavio je obavezu upotrebe tahografa za međunarodni cestovni prijevoz tereta i definisao tehničke zahtjeve tahografa. Protokol iz 1985. godine dodatno je uskladio zahtjeve s novim tehnologijama, uključujući digitalne tahografe. Evropska regulativa, uključujući Uredbu (EZ) br. 3821/85 [12] i Uredbu (EU) br. 165/2014 [15], također je usklađena s AETR sporazumom, osiguravajući dosljednost između nacionalnih i međunarodnih pravila.

3.2. Propisi Bosne i Hercegovine

U Bosni i Hercegovini oblast tahografa je uređena Zakonom o radnom vremenu, obaveznim odmorima mobilnih radnika i uređajima za evidentiranje u drumskom prevozu [18, 19], te Pravilnikom o radionicama i tahografima [20, 21].

Zakonom [18, 19] je uređeno radno vrijeme i obavezni odmor mobilnih radnika u drumskom prevozu, vrijeme vožnje i period odmora vozača koji obavljaju drumski prevoz robe i putnika, uređaji za bilježenje u drumskom prevozu (tahografi), način, uslovi i postupak imenovanja radionica, uslovi i postupci kontrole, nadležnost organa i njihova ovlaštenja, službene evidencije, nadzor nad sprovođenjem zakona, te prekršaji i kaznene odredbe. Ono što je važno istaći jeste da su definisana vozila koja moraju imati tahograf, kako i gdje se ispituje, te ko je nadležan za izdavanje rješenja tahografskim radionicama. Ovaj Zakon je i dalje na snazi u Bosni i Hercegovini, te iako su pametni tahografi obavezni za upotrebu od 2019. godine, Zakon još uvijek čeka izmjene.

Pravilnikom [20, 21] su propisani uslovi koje radionice moraju ispunjavati za obavljanje djelatnosti vezanih uz tahografe, uključujući provjeru, pregled, ugradnju, popravak i kalibraciju. Definisani su tehnički uslovi za tahografe, kao što su upis vremena vožnje, odmora i brzine. Ovaj pravilnik također propisuje zahtjeve za izdavanje i produženje dozvola za radionice, te postupak nadzora nad njihovim radom. Također, iako su pametni tahografi u obavezi od 2019. godine, ovaj pravilnik još nije ažuriran.

4. IMPLEMENTACIJA DIGITALNIH TAHOGRAFA U FEDERACIJI BOSNE I HERCEGOVINE

Kako je već rečeno u prethodnom poglavlju, proces digitalizacije vozila sa pametnim tahografima u Bosni i Hercegovini još uvijek nije prepoznat kroz izmjene i dopune odgovarajućih zakonskih i podzakonskih akata na nivou države [18, 19, 20, 21].

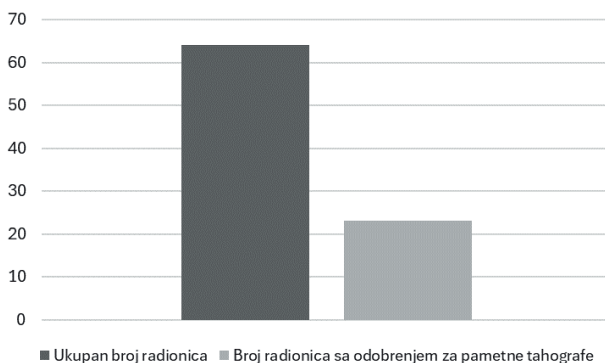
Međutim, bez obzira na to, prevoznici u Bosni i Hercegovini su počeli nailaziti na ovaj problem odmah kada su pametni tahografi postali obavezni za upotrebu u međunarodnom prevozu, tj. 2019. godine. Ovaj problem je odmah prepoznat u Federalnom ministarstvu prometa i komunikacija, te je doneseno Rješenje [22] kojim je omogućeno da vozila sa ugrađenim pametnim tahografima mogu obaviti tehnički pregled uz ispis iz pametnog tahografa. Nakon toga su vlasnici vozila imali obavezu da u roku od 30 dana obave aktivaciju i ispitivanje pametnog tahografa u nekoj od zemalja članica AETR sporazuma, te da kopiju potvrde dostave stanici tehničkog pregleda na kojoj je obavljen tehnički pregled.

Važno je istaći da je Federalno ministarstvo prometa i komunikacija zajedno sa Stručnom institucijom Mervik d.o.o. iz Sarajeva uspostavilo jedinstveni informacioni sistem na radionicama za tahografe u Federaciji Bosne i Hercegovine već 2014. godine [23]. Ovim informacionim sistemom Federalno ministarstvo prometa i komunikacija je uvezalo sve radionice i njihove aktivnosti u jednu cjelinu, te je omogućen pristup nadležnoj saobraćajnoj inspekciji. Upravo je ovaj uspostavljeni jedinstveni informacioni sistem na radionicama za tahografe bio osnova za implementaciju pametnih tahografa u Federaciju Bosne i Hercegovine.

Federalno ministarstvo prometa i komunikacija je putem Stručne institucije od 20.12.2022. godine [24] omogućilo svim radionicama za tahografe u Federaciji Bosne i Hercegovine da mogu dobiti dopunsko rješenje za obavljanje poslova aktivacije, ispitivanja i kalibracije pametnih SMART tahografa marke VDO, STONERIDGE i EFAS-BOSCH, u skladu sa Uredbom EU, 165/2014, Aneks 1C [15]. Na taj način je Federalno ministarstvo prometa i komunikacija otklonilo prepreke da i prevoznici koji posjeduju vozila sa ugrađenim pametnim tahografima mogu da vrše ispitivanje ovih uređaja u Federaciji Bosne i Hercegovine. U skladu sa vremenskim okvirom prikazanim na slici 3, jedinstveni

informativni sistem Federalnog ministarstva prometa i komunikacija je unaprijeđen tako da se od avgusta 2023. godine mogu ispitivati i pametni tahografi druge generacije.

Na slici 4 je prikazan grafikon koji poredi ukupan broj radionica sa brojem radionica koje imaju odobrenje za rad sa SMART tahografima u Federaciji Bosne i Hercegovine [25]. Sa slike 4 se može zaključiti da, iako postoji preko 60 radionica koje su ovlaštene za rad sa tahografima, samo nešto više od 20 radionica ima odobrenje za rad sa pametnim tahografima. Ovo ukazuje na to da je implementacija pametnih tahografa još uvijek ograničena, te da su dalja proširenja ovlaštenih radionica potrebna kako bi se omogućila šira primjena tehnologije pametnih tahografa. U prilog ovome idu i značajni troškovi uvođenja nove opreme, potrebne za ispitivanje pametnih tahografa, kao i za obuku kadrova.



Slika 4. Poređenje broja radionica ovlaštenih za rad sa pametnim tahografima u FBiH [25]

U nastavku je prikazana tabela 1 koja sadrži podatke o broju obrađenih predmeta u informacionom sistemu radionica za tahografe u Federaciji Bosne i Hercegovine za različite vrste tahografa od 2015. do 2024. godine [25]. Tabela obuhvata broj obrađenih predmeta za analogne tahografe, digitalne tahografe, te pametne tahografe prve i druge generacije, kao i ukupan broj obrađenih predmeta svake godine.

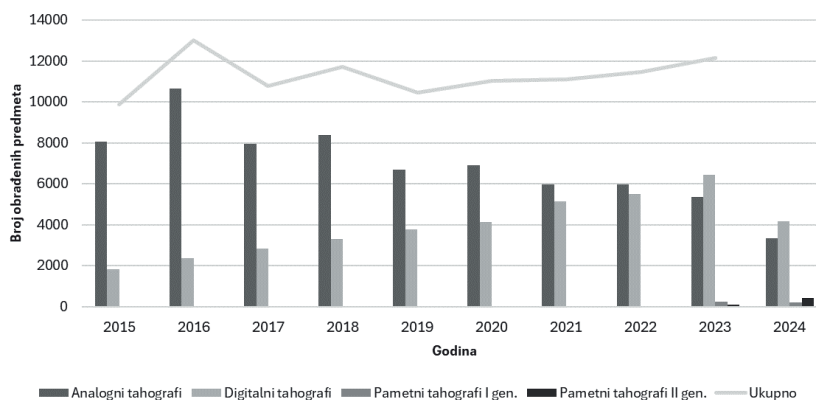
U 2015. godini, dominantni su bili analogni tahografi s 8041 obrađenim predmetom, dok su digitalni tahografi činili manji, ali značajan dio s 1820 predmeta. Ovaj obrazac se zadržava i naredne godine, gdje je 2016. godine, broj obrađenih predmeta za analogne tahografe dostigao vrhunac od 10643, dok je broj digitalnih tahografa porastao na 2359. Međutim, od 2017. godine počinje blagi pad u broju obrađenih predmeta za analogne tahografe, dok broj digitalnih tahografa nastavlja rasti. Od 2022. godine, tabela uvodi kategoriju pametnih tahografa prve generacije, ali njihovo učešće je relativno nisko u odnosu na druge dvije kategorije. Druga generacija pametnih tahografa pojavljuje se 2023. godine, s vrlo malim brojem obrađenih predmeta u toj godini u odnosu na druge vrste tahografa. Međutim, tabela pokazuje i podatke za prvih 6 mjeseci 2024. godine, gdje se vidi da je broj pametnih tahografa premašio broj pametnih tahografa za cijelu 2023. godinu. Za očekivati je da će trend porasta pametnih tahografa biti veći svake godine, a da će se analogni tahografi vremenom eliminisati iz upotrebe.

Tabela 1. Broj obrađenih predmeta u informacionom sistemu radionica za tahografe u Federaciji Bosne i Hercegovine za period 2015. do 2024. godine [25]

Godina	Analogni tahografi	Digitalni tahografi	Pametni tahografi I gen.	Pametni tahografi II gen.	Ukupno
2015	8041	1820			9861
2016	10643	2359			13002
2017	7950	2828			10778
2018	8383	3318			11701
2019	6682	3755			10437
2020	6905	4116			11021
2021	5967	5146			11113
2022	5970	5503			11473
2023	5348	6449	243	87	12127
2024*	3350	4156	219	422	8147

* - podaci za prvih šest mjeseci

Na slici 5, ovi podaci su prikazani grafički.



Slika 5. Grafički prikaz obrađenih predmeta po različitim vrstama tahografa za period 2015. do 2024. godine [25]

Grafik sa slike 5 odražava proces modernizacije u sektoru saobraćaja, gdje se starije tehnologije zamjenjuju naprednijim rješenjima, što rezultuje postepenom integracijom pametnih tahografa i povećanjem njihove uloge u nadzoru saobraćaja. Zajedno sa ovim trendovima, može se zaključiti da je prijelaz na digitalne i pametne tahografe u toku, što će u budućnosti sigurno dovesti do daljeg smanjenja upotrebe analognih tahografa i povećanja efikasnosti u nadzoru vozača i vozila.

5. ZAKLJUČAK

Uvođenje pametnih tahografa predstavlja značajan korak ka unaprijeđenju sigurnosti, efikasnosti i transparentnosti u cestovnom saobraćaju. Kroz provedenu analizu evolucije tahografskih uređaja, jasno je da su digitalni i pametni tahografi sposobni da pruže detaljnije i

preciznije informacije o vožnji, čime se doprinosi smanjenju prekršaja i poboljšanju uslova rada vozača.

Iako postoje izazovi u implementaciji pametnih tahografa, kao što su tehnička infrastruktura, edukacija vozača i prevoznika, te potreba za harmonizacijom sa regulativama Evropske unije, mjere koje su preduzete od strane Federalnog ministarstva prometa i komunikacija pokazuju proaktivan pristup ka rješavanju ovih pitanja. Zakonodavne osnove koje regulišu korištenje tahografa u Bosni i Hercegovini pružaju okvir za budući razvoj i primjenu novih tehnologija. Zaključno, implementacija pametnih tahografa ne samo da će poboljšati sigurnost na cestama, već će i unaprijediti operativne procese u transportnim kompanijama. U budućnosti, preporučuje se dalja edukacija i saradnja svih aktera u sektoru saobraćaja kako bi se osigurala uspješna primjena ovih inovativnih rješenja.

6. REFERENCE

- [1] Mustafa, Ghulam, Youngsup Hwang, and Seong-Je Cho. (2024), *Predicting Bus Travel Time in Cheonan City through Deep Learning Utilizing Digital Tachograph Data*, Electronics 13, no. 9: 1771. <https://doi.org/10.3390/electronics13091771>
- [2] Kim, Yongbae, Juyong Back, and Jongweon Kim. (2021), *A Tamper-Resistant Algorithm Using Blockchain for the Digital Tachograph*, Electronics 10, no. 5: 581. <https://doi.org/10.3390/electronics10050581>
- [3] Seya, H., Zhang, J., Chikaraishi, M., Jiang, Y. (2020), *Decisions on truck parking place and time on expressways: an analysis using digital tachograph data*, Transportation 47, 555–583. <https://doi.org/10.1007/s11116-018-9899-y>
- [4] Yun, Sung-Bum, and SoonYong Park. (2023), *Data-Driven Analysis for Road Traffic Conditions Using Digital Tachograph Data*, Engineering Proceedings 36, no. 1: 49. <https://doi.org/10.3390/engproc2023036049>
- [5] Tameli, J., Grietina, K., Liukpetrytė, L., Vrubļevska, L., Jankauskaitė, S. (2023), *The Impact Of The Mobility Package On Road Transport Companies In Lithuania And Latvia*, Proceedings of the International Student and Teacher Scientific Practical Conference 19 May, 2023. <https://doi.org/10.17770/iss2023.7397>
- [6] Rychter, M. (2007), *Present And Future Working Of Digital Tachograph System*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol.14, No. 2.
- [7] Sel, M., Karakljajic, D. (2014), *Internet of Trucks and Digital Tachograph – Security and Privacy Threats*, In: Reimer, H., Pohlmann, N., Schneider, W. (eds) ISSE 2014 Securing Electronic Business Processes. Springer Vieweg, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-06708-3_19
- [8] Baldini, G., Sportiello, I., Chiamarello, M., Mahieu, V. (2018), *Regulated applications for the road transportation infrastructure: The case study of the smart tachograph in the European Union*, International Journal of Critical Infrastructure Protection, Vol. 21, pp. 3 - 21 <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2018.02.001>
- [9] Werner, T., Ahlers, J., Brinkhoff, T. (2023), *About privacy on smart tachographs: Reconstructing car-driven routes based on speed measurements*, In Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL International Workshop on Geo-Privacy and Data Utility for Smart Societies (GeoPrivacy '23). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 14–19. <https://doi.org/10.1145/3615889.3628511>
- [10] <https://1tacho.com/wp-content/uploads/2023/09/smart-tachograph-2-1024x714.jpg> (pristupano 17.08.2024.)
- [11] <https://www.tahograf.hr/hr/novosti/pametni-tahograf-2-generacije> (pristupano 18.08.2024.)

- [12] Council Regulation (EEC) No 3821/85, Official Journal the European Union L 370 , 31/12/1985 P. 0008 – 0021, 1985.
- [13] Council Regulation (EC) No 2135/98, Official Journal the L 274, 09/10/1998, 1998.
- [14] Regulation (EC) No 561/2006, Official Journal L 102/1, 2006.
- [15] Regulation (EU) No 165/2014, Official Journal of the European Union L 60/1, 2014.
- [16] Regulation (EU) 2020/1054, Official Journal of the European Union L 249/1, 2020.
- [17] <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%20993/volume-993-A-14533-English.pdf> (pristupano 16.08.2024.)
- [18] Zakon o radnom vremenu, obaveznim odmorima mobilnih radnika i uređajima za evidentiranje u drumskom prevozu, Službeni glasnik Bosne i Hercegovine broj 48/10. 2010.
- [19] Zakon o imjenama i dopunama zakona o radnom vremenu, obaveznim odmorima mobilnih radnika i uređajima za evidentiranje u drumskom prijevozu, Službeni glasnik Bosne i Hercegovine broj 66/16. 2016.
- [20] Pravilnik o radionicama i tahografima, Službeni glasnik Bosne i Hercegovine broj 4/11. 2011.
- [21] Pravilnik o izmjenama i dopunama pravilnika o radionicama i tahografima, Službeni glasnik Bosne i Hercegovine broj 48/13. 2013.
- [22] <https://fmpik.gov.ba/bh/dokumenti/zakoni.html?task=document.viewdoc&id=957> (pristupano 16.08.2024.)
- [23] Rješenje o uspostavljanju jedinstvenog informacionog sistema u radu radionica za tahografe na području Federacije Bosne i Hercegovine, Federalno ministarstvo prometa i komunikacija, Službene novine Federacije BiH broj 84/14. 2014.
- [24] <https://mervik.ba/obavijest-radionicama-za-tahografe-u-vezi-smart-tahografa/> (pristupano 19.08.2024.)
- [25] Podaci prikupljeni od Federalnog ministarstva prometa i komunikacija

NOVA UREDBA O MAŠINAMA (EU) 2023/1230

THE NEW MACHINERY REGULATION (EU) 2023/1230

Tatjana Lazović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet
Kraljice Marije 16, Beograd

Ivana Atanasovska, naučni savetnik
Matematički institut Srpske Akademije Nauka i Umetnosti
Kneza Mihaila 36, Beograd

REZIME

Rad analizira evoluciju regulative EU koja se odnosi na bezbednost mašina, od prvih direktiva do najnovije Uredbe (EU) 2023/1230, koja zamenjuje trenutno aktuelnu Direktivu 2006/42/EC. Opisani su ključni zahtevi za proizvođače mašina, promene u zakonodavstvu, te izazovi koje donosi primena nove Uredbe. Cilj rada je da ukratko prikaže uticaj novih regulativa na proces konstruisanja mašina namenjenih EU tržištu, kao i na pripremne aktivnosti koje proizvođači moraju preduzeti pre početka zvanične primene Uredbe 2027. godine.

Ključne riječi: Direktiva 2006/42/EC, Uredba (EU) 2023/1230, Bezbednost mašina

ABSTRACT

The paper analyzes the evolution of EU regulations related to machinery safety, from the first directives to the latest Regulation (EU) 2023/1230, which replaces the current Directive 2006/42/EC. Key requirements for machine manufacturers, changes in legislation, and challenges brought by the implementation of the new regulation are described. The paper shows impact of the new regulations on the design of machine for the EU market, as well as on the preparatory activities that manufacturers must undertake before the official Regulation implementation in 2027.

Keywords: Directive 2006/42/EC, Regulation (EU) 2023/1230, Safety of Machinery

1. UVOD

Industrija, a i društvo u celini, ne mogu da postoje i funkcionišu bez mašina. Mašina je sistem koji se sastoji od delova i sklopova, spojenih u jednu konstrukcionu celinu, za određenu primenu, tj. vršenje korisnog rada. Pri tome, najmanje jedna od komponenti mašine se kreće, a energija pogonskog sistema mašine nije humanog ili životinjskog porekla. Isto tako, bezbednost ljudi – operatera na mašinama ili korisnika mašina je veoma značajan segment organizacije industrijskih procesa. U cilju smanjenja rizika, EU je pre više decenija uvela tehničku zakonsku regulativu, preko direktiva i harmonizovanih stiarda, a trenutno i odgovarajuće uredbe. Na taj način, svi proizvođači i korisnici su obavezni da preduzimaju

bezbednosne mere zaštite ljudi od povreda na radu. U oblasti mašina je trenutno aktuelna Direktiva 2006/42/EC, ali će uskoro biti zamenjena Uredbom 2023/1230, koja je stupila na snagu u junu 2023. godine, a primenjivaće se od 2027. godine. Zbog toga već sada treba započeti pripreme u vezi sa primenom postavki i svih zahteva Uredbe u procesu konstruisanja mašina, namenjenih plasmanu na EU tržište.

Prva Direktiva o mašinama – 89/392/EEC [1] je publikovana 1989. godine saglasno članu 100 Rimskog ugovora [2] iz 1957. godine, kada su potpisana dva ugovora - Ugovor o osnivanju Evropske ekonomske zajednice (EEZ) i Ugovor o osnivanju Evropske zajednice za atomsku energiju (EAEC ili Euratom). Saglasno ovom članu ugovora, uspostavljaju se direktive koje imaju za cilj približavanje zakonodavnih, regulatornih i administrativnih odredbi država članica koje imaju uticaj usmeren na uspostavljanje ili funkcionisanje zajedničkog tržišta. Direktiva 89/392/EEC je stupila na snagu 1. januara 1993. godine, sa obaveznom primenom za sve tadašnje članice od 1. januara 1995. godine. Direktiva 91/368/EEC [3] je proširila delokrug Direktive o mašinama na zamenljivu opremu, mašine za kretanje i podizanje (isključujući ljude). Direktiva 93/44/EEC [4] je proširila delokrug Direktive o mašinama na bezbednosne komponente, mašine namenjene za podizanje, kao i na kretanje ljudi. Iste godine je publikovana i Direktiva 93/68/EEC [5] kojom su uvedene usklađene odredbe koje se odnose na „CE“ oznaku. S obzirom da je u periodu od 1989 – 1993 prva verzija Direktive menjana i dopunjavana navedenim direktivama [3-5], pojavila se potreba za publikovanjem nove kompletne direktive o harmonizaciji zakona svih država članica EU, u vezi sa mašinama. Direktiva 98/37/EC [6] je publikovana 1998. godine, a zatim iste godine i delimično izmenjena Direktivama 98/79/EC [7], koji se odnosi na isključenje medicinskih uređaja. Direktiva o mašinama 98/37/EC je bila na snazi do kraja 2009. godine. Sledeća direktiva 2006/42/EC [8] je publikovana 2006. godine. Ona se zasniva na Direktivi 98/37/EC [6], kojom je modifikovana Direktiva 89/392/EEC [1], izmenjena Direktivama 91/368/EEC, 93/44/EEC, 93/68/EEC i 98/79/EC [3-5,7]. Zahtevi Direktive 2006/42/EC su prevedeni u nacionalna zakonodavstva zemalja EU i ova direktiva se od početka 2010. godine primenjuje umesto Direktive 98/37/EC. U poređenju sa prethodnom direktivom, zahtevi ove Direktive o mašinama i odgovarajućih spregnutih evropskih propisa tiču se proizvođača mašina i bezbednosnih komponenti, distributera mašina i korisnika. Direktiva 2006/42/EC postavlja osnovu i regulatornu osnovu za harmonizaciju osnovnih zdravstvenih i bezbednosnih zahteva (EHSR) u oblasti mašina na nivou EU.

Nova Uredba (EU) 2023/1230 Evropskog parlamenta i Saveta o mašinama [9] u potpunosti zamenjuje Direktivu 2006/42/EC [8] o mašinama. Uredba će se primenjivati od 2027. godine. Prvo što se može primetiti je promena naziva ovog važnog dokumenta. Umesto direktive, koristi se pojam uredba. Postavlja se pitanje u čemu je razlika. Direktiva nije direktno primenljiva u državama članicama Zajednice. Pre nego što bude primenljiva u svakoj državi članici, ona se prvo mora transponovati u nacionalno zakonodavstvo. Sa druge strane, Uredba je direktno primenljiva u državama članicama EU, odmah nakon stupanja na snagu.

U ovom radu je ukratko, radi podsećanja, predstavljena Direktiva 2006/42/EC, koja je još uvek u primeni. Zatim je izvršena analiza sadržaja nove Uredbe 2023/1230 u odnosu na trenutno aktuelnu Direktivu. Na osnovu analize su izvedeni odgovarajući zaključci.

2. UKRATKO O DIREKTIVI 2006/42/EC

Direktivom 2006/42/EU je revidirana i zamenjena Direktiva 98/37/EU iz 2008. godine. Primena Direktive 2006/42/EU je započela krajem decembra 2009. godine. Ceo dokument Direktive 2006/42/EC [8] ima 63 strane. Sama direktiva je na 11 strana, a prilozi su na preostale 52 strane. Vodič za primenu Direktive 2006/42/EC [10] je publikovan 2019. godine, sa ciljem da objasni koncept i zahteve Direktive i tako obezbedi jednaku

interpretaciju i primenu u celoj EU. Sadržaj ovog Vodiča sa obimom od 465 strana (!) daleko prevazilazi samu Direktivu.

Direktiva 2006/42/EC je jedan od glavnih dokumenata koji reguliše usklađivanje osnovnih zdravstvenih i bezbednosnih zahteva za mašine na nivou EU. Ona promovise slobodni promet mašina unutar jedinstvenog tržišta EU i ujedno garantuje visok nivo zaštite za radnike i potrošače, tj. korisnike mašina. Takođe, Direktiva promovise harmonizaciju kroz kombinaciju obaveznih zdravstvenih i bezbednosnih zahteva i dobrovoljnih harmonizovanih stiarda. Drugim rečima, zdravstveni i bezbednosni zahtevi su obavezni, ali stiardi koji daju pretpostavku o usklađenosti sa zahtevima direktive su dobrovoljni. Direktiva o mašinama primenjuje se samo na proizvode koji se prvi put plasiraju na EU tržište, definišući bitne zdravstvene i bezbednosne zahteve opšte primene, dopunjene nizom specifičnijih zahteva za određene kategorije mašina. Na taj način, Direktiva pomaže EU da kao zajednica bude inovativnija, efikasnija i konkurentnija na globalnom tržištu. Osim mašina, Direktiva obuhvata zamenljivu opremu, bezbednosne komponente, dodatne delove i sklopove za dizanje, lance, užad i trake, zamenjive mehaničke prenosne uređaje, kao i na delimično završene mašine. Direktiva se ne odnosi na opremu koja se koristi u nuklearnoj industriji, rudnicima, laboratorijama, u zabavnim parkovima i na vašarima, kao ni na mašine koje koriste vojska i policija.

Saglasno Direktivi, obaveze proizvođača mašina su sledeće: izvršiti procenu rizika, da bi se odredili zdravstveni i bezbednosni zahtevi, koje treba primeniti na mašine; uključiti procenu rizika u konstruisanje i u proizvodnji mašine; utvrditi ograničenja za upotrebu mašine; utvrditi sve moguće opasnosti; proceniti rizik izazivanja teških povreda ili ozbiljne štete od strane mašine i preduzeti mere kako bi se mašina učinila bezbednijom; postarati se da mašina bude u skladu sa detaljnim zdravstvenim i bezbednosnim zahtevima navedenim u Prilogu I Direktive; izraditi svu tehničku dokumentaciju kojom se potvrđuje da mašina ispunjava sve zahteve Direktive; primeniti postupke ocenjivanja usklađenosti, pružiti sve potrebne informacije, uključujući uputstva za montažu, ugradnju/postavljanje i upotrebu; ispuniti izjavu o usklađenosti i pobrinuti se da je CE oznaka usklađenosti postavljena na mašinu.

Direktiva sadrži dvanaest priloga – aneksa: I - Osnovni zdravstveni i bezbednosni zahtevi koji se odnose na projektovanje konstrukciju mašina; II – Deklaracije; III – CE oznaka; IV – Kategorije mašina na koje se mora primeniti jedan od postupaka iz člana 12(3) i 12(4); V – Indikativna lista bezbednosnih komponenti iz člana 2(c); VI – Uputstvo za montažu delimično završene mašine; VII – Tehnički fajlovi/tehnička dokumentacija; VIII – Uputstvo za montažu delimično završene mašine; IX – EC ispitivanje tipa; X – Potpuna garancija kvaliteta; XI – Minimalni kriterijumi koje države članice moraju uzeti u obzir za obaveštavanje tela i XII – Tabela korelacije sa Direktivom 98/37/EC.

U skladu sa ovom direktivom, sve zemlje članice EU su izvršile odgovarajuću nacionalnu transpoziciju (donošenje nacionalnih zakona za implementaciju Direktive) i propisali određene mere, a zatim i bezuslovno započele primenu zahteva Direktive, nakon njenog stupanja na snagu. Direktiva o mašinama je osnovna evropska legislativna koja reguliše proizvode mašinske industrije. Tokom proteklih godina je vršena odgovarajuća evaluacija sadržaja i primene ove direktive. Evaluacija je pokazala da je direktiva relativno fleksibilna prema tehnološkom razvoju u digitalnoj eri, relevantna je u opštem smislu, efikasna, efektivna, koherentna i poseduje dodatnu vrednost za EU. Međutim, neke od odredbi Direktive zahtevaju veću pravnu jasnoću i poboljšanu usklađenost sa drugim zakonodavstvom. Neki od administrativnih zahteva koji utiču na efikasnost Direktive takođe bi mogli da budu pojednostavljeni. Konačno, evaluacija ukazuje da su na efikasnost Direktive uticali nedostaci u praćenju i sprovođenju. Drugim rečima, revizija je pokazala da je potrebno izvršiti određene izmene i dopune postojeće aktuelne Direktive. Nakon prvobitnog plana da

bude uvedena Nova direktiva o mašinama [11], odlučeno je da novi dokument bude Uredba o mašinama [9].

3. UREDBA (EU) 2023/1230

Uredba (EU) 2023/1230 [9] Evropskog parlamenta i Saveta od 14. juna 2023. o mašinama zamenjuje Direktivu 2006/42/EC o mašinama. Ceo dokument Uredbe ima 102 strane, sama uredba je na 39 strana, a prilozi su na preostale 63 strane. Uredba ima 54 člana raspoređena u devet poglavlja na 27 strana. Vodič za primenu nove Uredbe još uvek nije publikovan (do vremena pripreme ovog rada), ali se to može očekivati u narednom periodu, s obzirom da primena Uredbe počinje tek 2027. godine. Uredba, kao i direktiva iz 2006. godine, definiše obavezne suštinske zdravstvene i bezbednosne zahteve koje mašine moraju da ispune da bi bile plasirane na EU tržište, kao i procedure za ocenjivanje njihove usklađenosti. Pri tome, tehnički detalji su uglavnom obezbeđeni harmonizovanim stardima koje su razradile evropske organizacije za stardizaciju. Zahtevi Uredbe su usmereni na proizvođače mašina i druge ekonomske činioce (npr. uvoznike). Centralni smisao primene zahteva Uredbe je sticanje uslova za postavljanje CE oznake na proizvod – mašinu, što označava da mašina ispunjava postojeće zdravstvene i bezbednosne zahteve i da bez ograničenja može biti predmet trgovine i upotrebe na EU unutrašnjem tržištu. Uredba pojašnjava neka nedovoljno jasna složena pitanja iz Direktive o mašinama, kao što su „nekompletna mašina“ i „značajne modifikacije“. Uredba o mašinama takođe namerava da bolje pokrije nove tehnologije, kao što su autonomne mobilne mašine (roboti), internet stvari (IoT) sa odgovarajućom opremom, kao i veštačka inteligencija (AI), gde specifični moduli AI koji koriste tehnike učenja obezbeđuju bezbednosne funkcije. Zahtevi Uredbe su direktno primenljivi u državama članicama EU, tj. nema potrebe da se transponuju u pojedinačna nacionalna zakonodavstva.

Cilj Uredbe o mašinama je da omogući da mašine, delimično završene mašine, kao i povezani proizvodi, budu dostupni na tržištu, uz obezbeđivanje visokog nivoa zdravstvene i bezbednosne zaštite ljudi, profesionalnih korisnika i potrošača. Uredba definiše pojmove kao što su „mašine“, „zamenljiva oprema“, „bezbednosna komponenta“, „bezbednosna funkcija“, „značajna modifikacija“, „plasman na tržište“, „proizvođač“, „oznaka CE“, „uputstva za upotrebu“, itd [12]. Uredba se primenjuje na sledeće mašine i povezane proizvode: zamenljiva oprema; bezbednosne komponente; uređaji za dizanje; lanci, užad i trake; uklonjivi uređaji mehaničkih prenosnika i delimično završene mašine. Uredba se ne odnosi na motorna vozila i njihove prikolice, kao i specifičnu opremu koja se koristi na vašarima i zabavnim parkovima ili mašine posebno projektovane i izrađene za istraživačke svrhe za privremenu upotrebu u laboratorijama.

Mašine ili povezani proizvodi mogu biti dostupni na tržištu ili stavljeni u upotrebu samo ako ispunjavaju osnovne zdravstvene i bezbednosne zahteve navedene u Prilogu III Uredbe (kada su pravilno instalirani i održavani i korišćeni za predviđenu upotrebu ili pod uslovima koji se razumno mogu predvideti). To se odnosi i na delimično završene mašine. Prilikom plasiranja mašina i povezanih proizvoda na tržište ili njihovog puštanja u upotrebu, proizvođači moraju da obezbede da su ti proizvodi projektovani i izrađeni u skladu sa osnovnim zdravstvenim i bezbednosnim zahtevima. Oni takođe imaju odgovornost da izrade odgovarajuću tehničku dokumentaciju i da sprovedu odgovarajući postupak ocenjivanja usaglašenosti. Kada je usklađenost mašina ili povezanog proizvoda sa osnovnim zdravstvenim i bezbednosnim zahtevima dokazana relevantnim postupkom ocenjivanja usaglašenosti, proizvođač sastavlja odgovarajuću EU deklaraciju o usaglašenosti i stavlja CE oznaku na svoju mašinu. Proizvođači takođe moraju da obezbede da mašine ili povezani proizvodi budu praćeni uputstvima za upotrebu koja mogu lako da razumeju korisnici. Ova uputstva mogu biti data i u digitalnom obliku. Uredba takođe uključuje zahteve za nacionalne organe odgovorne za tela

za ocenjivanje usaglašenosti (notifikaciona tela). Komisija EU objavljuje listu tela koja su notifikovana u skladu sa ovom Uredbom, uključujući identifikacione brojeve koji su im dodeljeni i aktivnosti ocenjivanja usaglašenosti za koje su ove organizacije notifikovane. Struktura Uredbe je data u Tabeli 1.

Tabela 1. Poglavlja (I-IX) i članovi (1-54) Uredbe (EU)2023/1230

Članovi
<p>I Opšte odredbe 1. Predmet; 2. Obim; 3. Definicije; 4. Slobodno kretanje; 5. Zaštita osoba tokom instaliranja ili upotrebe mašina ili povezanih proizvoda; 6. Kategorije mašina i povezanih proizvoda navedene u Prilogu 1 koje podležu odgovarajućim postupcima ocenjivanja usaglašenosti; 7. Bezbednosne komponente; 8. Osnovni zdravstveni i bezbednosni zahtevi za proizvode iz delokruga ove Uredbe; 9. Specifično zakonodavstvo Unije o harmonizaciji</p>
<p>II Obaveze privrednih subjekata 10. Obaveze proizvođača mašina i povezanih proizvoda; 11. Obaveze proizvođača delimično završenih mašina; 12. Ovlašćeni zastupnici; 13. Obaveze uvoznika mašina i povezanih proizvoda; 14. Obaveze uvoznika delimično završenih mašina; 15. Obaveze distributera mašina i povezanih proizvoda; 16. Obaveze uvoznika delimično završenih mašina; 17. Slučajevi u kojima se obaveze proizvođača odnose na uvoznike i distributere; 18. Ostali slučajevi; 19. Identifikacija privrednih subjekata</p>
<p>III Usaglašenost proizvoda u okviru ove uredbe 20. Pretpostavka usaglašenosti proizvoda u okviru ove Uredbe; 21. EU deklaracija o usaglašenosti mašina i povezanih proizvoda; 22. EU deklaracija o ugradnji delimično završenih mašina; 23. Opšti principi CE označavanja; 24. Pravila za stavljanje CE oznake na mašine i povezane proizvode</p>
<p>IV Ocena usaglašenosti 25. Ocena usaglašenosti za mašine i povezane proizvode</p>
<p>V Obaveštenje tela za ocenjivanje usaglašenosti 26. Notifikacija; 27. Notifikacioni organi; 28. Zahtevi koji se odnose na notifikacione organe; 29. Obaveza informisanja od strane notifikacionih organa; 30. Zahtevi koji se odnose na notifikaciona tela; 31. Pretpostavka usaglašenosti notifikacionih tela; 32. Korišćenje podizvođača i podružnica od strane notifikacionih tela; 33. Prijava za notifikaciju; 34. Notifikacioni postupak; 35. Identifikacioni brojevi i liste notifikacionih tela; 37. osporavanje kompetentnosti notifikacionih tela; 38. Radne obaveze notifikacionih tela; 39. Žalbe na odluke notifikacionih tela; 40. Obaveza informisanja od strane notifikacionih tela; 41. Razmena iskustva; 42. Koordinacija notifikacionih tela</p>
<p>VI Nadzor nad tržištem i procedure zaštite Unije 43. Postupak na nacionalnom nivou za postupanje sa proizvodima iz delokruga ove Uredbe koji predstavljaju rizik; 44. Postupak zaštite Unije; 45. Usaglašeni proizvodi iz delokruga ove Uredbe koji predstavljaju rizik; 46. Formalna neusaglašenost</p>
<p>VII Delegirana ovlašćenja i procedure komisije 47. Obavljanje delegiranja; 48. Procedura Komisije</p>
<p>VIII Poverljivost i kazne 49. Poverljivost; 50. Kazne</p>
<p>IX Prelazne i završne odredbe 51. Ukidanje; 52. Prelazne odredbe; 53. Evaluacija i pregled; 54. Stupanje na snagu i primena</p>

Prilozi Uredbe su: I - Kategorije mašina ili povezanih proizvoda na koje će se primeniti jedan od postupaka iz člana 25(2) i člana 25(3); II – Indikativna lista bezbednosnih komponenti; III – Osnovni zdravstveni i bezbednosni zahtevi koji se odnose na projektovanje i konstrukciju mašina ili povezanih proizvoda; IV – Tehnička dokumentacija; V – Deklaracija EU o usaglašenosti i Deklaracija EU o inkorporaciji; VI – Interna kontrola proizvodnje; VII – EU ispitivanje tipa; VIII – Usklađenost sa tipom na osnovu interne kontrole proizvodnje; IX – Usaglašenost na osnovu potpunog osiguranja kvaliteta; X – Usaglašenost na osnovu verifikacije jedinice; XI – Uputstva za montažu delimično završene mašine i XII – Tabela korelacije sa Direktivom 2006/42/EC.

Uredba je već na snazi, a primenjavaće se od 20. januara 2027. godine. Međutim, neka pravila su izuzetak i već se primenjuju (članovi 26-42, 50(1), 6(7) i 48-52) ili će se uskoro primenjivati (članovi 6(2-8 i 11), 47 i 53(3)). Uredba je nova, ali veliki deo njenog sadržaja je bio i u Direktivi. Uporedni pregled sadržaja je dat u Tabeli 2.

Tabela 2. Uporedni pregled članova Uredbe (EU) 2023/1230 i Direktive 2006/42/EC

Uredba	Direktiva	Uredba	Direktiva
Član 1	---	Član 2	Član 1
Član 3	Član 2	Član 4	Član 6
Član 5	Član 15	Član 6	(1) Član 8 (1)
Član 7	(1) Član 8 (1)	Član 8	Član 4 (1) i (2)
Član 9	Član 3	Član 10	Član 5
Član 11	Članovi 5 i 13	Član 12	Ovlašćeni predstavnici
Član 13	Obaveze uvoznika mašina i povezanih proizvoda	Član 14	Obaveze uvoznika delimično završenih mašina
Član 15	Obaveze distributera mašina i povezanih proizvoda	Član 16	Obaveze distributera delimično završenih mašina
Član 17	Obaveze proizvođača koje se odnose na uvoznike i distributere	Član 18	Ostali slučajevi
Član 19	Identifikacija ekonomskih operatera	Član 20	(2) Član 7
Član 21	EU deklaracija o usaglašenosti mašina i povezanih proizvoda	Član 22	Deklaracija EU o ugradnji delimično završenih mašina
Član 23	Član 16	Član 24	Član 16
Član 25	Član 12	Članovi 26-42	Član 14 (i Prilog XI)
Član 43	Član 11	Član 44	Članovi 11 i (3) Član 10
Član 45	Član 11	Član 46	Član 17
Član 47	Član 21 a	Član 48	Član 22
Član 49	Član 18	Član 50	Član 23
Član 51	Član 25	Član 52	Prelazne odredbe
Član 53	Član 21	Član 54	(prvi stav) Član 28 i (drugi i treći stav) Član 29
Prilog I	Prilog IV	Prilog III	Prilog I
Prilog II	Prilog V	Prilog IV	Prilog VII
Prilog V	Prilog II	Prilog IX	Prilog X
Prilog VI	Prilog VIII, povezan sa Članom 12 (3) (a)	Prilog X	---
Prilog VII	Prilog IX	Prilog XI	Prilog VI
Prilog VIII	Prilog VIII, povezan sa Članom 12 (3) (b)		

Kada se uporedi sadržaj Tabele 2 sa sadržajem Priloga XII Uredbe [9], može se konstatovati da neki članovi ili delovi sadržaja članova iz Direktive [8] nisu sadržani u Uredbi. To su: 4 (3 i 4) o nekim aspektima tržišnog nadzora, 8 (2) o specifičnim merama Evropske komisije, 9 o specifičnim merama za rad sa potencijalno opasnim mašinama, 19 o saradnji između država članica EU, 20 o pravnim lekovima, 24 o izmeni Direktive 95/16EC, 26 o transponovanju i 27 o derogaciji. Delimično je sadržaj nekih izostavljenih članova prisutan u novoj Uredbi, ali je prilagođen novom konceptu. Uvođenjem nove Uredbe, neki članovi su u potpunosti postali nepotrebni. Što se priloga tiče, Prilog III Direktive je ukinut, a Prilog XI je sadržan u Članu 30 Uredbe. Prilog X Uredbe o usaglašenosti zasnovanoj na verifikaciji jedinice je nov prilog i ne postoji njemu komplementaran prilog ili član u Direktivi. Nakon analize formalnih razlika, postavlja se pitanje, šta je potpuno novo u sadržaju nove Uredbe, a tiče se obaveza proizvođača, tj. konstruktora mašina.

3.1. Konstruisanje mašina i Uredba (EU) 2023/1230

Na konkretne zahteve pri projektovanju i konstruisanju mašina se odnosi Prilog III Uredbe. Saglasno ovom Prilogu, proizvođač mašina treba da izbegne mogućnost pojave opasnosti ili, ako to nije moguće, smanji rizike još u toku procesa konstruisanja, bezbednom konstrukcijom mašine. Greške koje bi mogle da nastanu prilikom ugradnje ili zamene određenih mašinskih delova ili sklopova, a koje bi mogle da budu izvor rizika, treba da budu onemogućene odgovarajućom konstrukcijom tih delova. U suprotnom, potrebno je dati odgovarajuće informacije o opasnostima na delovima, sklopovima ili njihovim kućištima. Iste informacije daju se i na pokretnim delovima ili njihovim kućištima. Tamo gde neispravni spojevi mogu biti izvor rizika, oni moraju biti izbegnuti u konstrukciji, ili korisnici moraju raspolagati odgovarajućim informacijama o spojenim elementima i načinu spajanja.

Razvoj mašina je rezultirao sve većom upotrebom digitalnih tehnologija i sredstava. Softver igra sve važniju ulogu u projektovanju mašina. Stoga definicija mašine mora obuhvatiti i komponentu softvera, koji takođe treba da bude predmet ocenjivanja usaglašenosti. Pri tome, i definicija bezbednosnih komponenti treba da obuhvati ne samo fizičke uređaje već i digitalne uređaje. Da bi se uzela u obzir sve veća upotreba softvera kao bezbednosne komponente, bezbednosnom komponentom treba smatrati softver koji obavlja bezbednosnu funkciju i koji se nezavisno plasira na tržište.

Poslednjih godina se na tržište plasiraju napredne mašine, koje manje ili uopšte ne zavise od ljudskih operatera. Takva mašine rade na definisanim zadacima i unapred definisanim strukturama okruženja. Neke od tih novih mašina su konstruisane tako da mogu "naučiti" da izvode nove „akcije“ i tako postanu autonomnije. Dalja unapređenja mašina, koja već postoje ili se očekuju, uključuju obradu informacija u realnom vremenu, rešavanje problema, mobilnost, senzorske sisteme, učenje, prilagodljivost i sposobnost rada u nestrukturiranim okruženjima. Pojava novih digitalnih tehnologija, poput veštačke inteligencije, interneta stvari i robotike, postavlja nove izazove u pogledu bezbednosti proizvoda. Dakle, ova Uredba treba da obuhvati bezbednosne rizike koji proizilaze iz novih digitalnih tehnologija. Tu spadaju i rizici koje izazivaju zlonamerna treća lica koja utiču na bezbednost mašina obuhvaćenih ovom Uredbom.

4. ZAKLJUČAK

Uvođenje nove Uredbe (EU) 2023/1230 predstavlja značajan korak u regulaciji bezbednosti i zdravlja u oblasti mašinske industrije unutar Evropske unije. Analiza promene sa Direktive 2006/42/EC na Uredbu pokazuje da, iako su osnovni principi harmonizacije ostali nepromenjeni, uvedene su ključne novine koje unapređuju pravnu jasnoću i proširuju obuhvat regulative, naročito u kontekstu novih tehnologija kao što su autonomne mašine i roboti,

internet stvari (IoT) i veštačka inteligencija (AI). Nova uredba ima direktnu primenu u svim državama članicama EU, bez potrebe za transponovanjem u nacionalna zakonodavstva. Ova promena je osmišljena da ubrza i ujednači implementaciju bezbednosnih stiarda širom EU. S obzirom na to da je rok za početak primene Uredbe početak 2027. godine, postoji dovoljan vremenski period za prilagođavanje, ali je neophodno da se rad na pripremama započne već sada kako bi se izbegle, regulisale ili uklonile eventualne prepreke u budućnosti.

5. REFERENCE

- [1] [Council Directive 89/392/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating to machinery, Official Journal of European Communities Legislation L 183, Vol. 32, pp. 9-32. Publications Office of the European Union, Belgium, 1989.
- [2] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:11957E/TXT>
- [3] Council Directive 91/368/EEC amending Directive 89/392/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating to machinery, Official Journal of the European Communities Legislation L 198, Vol. 34, pp. 16-32. Publications Office of the European Union, Belgium, 1991.
- [4] Council Directive 93/44/EEC amending Directive 89/392/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating to machinery, Official Journal of the European Communities Legislation L 175, Vol. 36, pp. 12-20. Publications Office of the European Union, Belgium, 1993.
- [5] Council Directive 93/68/EEC amending Directives 87/404/EEC (simple pressure vessels), 88/378/EEC (safety of toys), 89/106/EEC (construction products), 89/336/EEC (electromagnetic compatibility), 89/392/EEC (machinery), 89/686/EEC (personal protective equipment), 90/384/EEC (non-automatic weighing instruments), 90/385/EEC (active implantable medicinal devices), 90/396/EEC (appliances burning gaseous fuels), 91/263/EEC (telecommunications terminal equipment), 92/42/EEC (new hot-water boilers fired with liquid or gaseous fuels) i 73/23/EEC (electrical equipment designed for use within certain voltage limits), Official Journal of the European Communities Legislation L 220, Vol. 36, pp. 1-22. Publications Office of the European Union, Belgium, 1993.
- [6] Directive 98/37/EC of the European Parliament i of the Council on the approximation of the laws of the Member States relating to machinery, Official Journal of the European Communities Legislation L 207, Vol. 41, pp. 1-46. Publications Office of the Europe, Belgium, 1998.
- [7] Directive 98/79/EC of the European Parliament i of the Council of 27 October 1998 on in vitro diagnostic medical devices, Official Journal of the European Communities Legislation L 331, Vol. 41, pp. 1-37. Publications Office of the Europe, Belgium, 1998.
- [8] Directive 2006/42/EC of the European Parliament i of the Council on machinery, i amending Directive 95/16/EC (recast), Official Journal of European Union Legislation L 157, Volume 49, pp. 24-86. Office for Official publications of the European Communities, Luxembourg, 2006.
- [9] Regulation (EU) 2023/1230 of the European Parliament i of the Council of 14 June 2023 on machinery i repealing Directive 2006/42/EC of the European Parliament i of the Council i Council Directive 73/361/EEC, Official Journal of European Union Legislation L 165, Volume 66, pp. 1-102. EUR-LEX, Luxembourg, 2023.
- [10] <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/38022>
- [11] Etienne, P., Žunjić, A., Ferreira, P., Míchez, B., Szabo, G. (2022). Inter connections between ergonomics i EU Machinery Directive – a stipoint of the Federation of European Ergonomics Societies (FEES). *IETI Transactions on Engineering Research i Practice*, vol. 6, no. 1, p.p. 1-14
- [12] <https://osha.europa.eu/en/legislation/directive/regulation-20231230eu-machinery>

ZAHVALNICA

Ovaj rad je rezultat istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije po Ugovorima o finansiranju naučnoistraživačkog rada br. 451-03-65/2024-03/200105 i br. 451-03-66/2024-03/200029.

KARAKTERISTIKE WEIBULLOVE DISTRIBUCIJE I PRIMJENA U POUZDANOSTI I ODRŽAVANJU KONSTRUKCIJA

CHARACTERISTICS AND APPLICATION OF THE WEIBULL DISTRIBUTION IN STRUCTURAL RELIABILITY AND MAINTENANCE

Sanel Gredelj, dr sc., vanredni profesor
Fatka Kulenović, dr sc., vanredni profesor
Atif Hodžić, dr sc., redovni profesor
Tehnički fakultet Univerziteta u Bihaću
Irfana Ljubijankića bb, Bihać

REZIME

Weibullova distribucija je, sa normalnom i eksponencijalnom, najvažnija distribucija u teoriji pouzdanosti i održavanju. Naziv je dobila po E. H. W. Weibull-u. Weibullova distribucija u sebi ima inkorporiranih više drugih distribucija, što je i njena najveća prednost. Primjenjuje se u svim područjima pouzdanosti i održavanja. U ovom radu analizirane su karakteristike Weibullove distribucije. Zatim je definisana pouzdanost konstrukcije u funkciji napona koja je trenutna pouzdanost, sa tendencijom pada u vremenu. Nakon toga je je obrađena primjena Weibullove distribucije u pouzdanosti i održavanju konstrukcija, sa numeričkim primjerom. Prednost primjene Weibullove distribucije je da ne zavisi od faze eksploatacije i distribucije otkaza.

Ključne riječi: konstrukcija, pouzdanost, održavanje, Weibullova distribucija

ABSTRACT

The Weibull distribution is, along with the normal and exponential distributions, the most important distribution in the theory of reliability and maintenance. The distribution is named after E. H. W. Weibull. The Weibull distribution incorporates several other distributions, which is its biggest advantage. It is applied in all areas of reliability and maintenance. This paper analyzes the characteristics of the Weibull distribution. Then, the reliability of the structure is defined as a function of the load and capacity of structure, which is the instantaneous reliability, with a tendency to decrease over time. After that, the application of the Weibull distribution in the reliability and maintenance of structures was discussed, with a numerical example. The advantage of using the Weibull distribution is the application regardless of value of the hazard rate function.

Keywords: maintenance, reliability, structure, Weibull distribution

1. UVOD

Teorijska funkcija distribucije i gustina distribucije vjerovatnoća predstavljaju potpune karakteristike slučajne varijable. Najvažnije distribucije diskretne slučajne varijable su: binomna, hipergeometrijska, geometrijska, negativna binomna, Pascalova i Poissonova distribucija. Za neprekidne slučajne varijable najvažnije distribucije su: uniformna, eksponencijalna, hiperekspencijalna, Erlangova, Gaussova (normalna) distribucija, logaritamska normalna, Gama i Beta distribucija, Hi-kvadrat, Studentova, Fisherova, Snedecorova, Weibullova i Power Komal distribucija. [1,2,3] U inženjerstvu pouzdanosti i održavanju tehničkih sistema najviše se koriste eksponencijalna, normalna i Weibullova distribucija. Većina distribucija su dvoparametarske ili troparametarske. Najvažnija osobina Weibullove distribucije da u zavisnosti od vrijednosti nekog parametra postaje neka druga distribucija, koja u konkretnom slučaju najbolje rješava postavljene zadatke. Odnosno, Weibullove distribucija u sebi ima inkorporiranih više drugih teorijskih distribucija, što je njena najveća prednost.

Weibullovu distribuciju je predstavio i uveo 1939. godine švedski naučnik njemačkog porijekla Ernst Hjalmar Waloddi Weibull (1887- 1979), po kome je i dobila naziv. Weibull je studirao na Kraljevskom institutu za tehnologiju u Stockholmu, gdje je diplomirao 1924. godine, a doktorirao na Uppsali 1932. godine. Velik dio svoje karijere proveo je u Kraljevskoj Švedskoj obalnoj straži, kojoj se pridružio 1904. godine kao pitomac, a u kojoj je dostigao čin majora 1940. godine. U početku naučnog rada bavio se proučavanjem efekata podvodnih eksplozija, a kasnije vijekom trajanja komponenti. Za Weibullovu distribuciju Američko društvo inženjera mašinstva dodijelilo mu je 1972. godine zlatnu medalju navodeći ga kao "pionira u proučavanju loma, zamora i pouzdanosti". Takođe je dobio 1978. godine zlatnu medalju (the Great Gold medal) od Kraljevske Švedske akademije koju mu je lično uručio kralj Švedske Carl XVI Gustav. [4]

2. KARAKTERISTIKE WEIBULLOVE DISTRIBUCIJE

Slučajna varijabla X ima Weibullovu distribuciju sa parametrima η , β i γ ako je njena funkcija gustina vjerovatnoća [5]:

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta - \gamma} \left(\frac{x - \gamma}{\eta - \gamma} \right)^{\beta - 1} e^{-\left(\frac{x - \gamma}{\eta - \gamma} \right)^{\beta}}, \quad x \geq \gamma, \beta > 0, \eta > 0, \quad \dots (1)$$

gdje su [6]:

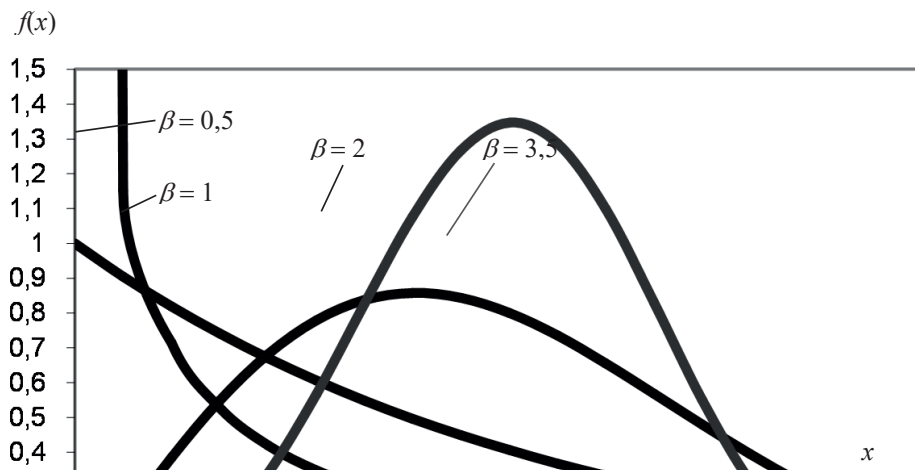
η - parametar razmjere koji označava gdje se približno nalazi sredina distribucije;

β - parametar oblika od kojeg zavisi oblik funkcije i

γ - parametar položaja i označava minimalnu vrijednost slučajne varijable

koja se može ostvariti, najčešće je $\gamma = 0$.

Weibullova distribucija može biti dvoparametarska i troparametarska. Ako u formuli (1) egzistiraju sva tri parametra, tada je Weibullova distribucija troparametarska, a ako egzistiraju parametri η i β , bez γ , tj. $\gamma = 0$ radi se o dvoparametarskoj distribuciji. Više se koristi i pogodnija je dvoparametarska distribucija, koja se i razmatra u ovom radu, posebno kada je slučajna varijabla X vrijeme koje je definisano u pozitivnom skupu realnih brojeva.



Slika 1. Gustina Weibullove distribucije za različito β , $\eta = 1$ i $\gamma = 0$

U zavisnosti od parametra β mijenja se i oblik funkcije gustine vjerovatnoća Weibullove distribucije, slika 1. Za male vrijednosti β , pri čemu je $\beta < 1$ dobija se tzv. hipereksponecijalna distribucija [7]. Za $\beta = 1$ radi se o eksponencijalnoj distribuciji. Za $\beta > 1$ funkcija distribucije je $f(0) = 0$, da bi porastom vrijednosti x dostigla maksimum, a nakon toga dobila opadajući karakter. Za povećanjem parametra β maksimum funkcije gustine sve se više pomjera u desnu stranu i sve više poprima oblik normalne distribucije. Prema tome, Weibullova distribucija u sebi ima inkorporiranih više drugih distribucija, što je njena najveća prednost u odnosu na druge distribucije. Međutim to nije osobina samo ove distribucije. Takvu osobinu imaju još neke višeparametarske raspodjele kao što su Studentova, Hi-kvadrat i Beta distribucija [8].

Kumulativna funkcija vjerovatnoće Weibullove distribucija je :

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} \quad \dots (2)$$

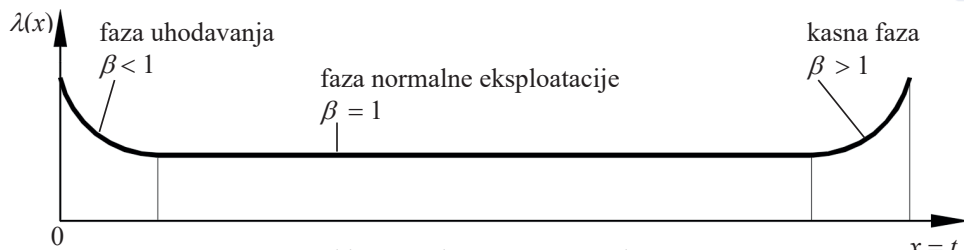
Funkcija vjerovatnoće (2) predstavlja vjerovatnoća otkaza, ako varijabla x predstavlja vrijeme. Funkcija pouzdanosti je komplement funkcije (2):

$$R(x) = 1 - F(x) = e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} \quad \dots (3)$$

Funkcija intenziteta otkaza Weibullove distribucija je [5]:

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)} = \frac{f(x)}{R(x)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad \dots (4)$$

Funkcija (4) pokazuje da kada je $\beta < 1$ intenzitet otkaza ima karakteristiku ranih otkaza (uhodavanje, početni period), kada je $\beta = 1$ radi se o slučajnim otkazima (period normalne eksploatacije), a kada je $\beta > 1$, radi se o periodu kasnih otkaza uslijed istrošenosti ili o progresivnim otkazima, kada λ ima stalan porast u vremenu, slika 2. [6,9]



Slika 2. Funkcija intenziteta otkaza [3]

Ostale karakteristike Weibullove distribucija su [3]:

Medijana:
$$M_e = \eta \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}}, \quad \dots (5)$$

mod (modus):
$$M_o = \eta \left(\frac{\beta - 1}{\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}}, \text{ za } \beta > 0, \quad \dots (6)$$

matematičko očekivanje:
$$M(X) = \eta \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right), \quad \dots (7)$$

disperzija:
$$D(X) = \sigma_x^2 = \eta^2 \cdot \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right], \quad \dots (8)$$

obični moment r -tog reda:
$$m_r = \eta^r \cdot \Gamma \left(1 + \frac{r}{\beta} \right), \quad \dots (9)$$

koeficijent asimetrije:
$$K_A = \frac{\eta^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{\beta} \right) - \eta^3 \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)^2 \Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) + \eta^3 \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]^3}{\left[\sqrt{\eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)} \right]^3}, \quad \dots (10)$$

koeficijent ekscesa:

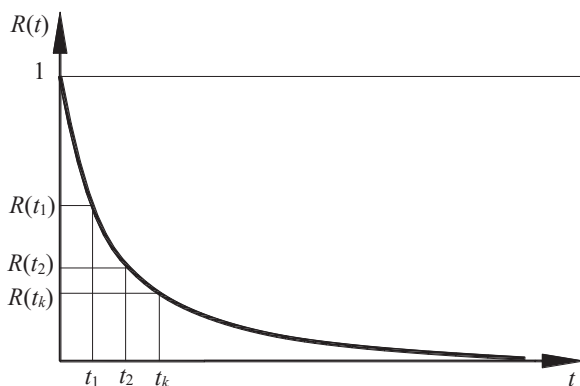
$$K_E = \frac{\Gamma \left(1 + \frac{4}{\beta} \right) - 4 \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{\beta} \right) + 6 \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]^2 \Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - 3 \left[\Gamma \left(1 + \frac{4}{\beta} \right) \right]^4}{\left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]^2}. \quad \dots (11)$$

U jednačinama (7) do (10) $\Gamma(p)$ je *gamma* funkcija ili Eulerova funkcija druge vrste:

$$\Gamma(p) = \int_0^{\infty} t^{p-1} e^{-t} dt, \quad p > 0. \quad \dots (12)$$

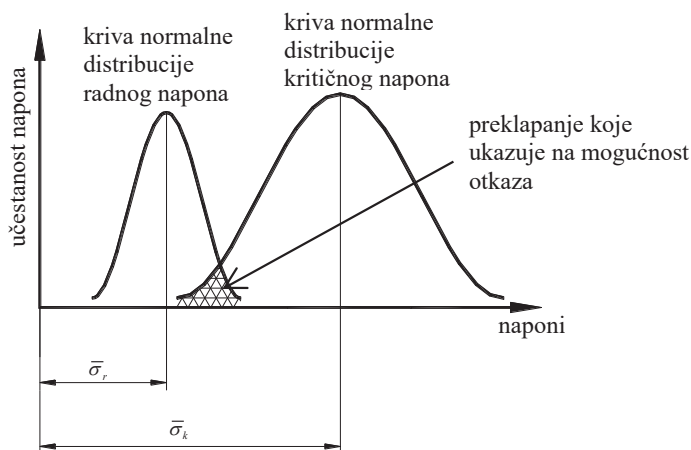
3. TRENUTNA I KRITIČNA POUZDANOST KONSTRUKCIJE

Pouzdanost se zasniva na vremenu rada kao resursu trajanja sistema. Odnosno, pouzdanost je dinamička veličina, sa tendencijom pada u vremenu [10]. To znači da pouzdanost ima tendenciju pada u vremenu, ukoliko se u međuvremenu ne vrši održavanje sistema, odnosno poboljšanje procesa, slika 3.



Slika 3. Pouzdanost sistema u funkciji vremena bez održavanja

Za određivanje pouzdanosti u tačno određenom i relativno kratkom vremenskom intervalu koriste se druge veličine koje imaju slučajni karakter. Tako se pouzdanost konstrukcija definiše kao vjerovatnoća da je kritično opterećenje veće od radnog opterećenja, slika 4. Pouzdanosti za tačno određeno i relativno kratak vremenski interval naziva se trenutna pouzdanost. Eksperimenti se najčešći i najpouzdaniji način za određivanje trenutne pouzdanosti. [5,9]



Slika 4. Međusobni položaj krivih normalne raspodjele radnog i kritičnog napona

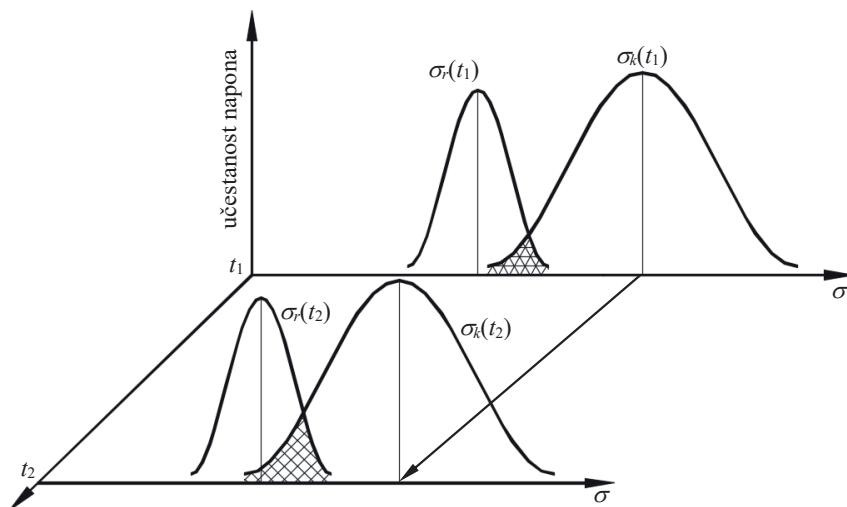
Pouzdanost konstrukcije direktno zavisi od veličine područja preklapanja krivih distribucije radnog (opterećenje) i kritičnog (čvrstoća materijala) napona, slika 4. Protokom vremena se kriva kritičnog napona pomjera ulijevo i širi, usljed zamora materijala i drugih faktora, sa čim se područje preklapanja povećava i pouzdanost konstrukcije smanjuje, slike 3. i 5.

Radni i kritični naponi se određuju preko srednje vrijednosti i odstupanja napona [7]:

$$\sigma_r = \bar{\sigma}_r \pm \Delta\sigma_r, \quad \dots (13)$$

$$\sigma_k = \bar{\sigma}_k \pm \Delta\sigma_k, \quad \dots (14)$$

gdje su $\bar{\sigma}_r$ i $\bar{\sigma}_k$ srednje vrijednosti napona, a $\Delta\sigma_r$ i $\Delta\sigma_k$ odstupanja od srednje vrijednosti.



Slika 5. Vremenska promjena položaja krivih normalne raspodjele radnog i kritičnog napona

Trenutna pouzdanost konstrukcije u trenutku t_1 (identično je i za t_2) je [9]:

$$R(t_1) = 1 - \Phi_1, \quad \dots (15)$$

gdje je:

$$\Phi_1(t_1) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{z_0(t_1)} \cdot e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad \dots (16)$$

integral standardizovane normalne raspodjele, sa matematičkim očekivanjem nula i devijacijom 1, sa donjom granicom $-\infty$, koji u ovom slučaju odgovara vjerovatnoći otkaza, a

$$z_0(t_1) = -\frac{3 \cdot (\bar{\sigma}_k(t_1) - \bar{\sigma}_r(t_1))}{\sqrt{\Delta\sigma(t_1)_k^2 + \Delta\sigma(t_1)_r^2}}. \quad \dots (17)$$

Prema slici 5. dolazi do pada pouzdanosti konstrukcije u periodu t_1 do t_2 . Protokom vremena u kritičnom trenutku t_k pouzdanost poprima kritičnu vrijednost $R(t_k)$ koja ukazuje da je u daljnjoj eksploataciji velika vjerovatnoća otkaza konstrukcije. Kritična pouzdanost konstrukcije $R(t_k)$, nakon čijeg nastanka bi se trebalo izvršiti preventivno održavanje ili remont, zavisi od konkretnih uslova eksploatacije i namjene konstrukcije. Prema konceptu 6σ najveći nivo uspješnosti (savršenstva) je ekvivalentan pojavi 3,4 greške na milion mogućnosti (DPMO – Defects Per Million Opportunities), što znači da je $R(t_k) = 0,999996$ [11]. Ako je ova kritična pouzdanost prevelika, usvaja se manja, zavisno od realnih uslova.

Međutim, ako se ispitivanjem dobije da je trenutna pouzdanost konstrukcije manja od kritične pouzdanosti, to znači je rizik otkaza konstrukcije velik i potrebno je odmah izvršiti održavanje, ako otkaz veći i nije nastao.

4. PRIMJENA WEIBULLOVE DISTRIBUCIJE

Za određivanje kritičnog trenutka t_k pouzdanost koristi se funkcija pouzdanosti Weibullove distribucije (3). Pri tome nije potrebno poznavati starost konstrukcije, odnosno fazu njene eksploatacije (rana faza, normalna eksploatacija ili kasna faza), slika 2.

Trenutne vrijednosti funkcije pouzdanosti konstrukcije u vremenskim trenucima t_1 i t_2 se određuju prema formuli (3):

$$R(t_1) = e^{-\left(\frac{t_1}{\eta}\right)^\beta}, \quad \dots (18)$$

$$R(t_2) = e^{-\left(\frac{t_2}{\eta}\right)^\beta}. \quad \dots (19)$$

Logaritmovanjem i međusobnim dijeljenjem izraza (18) i (19) dobije se parametar oblika:

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\ln R(t_1)}{\ln R(t_2)}\right)}{\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)}. \quad \dots (20)$$

Iz izraza (18), s tim da je prethodno određeno β prema (20), dobije se izraz za parametar razmjere:

$$\eta = \frac{t_1}{\sqrt[\beta]{-\ln R(t_1)}}. \quad \dots (21)$$

Uvrštavanjem izraza (20) i (21) u izraz (2) dobije se funkcija pouzdanosti Weibullove raspodjele u zavisnosti od vremena, ako su poznate trenutne pouzdanosti u trenucima t_1 i t_2 :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\frac{t_1}{\sqrt[\beta]{-\ln R(t_1)}}}\right)^{\frac{\ln\left(\frac{\ln R(t_1)}{\ln R(t_2)}\right)}{\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)}}. \quad \dots (22)$$

Uvođenjem smjena $R(t) = R(t_k)$ i $t = t_k$ u formulu (22) i uvrštavanjem formula (20) i (21) dobije se izraz za kritični trenutak t_k :

$$t_k = -\eta \cdot \sqrt[\beta]{-\ln R(t_k)}. \quad \dots (23)$$

Formula (23) definiše vrijeme do kada će konstrukcija biti pouzdana, bez obzira o kojoj fazi eksploatacije se radi, odnosno nezavisno od vrste distribucije otkaza, slika 2. To znači da se

predviđa stanje konstrukcije u budućnosti na osnovu ispitivanja konstrukcije u prošlosti i sadašnjosti.

5. NUMERIČKI PRIMJER

Ispitivanjem konstrukcije dobije da je radni napon u trenutku t_1 $\sigma_r(t_1)=80\pm 2$ [N/mm²] i kritični napon $\sigma_k(t_1)=90\pm 8$ [N/mm²]. Nakon 30 dana, odnosu u u trenutku t_2 , ispitivanjem se dobije se isti radni napon $\sigma_r(t_2)=80\pm 2$ [N/mm²] i $\sigma_k(t_2)=89\pm 10$ [N/mm²]. Dakle, zbog zamora i trošenja materijala promjenila se vrijednost kritičnog napona. Korištenjem obrazaca (15), (16) i (17) dobije se da su: $z_0(t_1)=-3,638 \Rightarrow R(t_1)=0,999863$ i $z_0(t_2)=-3,648 \Rightarrow R(t_1)=0,995946$. Na osnovu toga se primjenom formula (20) i (21) dobiju vrijednosti parametara Weibullove distribucije $\beta=0,9957$ i $\eta=7541,8$, što znači da konstrukcija iz faze uhodavanja prelazi u fazu normalne eksploatacije, slika 2. Ako se usvoji kritična pouzdanost $R(t_k)=0,99$, odnosno da je rizik otkaza 1%, kritični trenutak t_k nakon kojeg bi trebalo izvršiti preventivno održavanje ili remont korištenjem formule (23) je $t_k=74,5$ dana nakon prvog, odnosno 44,5 dana nakon drugog ispitivanja.

6. ZAKLJUČAK

Weibulova distribucija se veoma često koristi u praktičnim primjenama pouzdanosti i održavanja. U ovom radu pokazana je primjena u pouzdanosti konstrukcija. Dok je primjena eksponencijalne distribucije ograničena zbog pretpostavke o konstantnoj vrijednosti intenziteta otkaza, primjena Weibullove distribucije ne zavisi od faze eksploatacije. Osim kritičnog trenutka nakon kojeg je neophodno izvršiti održavanje ili remont, primjenom Weibullove distribucije određuje se i faza eksploatacije sistema, što je korisna informacija posebno ako se radi o konstrukcijama koje su u eksploataciji duže vrijeme. Navedena metoda je posebno korisna ako se radi o konstrukcijama čija pouzdanost istovremeno podrazumjeva i sigurnost po zdravlje i život ljudi i sigurnost okoline, te se može shvatiti i kao prognoza stanja konstrukcije u nekom budućem vremenu

7. REFERENCE

- [1] Ramović, M., R.: Pouzdanost sistema, Elektrotehnički fakultet, Beograd, RS, 2005.
- [2] Shanker, R., Ray, M., Prodhani, R., H.: Power Komal distribution with properties and application in reliability engineering, Electronic Journal Reliability: Theory & Applications, Volume 18, 2023.
- [3] Kailash, C, K., Pecht, T.: Reliability Engineering, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2014.
- [4] <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/oi/authority.20110803121608170>
- [5] Vujanović N.: Teorija pouzdanosti tehničkih sistema, II izdanje, Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd, RS, 1990.
- [6] Milčić D.: Pouzdanost mašinskih sistema, Mašinski fakultet, Niš, RS, 2005.
- [7] Jovičić, S.: Osnovi pouzdanosti mašinskih konstrukcija, Naučna knjiga, Beograd, RS, 1990.
- [8] Merkle, M.: Verovatnoća i statistika, Akademska misao, Beograd, RS, 2002.
- [9] Gredelj S., Halilagić R.: Pouzdanost konstrukcija i procesa, Tehnički fakultet, Bihać, BiH, 2021.
- [10] Mijović B.: Održavanje strojeva i uređaja, Veleučilište u Karlovcu, RH, 2019.
- [11] Park H. S.: Six Sigma for Quality and Productivity Promotion, Asian Productivity Organization, Tokyo, Japan, 2003.

PRIMJENA TERMOVIZIJSKE TEHNIKE U UTVRĐIVANJU LOŠIH MEHANIČKIH SPOJEVA U STRUJNIM KRUGOVIMA

APPLICATION OF THERMAL VISION TECHNIQUE IN DETERMINING BAD MECHANICAL CONNECTIONS IN CIRCUITS

Vjenceslav Damičević,
Prof.dr.sc. Marinko Stojkov,
Prof.dr.sc. Marija Živić,
Dr.sc. Antun Barac,
Matej Đuranović,
Doc.dr.sc. Mario Holik
Sveučilište u Slavskom Brodu
Trg I. Brlić Mažuranić 2, Slavonski
Brod, Republika Hrvatska

Domagoj Kovačević, student
Tehničkog odjela Sveučilišta u
Slavskom Brodu
Trg I. Brlić Mažuranić 2, Slavonski
Brod, Republika Hrvatska

REZIME

Termovizijska analiza, ili termografija, može se koristiti za precizno otkrivanje loših mehaničkih spojeva u strujnim krugovima elektroenergetskih sustava, omogućujući pravovremeno otkrivanje problema prije nego što dovedu do ozbiljnih kvarova ili prekida u radu. Efikasna primjena ove tehnologije zahtijeva poznavanje fizike kamere, pravilnog kuta snimanja te razlike između različitih detektora i kamera. U radu se opisuje funkcionalnost termovizijske kamere Ti45, proizvedene od strane Fluke Corporation, te njene ključne mogućnosti i funkcije. Kamera Ti45 praktički je primijenjena za mjerenje i analizu kvarova unutar trafostanica u Požegi i Kutjevu. Termovizijske kamere pokazale su se kao izuzetno korisne za dijagnostiku i pravovremeno otkrivanje problema poput pregrijanih spojeva, oštećenja izolacije i oksidacije. Time značajno doprinose povećanju sigurnosti i pouzdanosti sustava.

Ključne riječi: Termografija, elektroenergetski sustav, detektor, kvarovi, infracrveno zračenje, pregrijavanje električnih spojeva

ABSTRACT

Thermal imaging analysis, or thermography, can be used to accurately detect poor mechanical connections in electrical circuits of power systems, allowing for timely detection of problems before they lead to serious failures or operational interruptions. The effective application of this technology requires knowledge of camera physics, proper shooting angles, and the differences between various detectors and cameras. This paper describes the functionality of the Ti45 thermal imaging camera, manufactured by Fluke Corporation, as well as its key features and functions. The Ti45 camera was practically applied for measuring and analyzing faults within substations in Požega and Kutjevo. Thermal imaging cameras have proven to be extremely useful for diagnostics and timely detection of issues such as overheated connections, insulation damage, and oxidation, thereby significantly contributing to increased safety and system reliability.

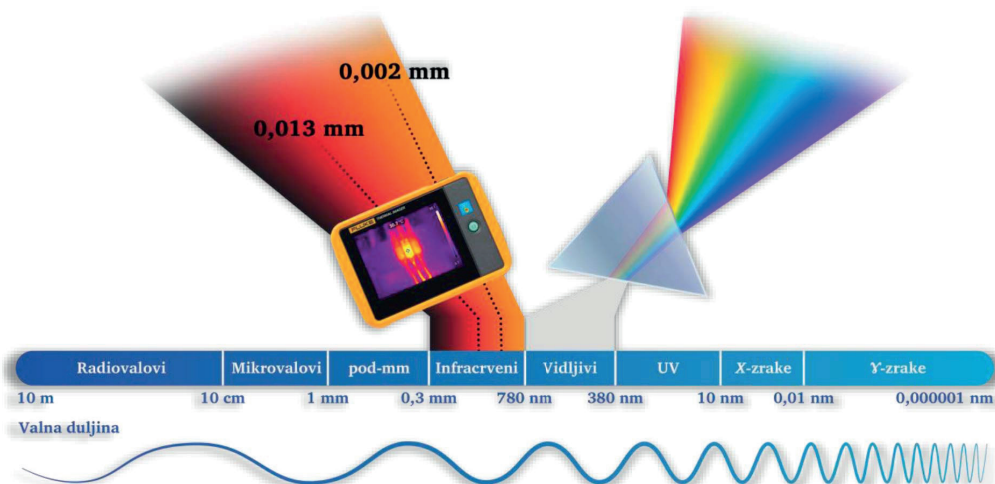
Key words: Thermography, power system, detector, faults, infrared radiation, overheating of electrical connections

1. UVOD

Termovizija je nastala iz potrebe da se proširi spektar vidljivosti, odnosno da se vidi nevidljivo. Prvi eksperimenti s infracrvenim sensorima izvedeni su početkom 20. stoljeća, a značajniju primjenu dobivaju u razdoblju između dva svjetska rata kada i počinje njihov strelovit razvoj. Sredinom 60-ih godina dvadesetog stoljeća pojavljuju se prve komercijalne termovizijske kamere, a sredinom 80-ih one počinju biti složenije i koriste više detektora. Kako bi se dobila konačna slika, slika s objektom prenosi se preko optike na matricu detektora koja se sastoji od stotinu linija, a svaka linija od stotinu detektorskih elemenata koji pokrivaju čitavu površinu na koju se projicira slika. Takav tip detektora zove se FPA (eng. Focal Plane Array). Takav mehanički tip stvaranja slike, tzv. tehnologijom rotirajućih prizmi, zahtijevalo je posebno hlađenje uređaja tekućim dušikom što je ograničavalo mobilnost uređaja, što je bilo uzrokom da se infracrvene kamere upotrebljavaju u laboratorijima, [1].

Termografska kamera je uređaj koji generira sliku na temelju infracrvenog zračenja, slično kao što obična digitalna kamera koristi vidljivu svjetlost za stvaranje slike. Dok su standardne kamere osjetljive na valne duljine svjetlosti u rasponu od 400-700 nm, termografske kamere detektiraju infracrveno zračenje u rasponu od približno 1 μm do 14 μm što je prikazano na slici 1. Zbog svoje sposobnosti brzog otkrivanja temperaturnih razlika, termografske kamere često su prvi izbor za inspekciju u programima preventivnog održavanja. One omogućuju brzo uspoređivanje toplinskih mjerenja na opremi i uređajima, bez potrebe za prekidom rada. Ako se detektiraju odstupanja u temperaturi u odnosu na prethodna mjerenja, moguće je koristiti dodatne dijagnostičke tehnologije, poput analize motornih krugova, vibracijskih analiza ili analize maziva, kako bi se otkrio uzrok problema i poduzele potrebne mjere, [2].

Danas se sve češće koristi za redovite preglede i preventivno održavanje te nadzor elektroenergetskih postrojenja. Uz redovitu i pravilnu upotrebu, osigurava očuvanje pogona te nesmetan rad strojeva i uređaja. Ova metoda posebno dobre rezultate daje kod otkrivanja kvarova u ranoj fazi čime se točno može identificirati potencijalno mjesto kvara na promatranom elementu, [3].



Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja

2. OPIS POSTUPKA I MJERENJA TERMOVIZIJSKOM KAMEROM

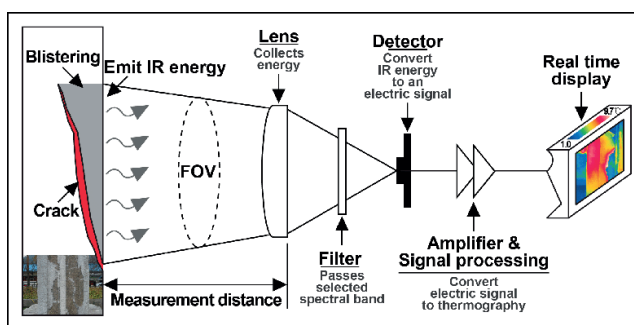
Termovizijske kamere rade na principu prikupljanja podataka o temperaturi objekata koje snimaju, a ti podaci se zatim obrađuju kako bi se stvorio termogram. Zbog visokih troškova nabave i održavanja, specifične primjene te tehničke kompleksnosti termovizijske kamere usprkos svojoj širokoj primjenjivosti i dalje nisu postale uobičajena oprema u industrijskim postrojenjima.

Ovisno o proizvođaču, kamere najčešće imaju između dva i pet temperaturnih raspona. Temperaturni rasponi označavaju granice unutar kojih kamera može precizno mjeriti temperaturu; širi rasponi i manji broj istih olakšavaju rad s kamerom. Temperaturni rasponi su važni jer omogućuju kontrolu količine zračenja koja dolazi do detektora, čime se sprječava njegovo zasićenje energijom te osigurava bolju kvalitetu prikaza slike.

Osim temperaturnih raspona, termovizijske kamere obično posjeduju i druge ključne funkcije, poput izoterme (isotherm), polja (array) i mjerača temperaturnih točaka (spot meter). Jednom kada je snimka snimljena nije moguće izmijeniti temperaturno područje, kompoziciju slike i optički fokus pa je zato potrebno uložiti neko vrijeme za pripremu samog eksperimenta kako bi se osigurali kvalitetni rezultati mjerenja. Prije početka snimanja potrebno je provesti kalibraciju kamere koja će se koristiti za mjerenje. Kalibracija infracrvenog sustava provodi se korištenjem principa crnog tijela. Jedan primjer takvog tijela namijenjenog za kalibraciju je Omega BB703, [4].

2.1. Princip rada termovizijske kamere

Termovizijska kamera termografsku snimku stvara mjerenjem infracrvenog zračenja tijela koje se snima ili cjelokupne njegove okoline. Svaka termovizijska kamera u sebi sadrži software koji vrši neophodnu korekciju pri pretvorbi termografske snimke u odgovarajući termogram, koji predstavlja aproksimaciju točne temperature, [5]. Princip nastanka vidljive slike uporabom termovizijske kamere prikazan je na slici 2.



Slika 2. Shematski prikaz nastanka vidljive slike uporabom termovizijske kamere, [6]

Iz sheme se može zaključiti kako je radni princip termovizijskih kamera vrlo sličan onom kod filmskih kamera, pri čemu infracrveno zračenje prolazi kroz leću do detektora. Kada infracrveno zračenje dođe do detektora započinju sljedeći procesi:

- Detektor generira električni signal koji varira ovisno o intenzitetu zračenja,
- Ovaj električni signal se pojačava i digitalizira,
- Signal se pretvara u vidljivu sliku koju korisnik može vidjeti kroz okular.

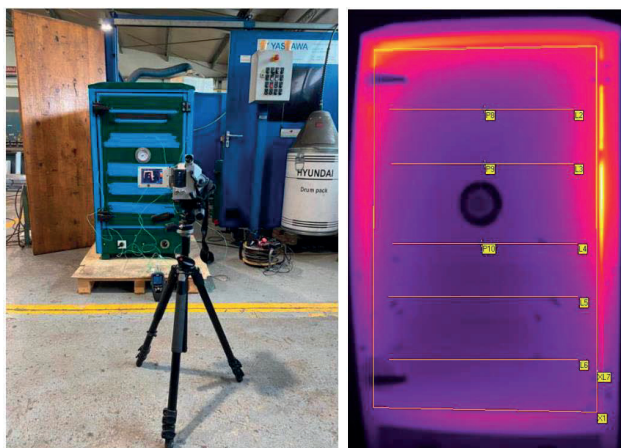
Termovizijska kamera uzima u obzir emisijski faktor, udaljenost objekta i temperaturu okoline te sve te podatke obrađuje pomoću integriranog procesora kako bi pružila točne vrijednosti temperature površine mjenenog objekta. Međutim, snimanje termovizijskom kamerom samo po sebi nije dovoljno – neophodna je dodatna analiza prikupljenih podataka pomoću specijalizirane računalne opreme i softverskih aplikacija, što uključuje i izradu protokola za termovizijsko snimanje, [1].

2.2. Termografska snimka

Postoje dvije osnovne razlike između vizualne i termografske snimke:

1. Vizualna snimka nastaje refleksijom vidljive svjetlosti, dok termografska snimka dolazi iz kombinacije emisije i refleksije infracrvenog zračenja objekta.
2. Vizualna snimka prikazuje boje i intenzitet svjetlosti, dok termografska slika prikazuje samo intenzitet zračenja.

Ako objekt nije dovoljno visoke temperature, u vizualnom spektru vidimo refleksiju svjetlosti iz drugih izvora. Boje koje vidimo rezultat su te refleksije. U infracrvenom spektru, refleksija se nastoji minimizirati kako bi se fokusirali na objekte s visokom emisivnošću i niskom refleksijom. Kamera koja snima u infracrvenom rasponu od 8-12 μm ne može razlikovati valne duljine unutar tog raspona, već samo intenzitet cjelokupnog infracrvenog zračenja u svom području promatranja.



Slika 3. Primjer eksperimenta i dobivene termografske snimke, [7]

Na slici 3 prikazan je proces snimanja primjenom termovizijske kamere i primjer jedne termografske snimke. Na desnom dijelu slike može se vidjeti kako su prikazane točne temperature u točkama koje su izabrane za mjerenje. One su na slici označene slovom P i pripadajućim brojem, a postavljene su na različite dijelove objekta koji se mjeri kako bi se vidjela kolika je zagrijanost u tom njegovom dijelu i koliko je on dobro izoliran. Osim točaka ova termografska snimka posjeduje i linije na kojima se te točke nalaze, a označene su velikim slovom L i odgovarajućim brojem te površine označene slovom X, [7].

3. KARAKTERISTIKE KAMERE Ti45

Prilikom istraživanja provedenog u svrhu pisanja ovog rada korištena je kamera Ti45 proizvođača Fluke Corporation koja pripada razredu visokokvalitetnih kamera te je zbog svojih karakteristika pogodna za snimanje svih temperatura. Kamera je vrlo jednostavna za korištenje, a njome se upravlja putem ekrana osjetljivog na dodir. Osnovne karakteristike termovizijske kamere Fluke Ti45 prikazane su u tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike termovizijske kamere Ti45

Karakteristike termovizijske kamere Ti45	
Rezolucija infracrvenog svjetla	320x240 piksela
Rotacija objektiva	180°
Vrsta fokusa	Ručno i automatsko podešavanje nivoa i opsega temperature
Termalna osjetljivost	$\leq 0,08$ °C
Temperaturno područje	Od -20 °C do 600 °C
Točnost mjerenja	± 2 °C ili 2%
Frekvencija osvježavanja	30 Hz

Fluke Ti45 termovizijska kamera, dio Ti4x serije, sofisticirani je instrument za visoko preciznu termografiju, opremljena neohlađenim mikrobolometrom s fokalnom ravninom (FPA) rezolucije 320 x 240 piksela, koji omogućuje termografsko snimanje visoke kvalitete. S najmanjom temperaturnom razlikom koju može zabilježiti od 0,08 °C pri 30 °C i operativnim temperaturnim rasponom od -20 °C do 600 °C, uz točnost mjerenja od ± 2 °C ili $\pm 2\%$, kamera je iznimno pouzdana. Nudi vidno polje od 23° x 17° sa standardnom lećom te mogućnošću promjene objektiva sadrži napredne funkcije poput min/max detekcije, automatske detekcije vrućih i hladnih točaka, izoterma te korekciju emisivnosti i pozadinske temperature. Kamera ima 180-stupanjski artikulirajući spoj leće, LCD zaslon visoke rezolucije čitljiv na suncu, osam paleta boja i jednostavno sučelje bazirano na Windows CE, što je čini izuzetno svestranim alatom za znanstvene i industrijske primjene.

4. MJERENJE I ANALIZA REZULTATA MJERENJA

U ovom radu prikazana je praktična primjenjivost termovizijske kamere Fluke Ti45 na primjerima iz svakodnevnog života u našoj neposrednoj okolini. U sklopu istraživanja provedena su mjerenja unutar transformatorske stanice u Požegi i transformatorske stanice u Kutjevu. Transformatorska stanica je jedan od najvažnijih dijelova opreme električne mreže jer problemi na nekom njenom elementu utječu na stabilnost cjelokupnog sustava dobave električne energije, [8]. Dobiveni rezultati i njihova analiza bit će prikazani u daljnjem dijelu ovog rada. Prije početka mjerenja provedena je kalibracija kamere primjenom crnog tijela.

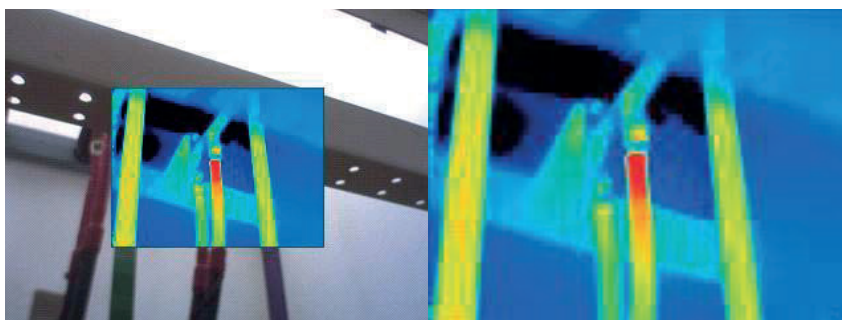
4.1. Mjerenje TS 35/10 kV Požega

Objekt promatranja bile su kableske stopice na transformatorskom polju (TP) 1 napona 10 kV radi utvrđivanja problema njihovog povećanog zagrijavanja što je vidljivo na slici 4. U tabeli 2 prikazani su parametri objekta na kojem se provodilo mjerenje.

Tabela 2. Parametri objekta na kojem je vršeno mjerenje

Parametri objekta:	
Nazivno opterećenje I_n , A	600
Emisijski faktor ε , -	0,95
Reflektirana temperatura T_{amb} , °C	20
Temperatura zraka T_{atm} , °C	12
Relativna vlažnost zraka φ , %	-
Brzina strujanja zraka w , m/s	-
Udaljenost δ , m	7
Trenutno opterećenje I_{mj} , A	170
EkspONENT $n(1,6-2,0)$, -	1,68

S ciljem preventivnog održavanja na teren je izašla ekipa zadužena za mjerenje. Mjerenje je provedeno na način da se stopice optereće strujom jakosti 170 A dok je maksimalni iznos opterećenja u ovakvom pogonu 600 A. Upotrebom termovizijske kamere dobiven je vizualni prikaz kablskih stopica koji je prikazan na slici 4. Daljnjim analiziranjem snimke dobiven je termogram koji se može vidjeti u tabeli 3.



Slika 4. Kabske stopice na TS 35/10 kV – Požega

Pregledom termografske snimke vidljive na slici 4 može se vidjeti pojava povećanog zagrijavanja na jednoj od nekoliko mjerenih kablskih stopica. Crvena boja na slici predstavlja objekte najviše temperature, a plava boja objekte najniže temperature. Sve kabske stopice za vrijeme mjerenja bile su opterećene jednakim opterećenjem od 170 A. Izmjerene temperature i njihova razlika prikazane su u tabeli 3.

Tabela 3. Analiza termograma TS 35/10 kV – Požega

Analiza termograma:	
T_1 , °C	23,5
T_0 , °C	20,8
Pri trenutnom opterećenju $\Delta T = (T_1 - T_0)$, °C	2,7
Pri stopostotnom opterećenju, °C:	
$\Delta T_{\max} = \frac{\Delta T}{\left(\frac{I_{mj}}{I_n}\right)^n}$	22,46

Analizom termograma, ekipa zadužena za mjerenje oštećenja zaključila je da postoje određeni problemi kod kablskih stopica. Zbog povećanih naslaga prljavštine i nedovoljne dotegnutosti spoja dolazi do prekomjernog zagrijavanja samih kablskih stopica. S obzirom da je razlika u temperaturi ispod 10 °C nisu potrebne neke hitne korektivne radnje. Preporuka tima kao potencijalno rješenje ovog nedostatka bila je da se u periodu sljedeće revizije spoj vodiča na sabirnicu očisti i dotegne.

4.2. Mjerenje transformatorskog polja na željeznom stupu transformatorske stanice (ŽSTS) 10/0,4 kV Požega

Uz mjerenje kablskih stopica na TS 35/10 kV Požega provedeno je i mjerenje jednog transformatorskog polja na željeznom stupu transformatorske stanice u Požegi. Ova transformatorska stanica koristi se za redukciju napona sa 10 kV na 0,4 kV, a objekt mjerenja ovog puta bilo je mjesto spoja transformatorskog polja na trećoj fazi. Jednako kao i u prethodnoj analizi i ovdje je korištena termovizijska kamera Fluke Ti45. U tabeli 4 prikazani su parametri objekta istraživanja odnosno ŽSTS 10/0,4 kV Požega.

Tabela 4. Parametri objekta ŽSTS 10/0,4 kV Požega

Parametri objekta:	
Nazivno opterećenje I_n , A	250
Emisijski faktor ε , -	0,95
Reflektirana temperatura T_{amb} , °C	20
Temperatura zraka T_{atm} , °C	30
Relativna vlažnost zraka φ , %	7
Brzina strujanja zraka w , m/s	3
Udaljenost δ , m	7
Trenutno opterećenje I_{mj} , A	65,3
EkspONENT $n(1,6-2,0)$, -	1,68

Jednako kao i u prvom slučaju s ciljem smanjenja zastoja i u idealnom slučaju izbjegavanja korektivnog održavanja ekipa za mjerenje izašla je na teren i kamerom Fluke Ti45 mjerila temperature spoja transformatorskog polja na trećoj fazi. Rezultati mjerenja prikazani su u tabeli 5.

Tabela 5. Rezultati termografskog ispitivanja na ŽSTS 10/0,4 kV Požega

Analiza termograma:	
T_1 , °C	38,3
T_0 , °C	23,3
Pri trenutnom opterećenju $\Delta T = (T_1 - T_0)$, °C	15,00
Pri stopostotnom opterećenju, °C:	
$\Delta T_{max} = \frac{\Delta T}{\left(\frac{I_{mj}}{I_n}\right)^n}$	143,08

Analizom termograma došlo se do zaključka da kod spoja transformatorskog polja na trećoj fazi postoji sitan problem sa zagrijavanjem što se može vidjeti na slici 5. Na temelju rezultata preporučeno je da se mjesto kvara očisti od prašine i drugih nakupina te da se isti još jednom

pregleda za slučaj da nema još nekih dodatnih nedostataka na spojevima. S obzirom da je razlika temperatura između 10 i 20 °C za rješenje uočenog problema preporučeno je da se spoj dotegne kako se kvar ne bi prenio na transformatorsko polje.



Slika 5. Spoj transformatorskog polja na trećoj fazi ŽSTS 10/0,4 kV Požega

Jednako kao i prethodnom slučaju temperaturna skala je postavljena tako da crvena boja označava objekte viših temperatura, a plava one nižih. Na termografskom snimku primijećena je i bijela boja, a ona najčešće predstavlja temperaturu višu od najviše temperature definirane na skali.

4.3. Mjerenje ŽSTS 10/0,4 kV Kutjevo

Osim transformatorske stanice u Požegi, analizirali su se i rezultati mjerenja na elementima transformatorske stanice u Kutjevu. Objekt ovog mjerenja bio je željezni stup transformatorske stanice čije parametre prikazuje tabela 6, a element promatranja bio je spoj osigurača na izvodu broj 4.

Tabela 6. Parametri objekta ŽSTS 10/0,4 kV Kutjevo

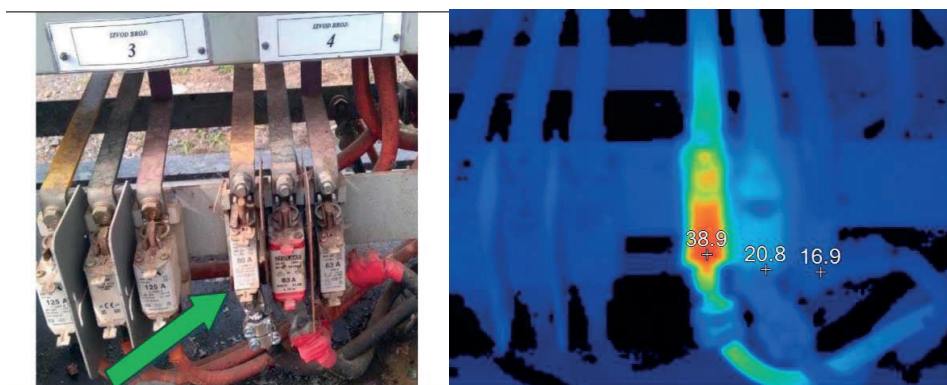
Parametri objekta:	
Nazivno opterećenje I_n , A	80
Emisijski faktor ε , -	0,95
Reflektirana temperatura T_{amb} , °C	20
Temperatura zraka T_{atm} , °C	9
Relativna vlažnost zraka φ , %	69
Brzina strujanja zraka w , m/s	3
Udaljenost δ , m	2
Trenutno opterećenje I_{mj} , A	37
EkspONENT $n(1,6-2,0)$, -	1,68

Za vrijeme mjerenja spojevi osigurača biti će opterećeni strujom jakosti 37 A dok je u ovom slučaju maksimalno odnosno nazivno opterećenje kojem spojevi osigurača mogu biti opterećeni 80 A. EkspONENT potreban za izračun maksimalne razlike temperature iznosi 1,68 i izabran je iskustveno. Nakon provedenog termovizijskog mjerenja dobiveni su rezultati koji su prikazani u tabeli 7.

Tabela 7. Rezultati termografskog ispitivanja na ŽSTS 10/0,4 kV Kutjevo

Analiza termograma:	
$T_1, ^\circ\text{C}$	38,9
$T_0, ^\circ\text{C}$	16,9
Pri trenutnom opterećenju $\Delta T = (T_1 - T_0), ^\circ\text{C}$	22,0
Pri stopostotnom opterećenju, $^\circ\text{C}$:	
$\Delta T_{\max} = \frac{\Delta T}{\left(\frac{I_{mj}}{I_n}\right)^n}$	80,36

Pregledom rezultata mjerenja, utvrđen je značajan kvar na ovom izvodu, što zahtijeva brzu intervenciju. Naime kako razlika temperatura između dva elementa iste funkcije iznosi više od 20 °C potrebno je što je prije moguće provesti korektivne radnje. Kada se u obzir uzme nazivno opterećenje, a ne ono trenutno pod kojim se provelo mjerenje uočava se značajan porast razlike u temperaturama zbog čega se zaključuje da s porastom opterećenja temperaturna razlika ima tendenciju rasta. U sklopu nadolazeće revizije, predviđa se zamjena transformatora i određenih komponenti razvodnog ormara. Uz to, potrebno je izvršiti zamjenu osigurača te njihovih pripadajućih podnožja kako bi sustav bio vraćen u ispravno stanje. Snimka dobivena mjerenjem termovizijskom kamerom prikazana je na slici 6.



Slika 6. Termografska snimka spoja osigurača

Termografska snimka jasno ukazuje na značajne temperaturne razlike između mjerenih spojeva osigurača, što predstavlja indikator ozbiljnih problema u sustavu. Daljnjom detaljnom analizom dobiveni su podaci koji zahtijevaju hitnu intervenciju tima za održavanje. Na snimci je također evidentirano povećanje temperature susjednog elementa za nekoliko stupnjeva, što ukazuje na potrebu planiranja korektivnih mjera u okviru narednog ciklusa održavanja.

5. ZAKLJUČAK

Električna energija predstavlja temelj modernog društva, omogućujući neprekidno funkcioniranje industrije, kućanstava i poljoprivrednih objekata. Pouzdana i kontinuirana opskrba električnom energijom ključna je za stabilnost svih sektora, a njezino održavanje zahtijeva stručnost i pravovremene intervencije.

Termovizijske kamere dokazale su se kao izuzetno koristan alat za dijagnostiku i rano otkrivanje anomalija u elektroenergetskim sustavima. Ovi uređaji omogućuju pravovremeno otkrivanje problema poput pregrijanih spojeva, oštećenja izolacije, oksidacije i drugih strukturnih nedostataka, što doprinosi povećanju sigurnosti i pouzdanosti sustava. Primjena termovizijske tehnologije posebno je korisna u niskonaponskim instalacijama, gdje može identificirati unutarnja oštećenja i koroziju, smanjujući troškove održavanja i rizik od ozbiljnijih kvarova, zaustavljanja pogona i potencijalnih havarija. Na ovaj način se pravovremeno mogu utvrditi loši spojevi i potencijalno uzroci budućih kvarova te na taj način izbjeći dugoročna šteta.

6. LITERATURA

- [1] Petrović K.: Infracrvena termografija (termovizija) pravi izbor za redovno održavanje, Održavanje 2010, Zenica, 2010.
- [2] Tićak A.: Primjena termovizije u ispitivanju brodskih sustava i električnih uređaja, University of Rijeka, Rijeka, 2020.
- [3] Šaraba P., Popović B., Ljuboje Zoran: Primjena termovizije u održavanju visokonaponske prenosne mreže, 17th International Symposium Infoteh-Jahorina, Jahorina, 2018.
- [4] Barac A., Živić M., Holik M., Končić R., Samardžić I.: Comparison of experimental and analytical solutions of temperature field in a submerged arc welding, Engineering Technologies in Manufacturing of Welded Constructions and Products, Slavonski Brod, 2019.
- [5] Šaraba P., Popović B., Krsmanović D.: Preventivno termovizijsko snimanje elektroenergetskih postrojenja metodom IR termografije, Infoteh-Jahorina, Jahorina, 2015.
- [6] Jo Y. H., Lee C. H., Yoo J. H.: Study on Applicability of Passive Infrared Thermography Analysis for Blistering Detection of Stone Cultural Heritage, Journal of the Korean Conservation Science for Cultural Properties, Gongju, 2013. <https://doi.org/10.12654/jcs.2013.29.1.06>
- [7] Samardžić I., Barac A., Šolić T., Šimunović S., Samardžić M., Sigumjak I., Kovačević B.: Analiza toplinske izolacije peći za sušenje elektroda, 12. Međunarodno Znanstveno-Stručno Savjetovanje SBZ, Slavonski Brod, 2023.
- [8] Utami N. Y., Tamsir Y., Pharmatrisanti A., Gumilang H., Cahyono B., Siregar R.: Evaluation Condition of Transformer Based on Infrared Thermography Results, Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin, 2009.

ULOGA IGLIČASTIH VENTILA U ODRŽAVANJU OPTIMALNIH TLAKOVA I PREVENTIVNOM ODRŽAVANJU VODOOPSKRBNIH SUSTAVA

THE ROLE OF NEEDLE VALVES IN MAINTAINING OPTIMAL PRESSURES AND PREVENTIVE MAINTENANCE OF WATER SUPPLY SYSTEMS

Krešimir Ognjenčić, mag.ing.mech
Tekija d.o.o
Vodovodna 1
HR-34000 Požega, Hrvatska

Dr.sc. Goran Šimunović
Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu
Trg Ivane Brlić-Mažuranić 2
HR-35000 Slavonski Brod, Hrvatska

SAŽETAK

Ovaj rad analizira ključnu ulogu igličastog ventila u regulaciji regionalnog vodoopskrbnog sustava Požeštine, s posebnim naglaskom na njegovu sposobnost preciznog upravljanja protokom i tlakom vode. Kroz finu kontrolu otvaranja i zatvaranja, ventil učinkovito sprječava hidrauličke udare i osigurava stabilnost sustava, prilagođavajući se promjenama u hidrološkim uvjetima. Upravljanje ventilom odvija se lokalno ili daljinski putem SCADA sustava, što omogućuje dodatnu fleksibilnost u radu sustava. Rezultati godišnjeg praćenja pokazuju visoku pouzdanost i učinkovitost ventila u održavanju stabilnih tlakova, redistribuciji viškova vode i smanjenju rizika od oštećenja sustava.

ABSTRACT

This paper analyzes the key role of the needle valve in regulating the regional water supply system of Požeština, with a particular focus on its ability to precisely control water flow and pressure. Through fine adjustments in opening and closing, the valve effectively prevents hydraulic shocks and ensures system stability, adapting to changes in hydrological conditions. The valve is operated both locally and remotely via the SCADA system, providing additional flexibility in system management. One year of monitoring results demonstrates the valve's high reliability and efficiency in maintaining stable pressures, redistributing excess water, and reducing the risk of system damage.

Ključne riječi: Igličasti ventil 1, regulacija tlakova 2, upravljanje vodnim resursima 3, vodoopskrbni sustav 4, hidraulički udar 5

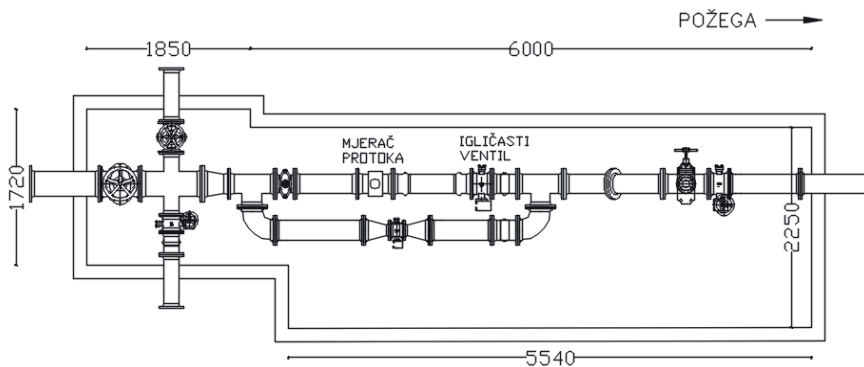
1. UVOD

Regionalni vodoopskrbni sustav Požeštine, pod upravom tvrtke Tekija d.o.o. iz Požege, predstavlja složen gravitacijsko-tlačni sustav, osmišljen za stabilnu i kontinuiranu opskrbu pitkom vodom. Njegova funkcionalnost temelji se na mreži od četiri izvorišta, jednog površinskog zahvata i tri crpilišta, čime osigurava stabilnu opskrbu pitkom prilagođavanjem promjenjivim hidrološkim uvjetima[1]. Sustav se, u razdobljima povoljnih hidroloških uvjeta, oslanja prvenstveno na izvorišta Stražemanke i Veličanke, dok se u sušnim mjesecima ili pri smanjenoj izdašnosti izvorišta osigurava nadopunjavanje potrebnih količina vode iz crpilišta. Sustav je podijeljen na dva glavna opskrba područja u uvjetima smanjene izdašnosti izvora: sjeverni dio Požeštine, koji se napaja iz crpilišta Dubočanka, te južni dio, koji se opskrbljuje crpilištima Zapadno polje i Luke u Požegi. Izvorišta smještena na sjeverozapadu Požeške kotline gravitacijski opskrbljuju naselja unutar općina Velika i Kaptol, dok se naselja na području Grada Kutjeva i općine Čaglin dodatno opskrbljuju vodom iz površinskog zahvata Kutjevačke Rike[2]. U razdobljima obilnih hidroloških resursa, višak vode preusmjerava se prema Požegi i Pleternici, čime se smanjuje potreba za crpljenjem iz lokalnih izvora uz rijeku Orljavu. Regulacija sustava obavlja se putem mjerno-regulacijskih postaja, gdje ključnu ulogu ima postaja Mihaljevci, u kojoj daljinski upravljani igličasti ventil održava optimalni tlak i protok vode u sustavu. Ovaj sustav, osmišljen kako bi odgovorio na sezonske izazove i osigurao dugoročnu održivost, predstavlja primjer tehnološki napredne i prilagodljive infrastrukture koja pruža stabilnu opskrbu vodom u različitim vremenskim uvjetima.

2. REGULACIJA

2.1. Mjerno-regulacijsko okno

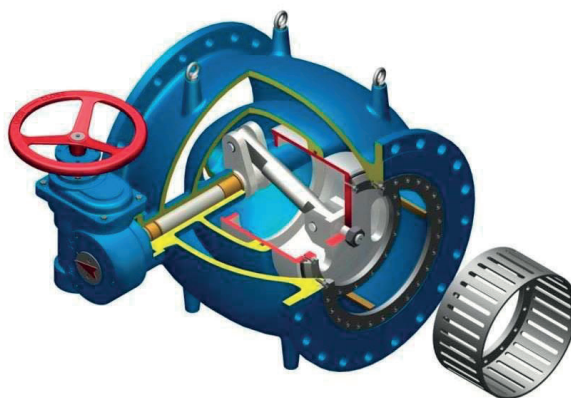
Shema mjerno-regulacijskog okna Mihaljevci prikazana je na slici 1 ilustrira ključne elemente sustava smještenog na 168,86 metara nadmorske visine. Voda koja dolazi iz smjera Velike distribuira se prema Mihaljevcima na jednu stranu, i Golobrdcima na drugu stranu. Ostatak vode se preko mjerača protoka i igličastog ventila propušta u smjeru Požege. U realnom vremenu mjere se ulazni i izlazni tlak na igličastom ventilu, trenutni protok i postotak otvorenosti igličastog ventila. Podaci se putem dvosmjerne radijske veze šalju u nadzorno upravljači centar Tekije d.o.o. U nadzorno upravljačkom centru 24 sata na dan prisutan je operater koji na temelji podataka vrlo brzo reagira na promjene u sustavu.



Slika 1. Montažna shema Mjerno-regulacijskog mjesta Mihaljevci

2.2. Igličasti ventil

Igličasti ventili (eng. needle valves) specijalizirani su ventili namijenjeni za preciznu regulaciju protoka. Ovi ventili imaju karakterističan mehanizam s igličastim klinom ili stošcem, po čemu je ventil i dobio ime, koji omogućava vrlo preciznu kontrolu protoka. Često se koriste u aplikacijama gdje je potrebna fina i precizna regulacija tlaka i brzine protoka. Budući da se klin može pomaknuti u vrlo malim koracima, igličasti ventil omogućava vrlo precizno podešavanje[4]. U potpuno zatvorenom stanju igla čvrsto nasjeda na sjedište, osiguravajući potpuno zaustavljanje protoka. Klin je polugom povezan na reduktor kojim se upravlja ručnim kolom, električnim ili hidrauličkim aktuatorima[5]. Upravo aktuatori omogućuju daljinsko upravljanje ventilom iz kontrolne sobe ili s pomoću SCADA sustava. Igličasti ventili dizajnirani su kako bi omogućili stabilan i kontroliran protok, bez naglih promjena tlakova. U većini slučajeva ponašaju se predvidljivo i omogućuju preciznu regulaciju, uz minimalne padove tlaka. Prilikom većeg zatvaranja ventila, dolazi do sužavanja prolaza, što povećava brzinu protoka i može dovesti do pojave kavitacije[6]. Upravo zbog toga, igličasti se ventil i koristi, kako bi se osigurao dovoljan protok fluida i kako bi se izbjegle nagle promjene u brzini fluida i spriječili hidraulički udari i turbulencije.



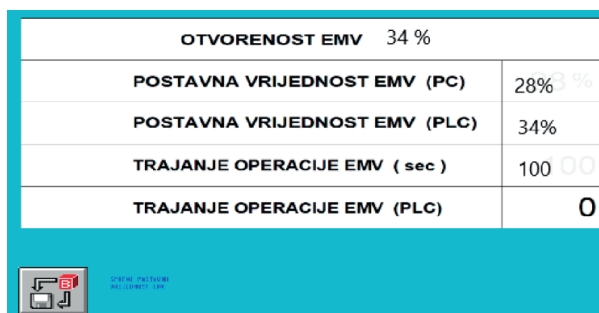
Slika 2. Presjek igličastog ventila [3]

3. UPRAVLJANJE VENTILOM

Otvaranje i zatvaranje igličastog ventila odvija se putem pomicanja klipa koji je povezan polugom na reduktor. Reduktor se može upravljati i ručnim kolom, što je zbog omjera reduktora prilično spor proces. Upravo iz tog razloga, često se umjesto ručnog kola koriste električni aktuatori, koji omogućuju brže i preciznije upravljanje, bilo ručno, na samoj lokaciji, ili daljinsko upravljanje[7]. Kod ručnog upravljanja ventilom, operator fizički na lokaciji s pomoću tipke upravlja jedinicom električnog aktuatora, a željeni postotak otvorenosti postiže se praćenjem indikatora u objektu. S druge strane, daljinsko upravljanje provodi se putem SCADA (eng. Supervisory Control And Data Acquisition) sustava iz nadzorno-upravljačkog centra. SCADA je industrijski sustav upravljanja i nadzora koji se koristi za prikupljanje podataka u realnom vremenu, praćenje i kontrolu udaljenih objekata te regulaciju njihovih parametara putem komunikacijskih veza. Osnovne komponente SCADA sustava uključuju daljinske terminalne jedinice (eng. Remote Terminal Units - RTU),

programibilne logičke kontrolere (eng. Programmable Logic Controllers - PLC), komunikacijske module i središnji nadzorni sustav, poznat kao sučelje čovjek-stroj (eng. Human-Machine Interface – HMI)[8]. SCADA sustav omogućuje centraliziranu kontrolu i nadzor nad velikim brojem udaljenih procesa, a u slučaju upravljanja ventilima, koristi se za precizno reguliranje njihovih položaja. Operater u SCADA sustavu postavlja parametre, koji se radio vezom šalju prema upravljačkom sustavu ventila na terenu. Glavna prednost daljinskog upravljanja SCADA sustavom leži u mogućnosti precizne regulacije ventila. Osim što se može zadati željeni postotak otvorenosti, SCADA sustav omogućuje i podešavanje vremena između dva impulsa zatvaranja ili otvaranja ventila. Na slici 3 prikazani su parametri upravljanja: ventil je trenutno otvoren 34%, a SCADA sustav zadaje da se postotak smanji na 28% u trajanju operacije od 100 sekundi. U tom procesu, PLC sustav na terenu šalje impuls, nakon čega se ventil postepeno zatvara. Taj postupak se ponavlja dok ventil ne dostigne željeni postotak otvorenosti, a isti princip vrijedi i za otvaranje ventila.

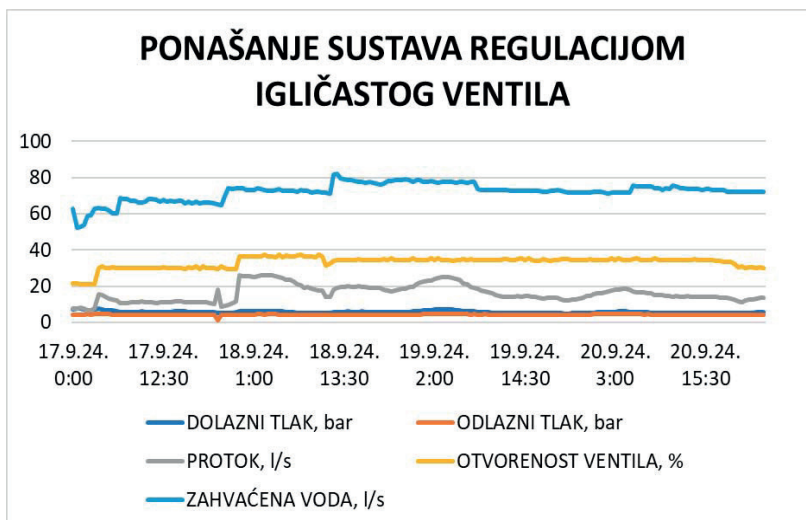
OTVORENOST EMV 34 %	
POSTAVNA VRIJEDNOST EMV (PC)	28% <input type="text" value="3 %"/>
POSTAVNA VRIJEDNOST EMV (PLC)	34%
TRAJANJE OPERACIJE EMV (sec)	100 <input type="text" value="00"/>
TRAJANJE OPERACIJE EMV (PLC)	0



Slika 3. Parametri upravljanja igličastim ventilom

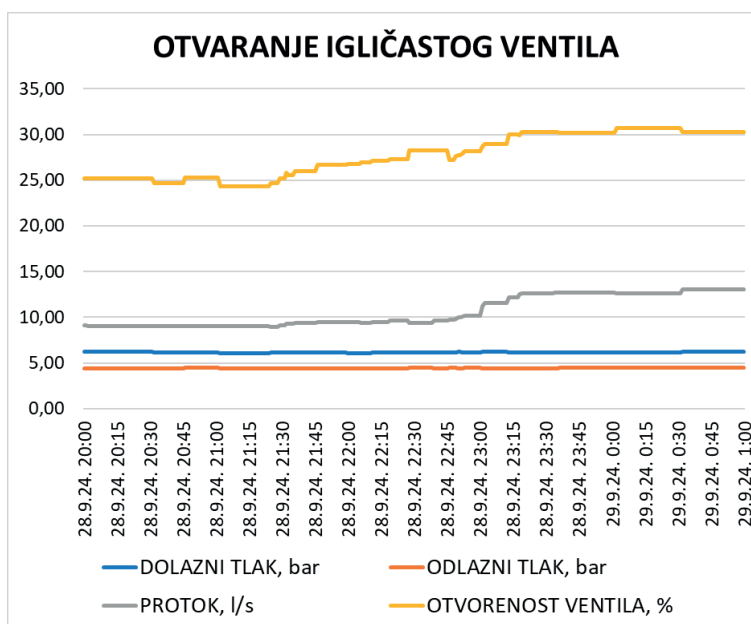
4. ANALIZA PODATAKA

Rad igličastog ventila u mjerno-regulacijskom oknu Mihaljevci promatran je u periodu od 30. rujna 2023. godine do 30. rujna 2024. godine, u različitim hidrološkim uvjetima. Tijekom tog perioda sustav je prošao kroz faze kada se opskrba oslanjala isključivo na izvorišta Stražemanke i Veličanke, bez potrebe korištenja crpilišta Dubočanka, kao i faze kada je crpilište Dubočanka radilo punim kapacitetom. Izdašnost kretala se između 30 i 100 litara u sekundi, dok su potrebe sjevernog dijela sustava varirale između 30 i 45 l/s. Kako bi se nadoknadila razlika, crpilište Dubočanka je dodavalo između 8 i 21 l/s u sustav. Sav višak vode redistribuirao se igličastim ventilom prema Požegi. Tijekom promatranog perioda, višak vode kroz ventil varirao je od 0 do 55 l/s. Na slici 4 prikazano je ponašanje sustava između 17. i 21. rujna 2024. Količina zahvaćene vode kretala se između 54,47 l/s i 66,22 l/s, dok je propusnost igličastog ventila varirala između 7,44 l/s i 11,53 l/s. Kao rezultat promjena, ventil je bio prilagođen nekoliko puta, s otvaranjem koje je poraslo s 21 % na 30 %, a potom i na 36 % kako bi se propustio višak zahvaćene vode. Dolazni tlak na mjernoj postaji varirao je od 5,2 bara tijekom dana do 7,5 bara noću, dok je odlazni tlak stabilno održavan na približno 4,5 bara. Ovaj dnevno-noćni režim omogućuje optimalno održavanje tlakova u sustavu, koji bi bez intervencije igličastog ventila mogao premašiti i 10 bara.



Slika 4. Ponašanje sustava regulacijom igličastog ventila

U razdoblju od 28. rujna 2024. u 20:00 do 29. rujna 2024. u 01:00 zabilježena je prilagodba igličastog ventila, što je vidljivo na slici 5. Tijekom ovog perioda, otvorenost ventila povećana je s 25 % na 30 % unutar tri sata. Ulazni tlak u tom vremenu kretao se u rasponu od 6,08 do 6,24 bara, što predstavlja zanemarivo odstupanje, dok je izlazni tlak ostao stabilan u intervalu od 4,38 do 4,51 bara. Ovi podaci pokazuju da je tlačna linija održavana na stabilnim razinama bez naglih promjena. Istovremeno, protok je povećan s 8,97 l/s na 13,09 l/s, što predstavlja povećanje protoka za 45%



Slika 5. Otvaranje igličastog ventila

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu analiziran je način rada igličastog ventila u vodoopskrbnom sustavu Požeštine, s posebnim naglaskom na njegovu ulogu u mjerno-regulacijskom oknu Mihaljevci. Upravljački sustav, posebice uz pomoć SCADA tehnologije, pokazao je visoku preciznost u regulaciji protoka vode kroz ventil. Ta preciznost omogućila je stabilizaciju tlakova u sustavu i osiguranje kontinuirane distribucije vode. Tijekom analiziranog perioda, ventil je uspješno odgovarao na promjene hidroloških uvjeta i promjene u potrebama sustava, osiguravajući ravnomjernu distribuciju vode prema potrošačima. Uvođenje SCADA sustava je značajno povećalo učinkovitost upravljanja, omogućujući brže i preciznije prilagodbe u radu ventila, smanjujući potrebu za ručnim intervencijama. Za budućnost, daljnji razvoj vodoopskrbnih sustava mogao bi uključivati automatizaciju upravljanja u realnom vremenu, s ciljem smanjenja ljudske intervencije i dodatnog poboljšanja učinkovitosti sustava. Takav napredak mogao bi osigurati još bržu reakciju na promjene u hidrološkim uvjetima i osigurati stabilniju opskrbu vodom čak i u izvanrednim situacijama.

6. LITERATURA

- [1] Hidroprojekt-ing, Aqua Libera, Protok(2014),Program upravljanja gubicima vode u vodoopskrbnom sustavu Požeštine
- [2] A.Mršić,Problematika sanitarne infrastrukture - usporedba sustava javnog vodovoda i lokalnih vodozahvata na širem području grada Požege, Varaždin 2017.
- [3] Ozkan Needle Valves, Web: <https://www.hygradewater.com.au/product/ozkan-needle-valves/> , (pristupljeno 26. rujna 2024.)
- [4] J.P.Tullis, M.L.Albertson,Needle Valves as Pressure Regulators, Journal of the Hydraulics Division, Volume 95, Issue 5,2021, Pages 1633-1649
- [5] I,Hunjet, Izvor regulacijskih ventila, Zagreb, 2018.
- [6] N.Bolf, Odabir i dijagnostika rada regulacijskih ventila, Mjerna i regulacijska tehnika, Kem. Ind. 66(11-12) 2017, 713-715
- [7] N. Bolf, L, Tomičak, Regulacijski ventili, Mjerna i regulacijska tehnika, Kem. Ind. 66(9-10) 2017, 582-586
- [8] I. Tomašević, Sustavi nadzora i upravljanja(SCADA) u energetici, Osijek, 2019.

**MODELSKO ISPITIVANJE ROTORNOG BAGERA
SRS 1200/630**

**MODEL TEST OF ROTOR EXCAVATOR
SRS 1200/630**

Husein Rošić, doc.dr.
Tehnički fakultet,
Irfana Ljubijankića bb, Bihać

Fatka Kulenović, van.prof.
Tehnički fakultet,
Irfana Ljubijankića bb, Bihać

REZIME:

Simulacija dinamičkih mjerenja na rotornom bageru SRS 1200/630 je urađena na modelu čelične konstrukcije koji je urađen u razmjeri 1:10 u odnosu na realni model. Ovakav pristup bi trebao, primjenom eksperimentalnih i proračunskih metoda, rezultirati minimalizacijom i smanjenjem troškova mjerenja u odnosu na realni model. Metodološki pristup modelskog ispitivanja na konstrukciji rotornog bagera bi zasigurno trebao za rezultat imati kvalitetnije dinamičko poboljšanje alatne mašine. Kao materijal za izradu modela rotornog bagera je korišten čelik S235 JRG1 (Č.0361) kao i kod realne konstrukcije, a za spojeve su korišteni zavareni spojevi umjesto vijaka. Na ovakav način je pojednostavljena konstrukcija, a da pritom nisu narušene mehaničke karakteristike konstrukcije.

SUMMARY:

The simulation of dynamic measurements on the rotary excavator SRS 1200/630 was performed on a model of a steel structure, which was done on a scale of 1:10 compared to the real model. This approach should, by applying experimental and calculation methods, result in the minimization and reduction of measurement costs compared to the real model. The methodological approach of model testing on the construction of a rotary excavator should certainly result in a higher-quality dynamic improvement of the machine tool. Steel S235 JRG1 (Č.0361) was used as the material for making the model of the rotary excavator, as in the case of the real construction, and for the connections, welded joints were used instead of screws. In this way, the construction is simplified, without impairing the mechanical characteristics of the construction.

Ključne riječi: model, ispitivanje, vibracije, lom, dinamička mjerenja, rotorni bager.

Key words: model, testing, vibrations, fracture, dynamic measurements, rotary excavator.

1. UVOD

Proučavanjem dinamičkog ponašanja konstrukcije mogu se predvidjeti njeni odzivi uslijed promjena oblika, promjena veličine elemenata konstrukcije ili promjena vrste materijala. Razvojem i primjenom modelskog ispitivanja konstrukcije rotornog bagera SRS 1200/630 trebalo bi rezultirati kvalitetnim dinamičkim ponašanjem istog. Razvijena metodologija numeričkog proračuna i modelskog ispitivanja omogućava minimiziranje obimnih eksperimenata u daljnjoj primjeni. S obzirom na gabarite realne konstrukcije rotornog bagera uzeli smo model koji je urađen u razmjeri M1:10. Masa modela rotornog bagera bez temeljnog nosača je 131,90 kg. Temeljni nosač ima masu 29,95 kg. Osnovni materijal je isti kao i kod realnog bagera. Osnovne karakteristike materijala koji su korišteni u izradi modela se ne razlikuju od realne konstrukcije, s tim što su korištene umanjene dimenzije i profili, kako je kazano u samom uvodnom dijelu a koje su date u tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Materijali za izradu modela

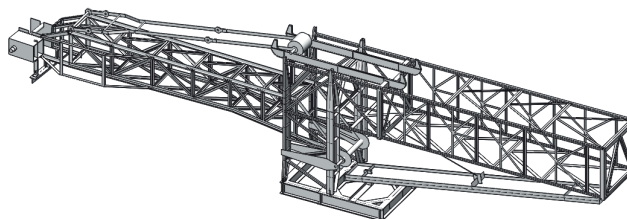
Materijal	Kvalitet
- L15x15x3mm	EN 10025 S235JRG1
- L20x20x3mm	EN 10025 S235JRG1
- L25x25x3mm	EN 10025 S235JRG1
I-profil - I100	EN 10025 S235JRG1
Okruglo Ø50mm	EN 10025 S235JRG2
-čelični limovi debljina: 1; 1,6; 2; 3; 4 i 5mm	EN 10130 Fe P04 Am

Vidljivo je da se radi o istom čeliku, profilima i čeličnim limovima istog kvaliteta i karakteristika. Razlika je jedino u tome što je kod modela korišteno zavarivanje, a ne vijčani spojevi.

2. OPIS MODELA

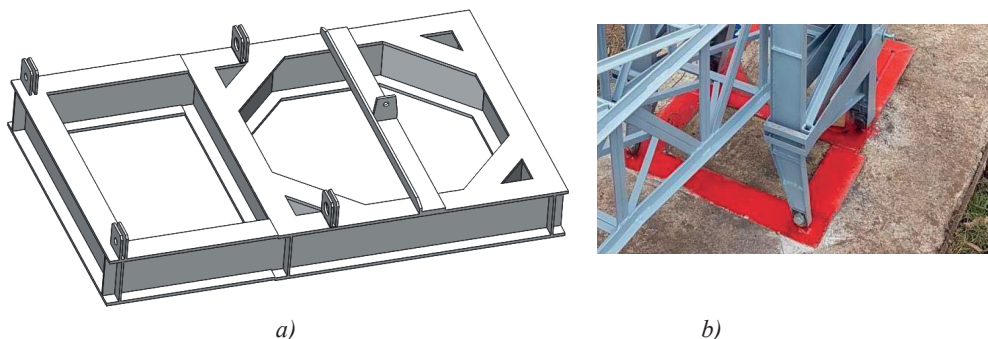
Simulacija dinamičkih mjerenja na rotornom bageru SRS 1200/630 je urađena na modelu čelične konstrukcije koji je urađen u razmjeri 1:10 u odnosu na realni model.

Metodološki pristup modelskog ispitivanja na konstrukciji rotornog bagera bi zasigurno trebao za rezultat imati kvalitetnije dinamičko poboljšanje alatne mašine. Kao materijal za izradu modela rotornog bagera je korišten čelik S235 JRG1 (Č.0361) kao i kod realne konstrukcije, a za spojeve su korišteni zavareni spojevi umjesto vijaka. Na ovakav način je pojednostavljena konstrukcija, a da pritom nisu narušene mehaničke karakteristike konstrukcije. Poznato je da su savremene konstrukcije neprestano podvrgnute dinamičkim utjecajima, pa je potreba za poboljšanjem dinamičkog ponašanja konstrukcija vrlo česta pojava. Model rotornog bagera je prikazan na slici 2.1.



Slika 2.1. Model rotornog bagera SRS 1200/630

Model je rađen u softverskom paketu SOLIDWORKS i svaki je dio urađen po konstrukciji i dimenzijama (M 1:10) u odnosu na stvarni. U konačnici je dobiven sklopni crtež i urađena potpuna projektna dokumentacija koju smo radili prema dokumentaciji same mašine. Bitno je također napomenuti da je i postolja urađeno na način da u komparativnom smislu odgovara postolju stvarne konstrukcije. Na slici 2.2. pod a) i pod b) su prikazani temeljni nosač i mjesto na kojem je isti učvršćen.



Slika 2.2. Temeljni nosač bagera: a) konstrukcija sa uškama b) armatura postolja

Na ovakav način je omogućeno dinamičko ispitivanje konstrukcije koja bi trebala pokazati da je modelski način ispitivanja primjenjiv za stvarne konstrukcije i zasigurno smanjuje troškove i vrijeme proračuna i eksperimenta. Donji dio kod realne konstrukcije je na postolju koji ima gusjenice za premještanje iz pozicije u poziciju. Kod statičkog ispitivanja, ovakav način nebi imao smisla zbog sila koje se prenose sa pokretnog dijela realne mašine. Tu bi se način oslanjanja morao uraditi kao zglobni, jer tada kod analize ravnoteže i rezultante bi dao adekvatne rezultate. Dinamičko ispitivanje je pretežno ovisno od krutosti same konstrukcije pa otuda i ovakav način oslanjanja.

Na slici 2.2. a) je prikazano postolja koje ima uške na koje su vezuju stubovi modela. Način vezivanja je vijčanog tipa, kao i kod realne konstrukcije. Na slici 2.2. b) je prikazana priprema mjesta gdje bi se postolja trebalo postaviti odnosno vezati sa i jednim dijelom uvezati armaturom, zbog same krutosti ali i stabilnosti. S obzirom da se strijela može pomjerati po visini, odnosno podizati i spuštati, kod modela je ugrađen elektromotor koji preko lamela istu podiže odnosno spušta, slika 2.3.



Slika 2.3. model rotornog bagera SRS 1200/630 - položaj elektromotora

Sa slike je vidljivo da je kod modela ugrađen elektromotor koji preko valjaka i lamela podiže i spušta strijelju i na taj način omogućava nam ispitivanje pod različitim uglovima rada i simulacije režima rada.

3. EKSPERIMENTALNO DINAMIČKO ISPITIVANJE MODELA ROTORNOG BAGERA SRS 1200/630

Kod eksperimentalnog dinamičkog ispitivanja je urađen plan mjerenja i način pobude za koji je korišten elektromotor sa točkom, koji bi trebao, pod različitim pobudama izazvati vibracije na samoj konstrukciji modela. Uzeta su četiri mjerna mjesta i pod pobudama od 5,4 Hz, 10 Hz, 12 Hz, 18 Hz.

3.1. Mjerna oprema za mjerenje vibracija na modelu

Za mjerenja vibracija, odnosno frekvencije su korišteni kontaktni senzor ubrzanja i instrument za mjerenje frekvencija. Za analizu rezultata smo koristili softverski paket *Vibrorec*. Rezultate ćemo prikazati posebno za mjerno mjesto, odn. frekvenciju koja se pokazala kao ona koju treba izbjegavati.

Kontaktni senzor ubrzanja (piezoelektrični akcelerometar) radi na piezoelektričnom principu. Takvi senzori su najzastupljeniji u praksi. Koristi se piezoelektrični efekat kvarca, odnosno mehaničko gibanje se pretvara u istežanje ili sabijanje kvarca u kojem dolazi do polarizacije molekula i nastaje električni naboj. Odziv je u pravilu do rezonantne frekvencije ali koriste se do 1/3 rezonantne frekvencije, jer je pri većim frekvencijama pogreška mjerenja iznad 10%. Prednosti: nema nikakvog trošenja, dobra radna dinamika, rad u širokom frekvencijskom području, kompaktnost, stabilnost i moguća ugradnja u bilo kojem položaju. Izgled piezoelektričnog akcelometra je prikazan na slici 3.1.

Za mjerenje frekvencija kod modela rotornog bagera je korišten uređaj za pobudu čija je konstrukcija data na slici 3.2. Kao što je vidljivo sa slike, radi se o elektromotoru koji pokreće točak koji je fiksiran na čeličnoj ploči i sa remenicom povezan sa elektromotorom.



Slika 3.1. Piezoelektrični akcelerometar



Slika 3.2. Uređaj za pobudu

Uređaj i njegovo baždarenje je urađeno pod mentorstvom prof.dr. Taška Maneskog na Mašinskom fakultetu u Beogradu. Njegov odziv se kreće u rasponu dozvoljenih frekvenci i direktno je povezan sa senzorom.



Slika 3.3. Uređaj za snimanje rezultata

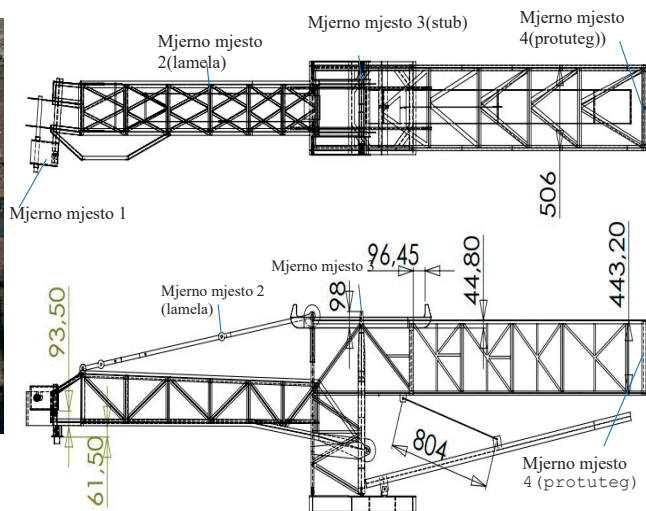
Kutija u kojoj se nalazi sam mjerni instrument je namijenjena da isti zaštiti od vremenskih uvjeta, bilo da se radi o kiši, snijegu ili suncu. Izolovan je da vanjska vlaga ne može utjecati na isti.

3.2. Obrada rezultata u aplikacionom programu Vibra Rec6

Nakon završenih mjerenja, urađena je obrada rezultata u softverskom paketu *VibraRec6* što je prikazano i kroz rezultate mjerenja. Na osnovu računarske analize MKE (na realnoj konstrukciji) utvrđena su mjerna mjesta koja su označena kao interesantna i kritična. Za eksperimentalno dinamičko ispitivanje su korišteni elektromotor – „vibrator“ koji je stvarao pobudu na tri različita mjesta. Za mjerenja frekvencija su primjenjeni piezoelektrični senzor i mjerac frekvencije. Na sljedećim slikama su prikazana mjerna mjesta koja su uzeta kao referentna za mjerenja, na osnovu metode MKE sa mjerenja na realnoj konstrukciji i to pozicije odnosno kritična mjesta koja su kao takva rezultatima dobivena.



a)



Slika 3.4. Rotatorni bager SRS 1200/630: a) stvarni izgled, b) shematski prikaz modela bagera
Shematski prikaz modela rotornog bagera sa označenim mjernim mjestima

Vidimo da je nakon računarske analize utvrđeno da na označenim mjestima su ustvari ekstremne vrijednosti pogodne za mjerenje, posebno na lamelama (mjerno mjesto 2). Pošto imamo 5 mjernih mjesta, urađeno je 5 mjerenja sa frekvencijama od 5,4 Hz, 12 Hz i 18 Hz i dobili smo rezultate gdje ćemo ovdje prikazati samo za mjerenje br 3. Zbog obimnosti mjerenja nismo bili u mogućnosti prikazati sva mjerenja ali ista su prikazana u doktorskoj disertaciji doc.dr. Huseina Rošića.

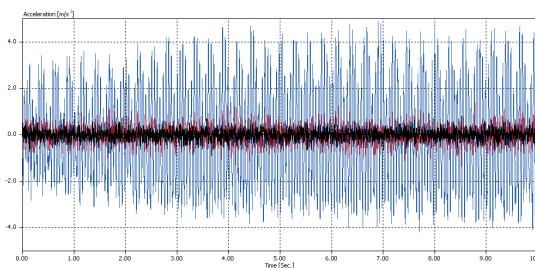
Ovdje će biti prikazani 12 mjerenja sa različitim frekvencijama, a uređaj za pobudu se nalazi na strijeli i to na sanduku koji je zamjena za glodalo na mjernom mjestu 1. Kod lamele za zadnja tri mjerenja su zamijenjene ose x i z.

Tabelarni prikaz rezultata za mjerenje br. 3 dat je u tabeli 3.1.

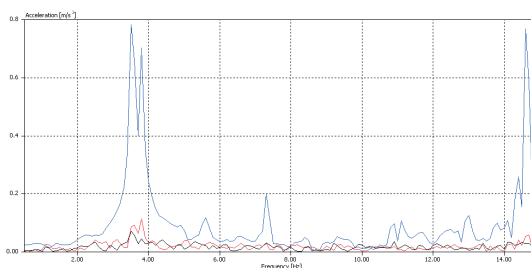
Tabela 3.1. Vrijednosti frekvencija na mjernim mjestima za mjerenje br.3

Pobuda na 5,4 Hz	Frekvencija(Hz) poprečno(plava)	Frekvencija(Hz) vertikalno(crvena)	Frekvencija(Hz) uzdužno(crna)
MM 1	3,5 ;3,8	-	-
MM 2	3,5 ;3,8	-	-
MM 3	-	-	-
MM 4	3,5 ;3,8	-	-
Pobuda na 12 Hz			
MM5	8,2	8,2	-
MM6	8,2	8,2	-
MM7	-	-	-
MM8	8,2	8,2	8,2
Pobuda na 18 Hz			
MM9	12,2 ;12,5	12,2 ;12,5	-
MM10	12,2 ;12,5	12,2 ;12,5	-
MM11	-	-	-
MM12	12,2 ;12,5	12,2 ;12,5	-

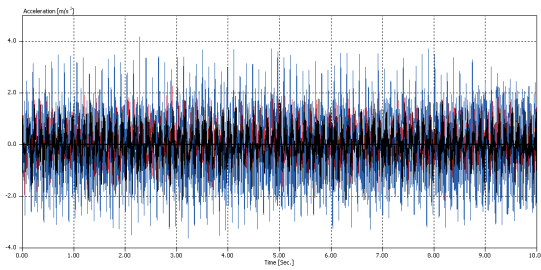
Vrijednosti ubrzanja u zavisnosti od frekvencije i vremena za mjerna mjesta 2, 6 i 9 kod mjerenja br.3 date su na sljedećim slikama.



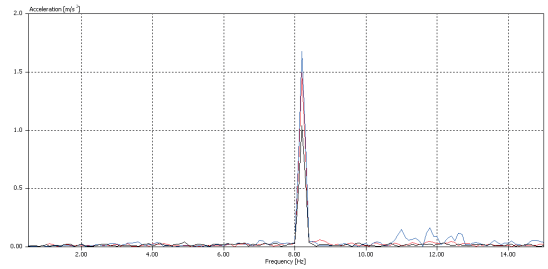
a) ubrzanje u zavisnosti od vremena za MM2



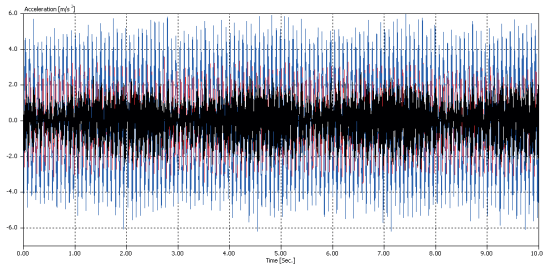
b) ubrzanje u zavisnosti od frekvencije za MM2



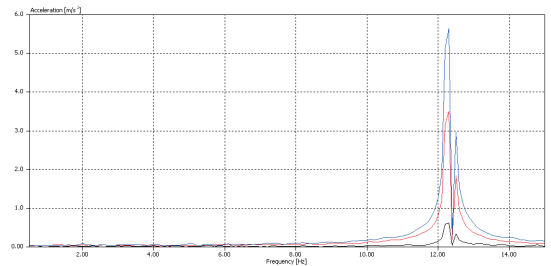
c) ubrzanje u zavisnosti od vremena za MM6



d) ubrzanje u zavisnosti od frekvencije za MM6



e) ubrzanje u zavisnosti od vremena za MM9



f) ubrzanje u zavisnosti od frekvencije za MM9

Slika 3.5. Vrijednosti ubrzanja kod pobude od 5,4 Hz, 12 Hz i 18 Hz za mjerenje br.3 u zavisnosti od vremena i frekvencije i sa uređajem za pobudu na mjernom mjestu 1

4. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

Statička analiza deformacijskog i naponskog stanja na konstrukciji rotornog bagera pokazala je da su sva opterećenja odnosno naprezanja u linearno-elastičnom području, a što je potvrđeno numeričkom analizom. Naime, numerička analiza nam je definisala kritična mjerna mjesta, na koja su lijepljene mjerne trake. Primjenom tenzometrijske metode, a čime je određen nivo deformacijskog stanja, na osnovu kojih su izračunata realna naprezanja. Rezultat ovih mjerenja je gore navedena konstatacija. Za analizu stanja konstrukcije u dinamičkim uslovima urađen je realni model u razmjeri 1:10. Znajući značaj dinamičkih ispitivanja, korištena su dva parametra koji su bitna za procjenu integriteta konstrukcije sa aspekta dinamičkih opterećenja i to su ubrzanje $a[m/s^2]$ i frekvencija $f[Hz]$. Mjerenja dinamičkih parametara, ubrzanja i frekvencije su bila na mjernim mjestima na kojima su kod realne konstrukcije izmjerena viša naponska stanja. Definisana mjerna mjesta na modelu su odgovarala mjernim mjestima na realnoj konstrukciji na kojima su izmjereni maksimalni naponi. Mjerenja su rađena na četiri mjerna mjesta na kojima je i numeričkom metodom pokazano i koja su označena kao „kritična“.

Ono što je najvažnije, ova ispitivanja su pokazala da je kritična učestala frekvencija za ovaj tip konstrukcije alatne mašine oko 10 Hz sa čim je pokazano i dokazano da režimi rada a koji se odnosi na rad strijele pod uglom većim od 15° , nije poželjan i dovodi do značajnih oštećenja na samoj konstrukciji što je dokumentovano i havarijom na bageru SRS 3000, slika 4.1. U konkretnom slučaju je zbog nivoa učestalosti sopstvenih frekvenci na opterećenjima oko 10 Hz (kod modela), a kod realne konstrukcije uvećano za deset puta, došlo do prekomjernog dinamičkog opterećenja uške strele rotornog bagera, a što je iniciralo prslinu. To je dovelo do katastrofalnih havarija (pucanje uške i pada strijele rotora od bagera, a što je također dovelo i do pada protutega.



a) b)
 Slika 4.1. Pad strijele i protutega nakon pucanja uški na strelji
 a) opći izgled havarije b) detalji analize loma

Ovaj primjer havarije na sličnoj konstrukciji i uticaj pojave nekontrolisanih vibracija, kao i geometrijske koncentracije napona na kritičnim mjestima konstrukcije, je samo potvrda značaja predmetne analize urađene u ovom radu. To se, prije svega, odnosi na realno modelsko ispitivanje dinamičkih parametara (frekvencija i ubrzanje), a koje je urađeno na modelu, i koje nam je definisalo maksimalnu frekvenciju koja je dozvoljena u radu ove i sličnih konstrukcija.

5. ZAKLJUČAK

Za ovaj lom karakteristično je još, da je do nestabilnog rasta prsline došlo pri dužini prsline manjoj za dva reda veličine od dužine prsline u području zavarenog spoja koji je bio predmet analize. Kako je za izradu upotrijebljen isti materijal, jasno je da su prisutan geometrijski faktor (geometrijska koncentracija napona) i prisutan nivo napona (nama nepoznat), kao i nekontrolisana učestanost, imali ulogu u značajnom smanjenju dužine prsline, pri kojoj je započinjao njen nestabilan rast. Prisustvo nestabilnog rasta pri jako maloj dužini prsline ukazuje da svaki eventualni prijedlog o uvođenju tolerisanog oštećenja treba detaljno razmotriti.

Ovaj primjer havarije na sličnoj konstrukciji i uticaj pojave nekontrolisanih vibracija, kao i geometrijske koncentracije napona na kritičnim mjestima konstrukcije, je samo potvrda značaja predmetne analize urađene u ovom radu. To se, prije svega, odnosi na realno modelsko ispitivanje dinamičkih parametara (frekvencija i ubrzanje), a koje je urađeno na modelu, i koje nam je definisalo maksimalnu frekvenciju koja je dozvoljena u radu ove i sličnih konstrukcija.

6. REFERENCE

- [1] Rošić H. (2017.), *Dynamic reanalysis of the structure of sweet machines*, Doktorski rad, Tehnički fakultet, Bihać.
- [2] Archer, J.,S.(1963.), *Consistent Mass Matrix for Distributed Mass Systems*, Journal of Structural Division, Proc. ASCE, Vol. 89, No. ST4, pp. 161-178.
- [3] Rao, S. (1980), *The Finite Element Method in Engineering*, Pergamon Press.
- [4] Bathe, K., J. (1982.), *Finite Element Procedures in Engineering Analzsis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- [5] Trišović, N. (2007.), *Modifikacija dinamičkih karakteristika u strukturalnoj reanalizi mehaničkih sistema*, Doktorski rad, Mašinski fakultet, Beograd.
- [6] Radosavljević, Lj. (1972.), *Teorija oscilacija*, Mašinski fakultet, Beograd.
- [7] Kojić, M., Mićunović, M. (1988.), *Teorija oscilacija*, Naučna knjiga, Beograd.
- [8] Maneski, T. (1992.), *Prilog razvoju sistema projektovanja primenom računara nosećih struktura mašina alatki*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd.
- [9] Maneski, T. (1998.), *Kompjutersko modeliranje i proračun struktura*, Mašinski fakultet, Beograd.
- [10] Maneski, T., Milošević-Mitić, V., Ostrić, D. (2002.), *Postavke čvrstoće konstrukcija*, Mašinski fakultet, Beograd.
- [11] Faddeev, D.K. and Faddeeva, V.N. (1963.), *Computational Methods of Linear Algebra*, W.H. Freeman and Company.
- [12] Fox, R.L. and Kapoor, M.P (1968.), *Rates of Changes of Eigenvalues and Eigenvectors*, AIAA Journal, Vol. 6, pp. 2426-2429.
- [13] Jacobi, C.G.J (1971.), *Über ein leichtes Verfahren die in der Theorie der Saecularstoerungen vorkommenden Glecungen numerisch aufzuloesen*, Zeritshrift fur Reine und Angewandte Mathematik, Vol.30, 1846. pp. 51-95, also NASA TT.F-13, 666.
- [14] Jahn, H.A. (1948.), *Improvement of an Approximate Set of Latent Roots and Modal Columns of a Matrix by Methods akin to those of Classical Perturbation Theory*, Quart. Journal of Mech. and Applied Math., Vol.1, pp. 132-144.
- [15] Lancaster, P. (1964.), *On Eigenvalues of Matrices Dependent on a Parameter*, Numerische Mathematick, Vol 6, No. 5, pp. 377-387.
- [16] Wilkinson, J.H. (1963.), *The Algebraic Eigenvalue Problem*, Oxford University Press, London, pp. 62109

**DIJAGNOSTIKA JENBACHER MOTORA JMS 416 NA
BIOPLINSKOM POSTROJENJU**

**DIAGNOSIS OF JENBACHER ENGINE JMS 416
AT THE BIOGAS PLANT**

**Danijel Zolić dipl. ing. stroj.
MEP Inženjering d.o.o.
Ul. 108. brigade ZNG 40,
Slavonski Brod,
Hrvatska**

Prof. dr. sc. Tomislav Šarić

Prof. dr. sc. Marinko Stojkov

**Prof. dr. sc. Roberto Lujčić
Sveučilište u Slavonskom Brodu
Strojarski Fakultet u Slavonskom Brodu
Trg Ivane Brlić Mažuranić 2
Slavonski Brod, Hrvatska**

REZIME

Ovaj rad obrađuje dijagnostiku Jenbacher JMS 416 motora, najčešćeg modela na bioplinskim elektranama. Opisane su ključne metode koje se koriste u dijagnostici, kao što su: vibracije, termografija, analiza ulja i elektronička dijagnostika putem sustava integriranih sustava DIANE. Svaka metoda omogućuje rano otkrivanje problema, optimizaciju performansi i planiranje preventivnog održavanja. Poseban naglasak stavljen je na korištenje naprednih senzora i softverskih alata za analizu podataka, što rezultira povećanom pouzdanošću i smanjenim troškovima održavanja. Ove metode ključne su za dugovječnost motora i učinkovit rad u bioplinskim postrojenjima

The diagnostics of the Jenbacher JMS 416 engine, a common model in biogas power plants, involves various key methods such as vibration analysis, thermography, oil analysis, and electronic diagnostics via the DIANE integrated system. These methods are crucial for early fault detection, performance optimization, and preventive maintenance planning. Special attention is given to the use of advanced sensors and software tools for data analysis, resulting in improved reliability and reduced maintenance costs. The outlined diagnostic techniques are vital for ensuring engine longevity and efficient operation in biogas facilities.

Ključne riječi: Bioplin, održavanje, Jenbacher, Učinkovitost bioplinskih motora

1. UVOD

Jenbacher JMS 416 je visokoučinkovit motor specijalno dizajniran za primjenu u energetskim postrojenjima, kao što su bioplinska postrojenja. Upotreba bioplina za proizvodnju električne energije predstavlja značajan doprinos u postizanju energetske neovisnosti i smanjenju emisija stakleničkih plinova [1]. Ovaj motor je dio serije Jenbacher JMS 4, poznate po svojoj pouzdanosti, dugotrajnosti i sposobnosti rada u teškim uvjetima. JMS 416 se koristi u kogeneracijskim postrojenjima za proizvodnju električne i toplinske energije iz obnovljivih izvora, poput bioplina.

Tehničke specifikacije

Jenbacher JMS 416 motor posjeduje niz tehničkih karakteristika koje ga čine izuzetno pogodnim za primjenu u bioplinskim postrojenjima:

- Tip motora: Četverotaktni, turbopuhani motor s unutarnjim izgaranjem.
- Gorivo: Bioplin, prirodni plin ili drugi plinovi iz biomase.
- Konfiguracija: 16 cilindara u V rasporedu.
- Snaga: 1.200 kW (električna snaga).
- Brzina vrtnje: 1.500 okretaja u minuti (RPM).
- Učinkovitost: Električna učinkovitost oko 43%, ukupna učinkovitost (električna i toplinska) do 90% kada se koristi u kogeneraciji.
- Volumen cilindra: 4 litre po cilindru.
- Emisije: Zadovoljava stroge ekološke norme s niskim emisijama NOx i CO.

Konstrukcija i dizajn

Jenbacher JMS 416 odlikuje se robusnim dizajnom i kvalitetnim materijalima koji osiguravaju dug vijek trajanja i visoku otpornost na habanje i kvarove. Ključni elementi konstrukcije uključuju:

- Blok motora: Izrađen od visokokvalitetnog lijevanog željeza, blok motora pruža čvrstu osnovu za sve komponente.
- Klipovi i cilindri: Dizajnirani za optimalnu efikasnost izgaranja i minimalno trenje, s visokokvalitetnim materijalima koji osiguravaju dugotrajnost.
- Turbopuhalo: Povećava količinu zraka u komorama za izgaranje, što omogućuje bolje izgaranje goriva i veću snagu.
- Sustav hlađenja: Osigurava optimalnu radnu temperaturu motora, sprječavajući pregrijavanje i produžujući vijek trajanja komponenti.
- Sustav podmazivanja: Osigurava da svi pokretni dijelovi motora budu pravilno podmazani, smanjujući habanje i trošenje.

Dijagnostika industrijskih motora, poput Jenbacher motora JMS 416, ključna je za osiguravanje njihove dugotrajnosti, pouzdanosti i učinkovitosti [2]. U bioplinskom postrojenju, ovaj motor igra vitalnu ulogu u pretvaranju bioplina u električnu energiju. Pravilna dijagnostika omogućuje rano otkrivanje potencijalnih problema, preventivno održavanje i optimizaciju performansi motora.

Ovaj rad će detaljno obraditi metode dijagnostike koje se koriste za praćenje i održavanje Jenbacher motora JMS 416, uključujući analizu vibracija, termografiju, analizu ulja, te dijagnostiku pomoću naprednih elektroničkih sustava. Također će biti obrađene prednosti i

izazovi primjene ovih metoda, te značajke koje ih čine nezamjenjivim alatima u održavanju i optimizaciji industrijskih motora.

2. OSNOVE DIJAGNOSTIKE MOTORA

Dijagnostika motora odnosi se na proces procjene stanja motora pomoću različitih metoda i alata kako bi se identificirali potencijalni problemi prije nego što uzrokuju kvarove ili neplanirane zastoje. Ovaj proces uključuje prikupljanje podataka, analizu i interpretaciju rezultata kako bi se donijele informirane odluke o održavanju. -

Ciljevi dijagnostike

- Rano otkrivanje problema: Identificiranje potencijalnih problema prije nego što postanu ozbiljni kvarovi.
- Optimizacija performansi: Osiguranje da motor radi s maksimalnom učinkovitošću.
- Produženje životnog vijeka: Održavanje motora u optimalnom stanju kako bi se produžio njegov radni vijek.
- Smanjenje troškova održavanja: Planiranje i provođenje preventivnog održavanja kako bi se smanjili troškovi povezani s popravcima i zamjenama dijelova.

3. METODE DIJAGNOSTIKE

Metode dijagnostike koje se koriste za praćenje i održavanje Jenbacher motora JMS 416 su raznolike i pružaju sveobuhvatan pregled stanja motora. Svaka metoda donosi specifične uvide koji su ključni za rano otkrivanje potencijalnih problema, planiranje preventivnog održavanja i optimizaciju performansi. Ove metode uključuju analizu vibracija, termografiju, analizu ulja, te dijagnostiku pomoću naprednih elektroničkih sustava. Prelazak s analognih na digitalne instrumente omogućuje precizniji nadzor rada motora, optimizaciju performansi i bolju interpretaciju podataka putem naprednih softverskih sustava [3]. Za upravljanje, nadzor i glavnu dijagnostiku, Jenbacher motor JMS 416 zaslužan je dijagnostički sustav DIANE (Digital Internal Analysis & Expert Network).

DIANE (Digital Internal Analysis & Expert Network) je napredni dijagnostički sustav razvijen za praćenje i analizu performansi industrijskih motora, uključujući Jenbacher motore kao što je JMS 416. Ovaj sustav koristi digitalne tehnologije i mrežu stručnjaka za pružanje detaljnih uvida u rad motora, omogućujući preventivno održavanje i optimizaciju operativnih performansi.

Glavne komponente DIANE sustava

DIANE sustav se sastoji od nekoliko ključnih komponenti koje omogućuju sveobuhvatnu dijagnostiku i analizu:

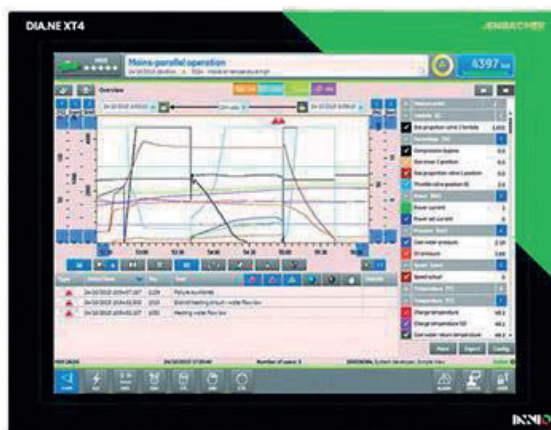
- Senzori i prikupljanje podataka: Senzori instalirani na motoru kontinuirano prikupljaju podatke o različitim operativnim parametrima, uključujući temperaturu, tlak, brzinu vrtnje, vibracije i emisije.
- Digitalni alati za analizu: Prikupljeni podaci se obrađuju pomoću naprednih softverskih alata koji primjenjuju algoritme za analizu podataka, detekciju anomalija i predikciju kvarova.
- Mreža stručnjaka: Podaci se dijele s mrežom stručnjaka koji mogu pružiti daljinsku podršku, interpretaciju rezultata i preporuke za održavanje.
- Korisničko sučelje: Intuitivno korisničko sučelje omogućuje operaterima jednostavan pristup podacima, izvještajima i dijagnostičkim alatima.

Funkcionalnosti DIANE sustava

- DIANE sustav nudi niz funkcionalnosti koje pomažu u održavanju i optimizaciji Jenbacher motora:
- Kontinuirano praćenje: Sustav omogućuje kontinuirano praćenje operativnih parametara motora u stvarnom vremenu, osiguravajući da se svi podaci prikupljaju i analiziraju bez prekida.
- Detekcija anomalija: Algoritmi za analizu podataka mogu prepoznati nepravilnosti i odstupanja od normalnih radnih uvjeta, upozoravajući operatere na potencijalne probleme prije nego što se dogode kvarovi.
- Prediktivna analiza: Korištenjem povijesnih podataka i naprednih algoritama, sustav može predvidjeti buduće kvarove i preporučiti preventivne mjere kako bi se izbjegli zastoji i skupi popravci.
- Izvještaji i analize: DIANE generira detaljne izvještaje i analize koje pomažu operaterima i inženjerima da razumiju stanje motora i donesu informirane odluke o održavanju.
- Daljinska podrška: Stručnjaci mogu pružiti daljinsku podršku putem sustava, analizirati podatke i ponuditi savjete bez potrebe za fizičkim prisustvom na lokaciji.

Prednosti korištenja DIANE sustava

- Korištenje DIANE sustava donosi niz prednosti za operatere Jenbacher motora JMS 416 i drugih industrijskih motora:
- Povećana pouzdanost: Kontinuirano praćenje i prediktivna analiza pomažu u ranom otkrivanju problema, smanjujući rizik od neočekivanih kvarova i povećavajući ukupnu pouzdanost motora.
- Smanjeni troškovi održavanja: Pravovremena identifikacija i rješavanje problema omogućuju planiranje preventivnog održavanja, smanjujući troškove hitnih popravaka i zamjena dijelova.
- Poboľjšane performanse: Optimizacija radnih uvjeta motora putem stalnog praćenja i analize može dovesti do poboljšanja učinkovitosti i performansi motora.
- Brza reakcija na probleme: Sustav omogućuje brzu detekciju i reakciju na probleme, smanjujući vrijeme zastoja i povećavajući operativnu dostupnost.
- Bolje donošenje odluka: Detaljni izvještaji i analize pružaju operaterima i inženjerima informacije potrebne za donošenje informiranih odluka o održavanju i operativnim postupcima.



Slika 1. Elektronski panel DIANE XT4

3.1. Analiza vibracija

Analiza vibracija je neinvazivna metoda dijagnostike koja se koristi za otkrivanje problema s rotirajućim dijelovima motora. Važnost analize vibracija kao efikasnog alata je u otkrivanju nepravilnosti u radu industrijskih strojeva [4]. Vibracije koje prelaze normalne razine mogu ukazivati na razne probleme, uključujući neuravnoteženost, neskladnost, labavost dijelova i oštećenja ležajeva. Dodatno, za detekciju grešaka u ležajevima pomoću ultrazvučnih metoda moguću je rano otkrivanje problema koji bi inače ostali nezapaženi kod tradicionalnih dijagnostičkih pristupa [5].

3.1.1. Principi analize vibracija

Analiza vibracija uključuje mjerenje amplituda i frekvencija vibracija koje proizvodi motor. Specifični obrasci vibracija mogu ukazivati na različite vrste problema:

- Neuravnoteženost: Povećane vibracije pri frekvenciji rotacije motora. Neuravnoteženost može biti uzrokovana neravnomjernom raspodjelom mase u rotirajućim dijelovima motora.
- Neskladnost: Vibracije pri višekratnicima frekvencije rotacije. Neskladnost se događa kada su osovine motora i pogonskog stroja nepravilno poravnate.
- Labavost dijelova: Nepravilni obrasci vibracija s visokim amplitudama. Labavost dijelova može biti uzrokovana labavim vijcima ili istrošenim ležajevima.
- Oštećenja ležajeva: Karakteristični obrasci vibracija visokih frekvencija. Oštećenja ležajeva mogu uzrokovati povišene vibracije i buku.

3.1.2. Alati i oprema za analizu vibracija

Analiza vibracija zahtijeva korištenje specijaliziranih senzora i softverskih alata:

- Senzori vibracija „knocking sensors“ : Ovi senzori se postavljaju na ključne dijelove motora kako bi prikupljali podatke o vibracijama. Senzori su obično piezoelektrični, kapacitivni ili induktivni. Na motoru Jenbacher JMS 416, knocking senzori su integrirani u svaki cilindar zasebno, kako bi se na upravljačkom panelu vidjelo točno o kojem cilindru se radi.
- Analizatori vibracija: Prijenosni ili stacionarni uređaji koji prikupljaju i analiziraju podatke sa senzora. Ovi uređaji mogu prikazivati rezultate u obliku grafikona i spektralnih analiza.
- Softver za analizu vibracija: Softverski alati koji omogućuju detaljnu analizu prikupljenih podataka, uključujući FFT (Fast Fourier Transform) analizu i trend analizu.

3.1.3. Primjena analize vibracija u bioplinskom postrojenju

U bioplinskom postrojenju, analiza vibracija koristi se za kontinuirano praćenje stanja Jenbacher motora JMS 416. Senzori vibracija postavljeni su na ključne dijelove motora, a podaci se prikupljaju i analiziraju u stvarnom vremenu pomoću naprednih softverskih alata.

Prednosti i izazovi

Prednosti:

- Rano otkrivanje problema prije nego što uzrokuju ozbiljne kvarove.
- Mogućnost planiranja preventivnog održavanja.

- Smanjenje troškova povezanih s popravcima i zamjenama dijelova.

Izazovi:

- Potreba za stručnim znanjem za analizu i interpretaciju podataka.
- Visoki početni troškovi instalacije senzora i softverskih sustava.
- Mogući lažni alarmi koji zahtijevaju dodatne provjere.



Slika 2. Analiza vibracija na bioplinskom motoru

3.2. Termografija

Termografija je metoda dijagnostike koja koristi infracrvenu tehnologiju za mjerenje temperature različitih dijelova motora. Termografija pruža neinvazivnu metodu za praćenje toplinskih profila motora, omogućujući rano otkrivanje pregrijavanja, nepravilne lubrikacije i električnih problema [6]

3.2.1. Principi termografije

Termografske kamere detektiraju infracrveno zračenje koje emitiraju objekti i pretvaraju ga u temperaturne slike. Ove slike omogućuju vizualizaciju temperaturnih razlika na površini motora, što može ukazivati na prisutnost problema.

3.2.2. Alati i oprema za termografiju

Termografske kamere: Kamere koje snimaju infracrveno zračenje i pretvaraju ga u slike koje prikazuju temperaturne profile.

Softver za analizu: Softverski alati koji omogućuju analizu i interpretaciju termalnih slika, identificiranje anomalija i generiranje izvještaja.

3.2.3. Primjena termografije u bioplinskom postrojenju

U bioplinskom postrojenju, termografija se koristi za redovito praćenje temperaturnih profila Jenbacher motora JMS 416. Termografske inspekcije provode se periodično, a termalne slike analiziraju se kako bi se identificirale anomalije u temperaturnim obrascima.

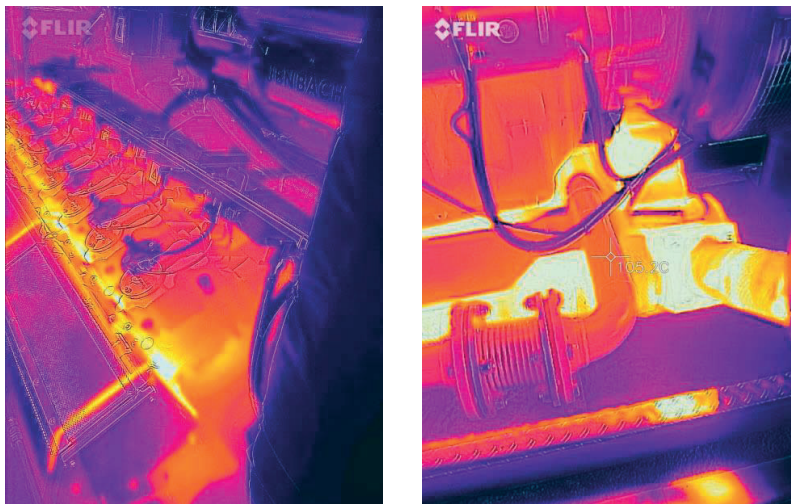
Prednosti i izazovi

Prednosti:

- Neinvazivna metoda koja ne zahtijeva zaustavljanje motora.
- Mogućnost identifikacije problema s hlađenjem i lubrikacijom.
- Brza i jednostavna primjena.

Izazovi:

- Potreba za specijaliziranom opremom i obukom za operatere.
- Ograničena mogućnost detekcije problema unutar unutarnjih dijelova motora.
- Interpretacija rezultata može biti složena i zahtijeva stručnost.



Slika 3. Primjeri termografske snimke na bioplinskom motoru

3.3. Analiza ulja

Analiza ulja ključna je metoda za procjenu stanja lubrikacijskog sustava motora. Ova metoda uključuje uzimanje uzoraka ulja i analizu njegovog sastava kako bi se identificirale kontaminacije, habanje dijelova i promjene u svojstvima ulja. Analiza ulja ključna je za razumijevanje stanja lubrikacije motora, te omogućuje rano otkrivanje habanja dijelova i kontaminacije ulja [7].

3.3.1. Principi analize ulja

Analiza ulja uključuje nekoliko koraka:

- Uzimanje uzoraka: Redovito uzimanje uzoraka ulja iz motora. Uzorci se obično uzimaju iz sustava za podmazivanje dok motor radi ili odmah nakon što se zaustavi kako bi se osigurala reprezentativnost uzorka.
- Laboratorijska analiza: Analiza uzoraka u laboratoriju kako bi se procijenile razine kontaminacija, metalnih čestica, vode i drugih nečistoća. Ova analiza uključuje spektrometriju, mikroskopiju i kemijske analize. Na Jenbacher motorima, najčešći parametri koji ukazuju na probleme su TAN (Total Acid Number) i TBN (Total Base Number).

- Interpretacija rezultata: Interpretacija rezultata kako bi se identificirali problemi u lubrikacijskom sustavu i općenito stanje motora. Rezultati se uspoređuju s referentnim vrijednostima kako bi se procijenilo stanje ulja i motora.

TAN i TBN parametri u ulju

TAN (Total Acid Number) i TBN (Total Base Number) su važni parametri u analizi ulja koji se koriste za ocjenu kemijskog stanja i svojstava ulja koje se koristi u motorima i drugim strojevima. Ovi parametri pomažu u određivanju sposobnosti ulja da neutralizira kisele i bazične spojeve te pružaju uvid u potencijalne probleme koji mogu nastati zbog kemijskih reakcija unutar motora.

TAN predstavlja ukupnu količinu kiselina prisutnih u ulju. Kiseline mogu nastati zbog oksidacije ulja, kontaminacije gorivom ili drugih kemijskih reakcija unutar motora. Povećanje TAN vrijednosti može ukazivati na degradaciju ulja i povećani rizik od korozije metalnih dijelova motora. Na bioplinskom postrojenju, TAN vrijednost najčešće raste radi povećanog udjela sumporovodika (H₂S) u bioplinu.

TBN predstavlja ukupnu količinu bazičnih spojeva prisutnih u ulju. Ovi spojevi neutraliziraju kiseline nastale tijekom izgaranja goriva i drugih procesa unutar motora. Smanjenje TBN vrijednosti može ukazivati na iscrpljivanje sposobnosti ulja da neutralizira kiseline, što može dovesti do korozije i oštećenja motora.

3.3.2. Primjena analize ulja u bioplinskom postrojenju

U bioplinskom postrojenju, analiza ulja provodi se redovito kako bi se osigurala optimalna lubrikacija Jenbacher motora JMS 416. Uzorci ulja uzimaju se prema unaprijed definiranim intervalima, a rezultati analiza koriste se za planiranje održavanja i zamjene ulja. Na Jenbacher motorima, interval uzimanja uzoraka je 500 radnih sati, a po potrebi, ako se sumnja na potencijalne probleme i češće.

Prednosti i izazovi

Prednosti:

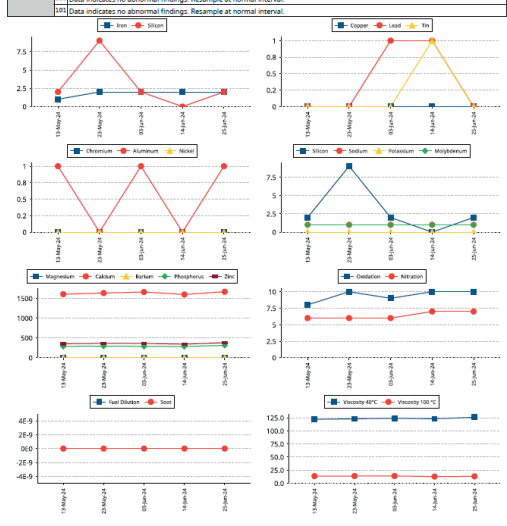
- Rano otkrivanje problema s lubrikacijom i habanjem dijelova.
- Mogućnost planiranja preventivnog održavanja na temelju stvarnih podataka.
- Smanjenje rizika od kvarova povezanih s nedostatnom lubrikacijom.

Izazovi:

- Potreba za redovitim uzimanjem uzoraka i laboratorijskom analizom.
- Moguće varijacije u rezultatima zbog uvjeta uzimanja uzoraka.
- Troškovi povezani s laboratorijskim analizama i interpretacijom rezultata.



Account Information		Component Information		Sample Information	
Account Number: CLUBEE-0522-0039	Company Name: ENERGANIA CERNA	Component ID: 1484214	Secondary ID: J1V13/J1616 GS- B25	Tracking Number: 230479664209	Lab Number: Z-419524
Contact: DANIJEL ZOLIC	Address:	Component Type: METHANOL/ANFOL/BIOSGAS ENGINE	Manufacturer: ENBACHER	Lab Location: Paznan	Data Analyst: QMG
Phone Number:		Model: A16 GS	Application: POWER GENERATION	Sampled: 25 Jun 2024	Submitted: 05 Jul 2024
		Sump Capacity: 800 l	Complained: 05 Jul 2024	Received: 05 Jul 2024	Completed: 05 Jul 2024
Filter Information		Miscellaneous Information		Product Information	
Filter Type: Information Requested	Micron Rating: 0	Wildcard 1: FILTER TYPE:631265	Product Manufacturer: TEACCO	HSAN 6500 FG GAS ENGINE OIL	Viscosity Grade: SAE 40
Comments: Data indicates no abnormal findings. Resample at normal interval.					
Sample Information		Contaminants		Fluid Properties	
Sample #	Flow Sampled	Viscosity	Water	Acidity	Alkalinity
93	13-May-2024	1700	25000	0	No
93	23-May-2024	2100	25000	0	No
100	03-Jun-2024	2250	25000	0	No
102	14-Jun-2024	2500	25000	0	No
103	29-Jun-2024	2750	26000	0	No



Slika 4. Rezultati analize ulja

3.4. Elektronička dijagnostika

Napredni elektronički sustavi za dijagnostiku pružaju detaljne informacije o performansama motora u stvarnom vremenu. Važnost prediktivnog održavanja za smanjenje troškova i povećanje pouzdanosti opreme [8]. Ovi sustavi koriste senzore i softver za praćenje različitih parametara motora, uključujući brzinu, tlakove, temperature i emisije. Također, primjena industrijskog IoT-a i konvolucijskih neuronskih mreža u prepoznavanju stanja neispravnosti rotirajućih sustava omogućuje automatsko i precizno detektiranje kvarova u realnom vremenu [9].

3.4.1. Principi elektroničke dijagnostike

Elektronička dijagnostika uključuje:

- **Senzori:** Instalacija senzora na ključne dijelove motora za prikupljanje podataka. Senzori mogu mjeriti različite parametre poput temperature, tlaka, brzine vrtnje, vibracija i emisija. Korištenje senzora s niskom potrošnjom energije i malom cijenom, uz primjenu dvostruke kalibracije, omogućuje preciznije mjerenje temperature i vlažnosti, čime se povećava pouzdanost podataka u različitim industrijskim primjenama [10].
- **Softver:** Korištenje softverskih alata za analizu i interpretaciju prikupljenih podataka. Softver može uključivati funkcionalnosti za praćenje trendova, analizu anomalija i generiranje izvještaja
- **Alarmi i obavijesti:** Postavljanje pragova za različite parametre kako bi sustav mogao generirati alarme u slučaju odstupanja od normalnih vrijednosti. Alarmi omogućuju brzo reagiranje na potencijalne probleme.

3.4.2. Primjena elektroničke dijagnostike u bioplinskom postrojenju

U bioplinskom postrojenju, elektronički sustavi za dijagnostiku koriste se za kontinuirano praćenje Jenbacher motora JMS 416. Ovi sustavi omogućuju operaterima da u stvarnom vremenu prate stanje motora i brzo reagiraju na potencijalne probleme.

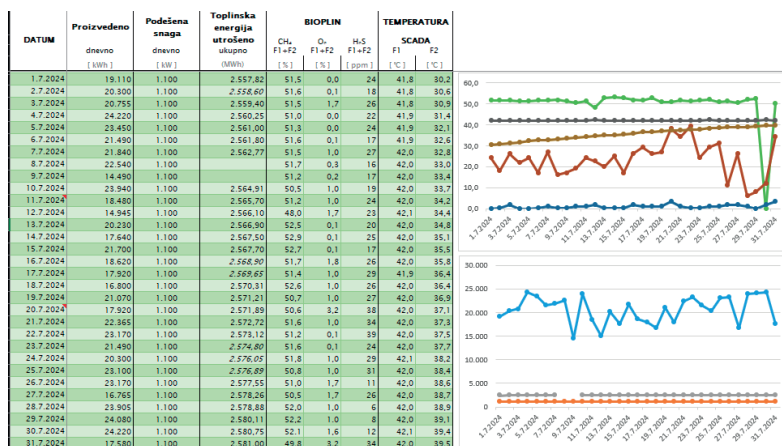
Prednosti i izazovi

Prednosti:

- Kontinuirano praćenje i brzo otkrivanje problema.
- Detaljne informacije o performansama motora.
- Mogućnost daljinskog praćenja i analize podataka.

Izazovi:

- Visoki početni troškovi instalacije senzora i softverskih sustava.
- Potreba za stručnim znanjem za upravljanje i interpretaciju podataka.
- Mogući problemi s pouzdanošću senzora i softvera.



Slika 5. Rezultati elektroničke dijagnostike

4. ZAKLJUČAK

Dijagnostika Jenbacher motora JMS 416 u bioplinskom postrojenju ključna je za osiguravanje njegove dugotrajnosti, pouzdanosti i učinkovitosti. Korištenjem naprednih metoda dijagnostike, kao što su analiza vibracija, termografija, analiza ulja, i elektronička dijagnostika, operateri mogu rano otkriti potencijalne probleme, optimizirati performanse motora i smanjiti troškove održavanja.

Ovaj rad naglašava važnost primjene ovih metoda dijagnostike u svakodnevnom radu bioplinskog postrojenja. Rano otkrivanje problema i pravovremeno održavanje ključni su za osiguranje kontinuiteta proizvodnje energije i dugotrajnost motora. Implementacija ovih dijagnostičkih metoda predstavlja značajnu investiciju, ali donosi dugoročne prednosti u vidu smanjenja rizika od kvarova i povećanja učinkovitosti rada motora.

Kroz kontinuirano praćenje i analizu podataka, bioplinsko postrojenje može osigurati visoke standarde pouzdanosti i učinkovitosti, te pridonijeti održivom i ekološki prihvatljivom proizvodnjom energije.

5. REFERENCE

- [1] Patterson, T., Esteves, S., Dinsdale, R., & Guwy, A. (2011). "An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK," *Energy Policy*, 39(3), 1806-1816.
- [2] Jenbacher Engine Maintenance Manual – Priručnik proizvođača za održavanje i dijagnostiku Jenbacher JMS motora
- [3] Cornel Mihai Tărăbîc, Grigore Cican*, Gabriel Dediu, Razvan Marius Catană, „Updating a Didactical Piston Engine Test Bench, from Analogue Instrumentation to Digital“, *Tehnički vjesnik*, Vol. 31 No. 4, 2024. 1087-1094
- [4] Sharma, V. S., & Parey, A. (2016). "Gear fault detection using modified TSA and vibration-based signal processing techniques," *Measurement*, 86, 88-99.
- [5] Rolling Bearing Fault Detection in the Range of Ultrasound
Sinikovic, G; Gubelj, N; (...); Jeli, Z
Apr 2023 *TEHNICKI VJESNIK-TECHNICAL GAZETTE*
30 (3) , pp.830-836
- [6] Bagavathiappan, S., et al. (2013). "Infrared thermography for condition monitoring – A review," *Infrared Physics & Technology*, 60, 35-55.
- [7] Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2013). "Engineering Tribology," 4th Edition, Butterworth-Heinemann.
- [8] Mobley, R. K. (2002). "An Introduction to Predictive Maintenance," 2nd Edition, Butterworth-Heinemann.
- [9] Identification of Inability States of Rotating Machinery Subsystems Using Industrial IoT and Convolutional Neural Network-Initial Research
Kolar, D; Lisjak, D; (...); Benic, J
Jun 2023 *TEHNICKI GLASNIK-TECHNICAL JOURNAL*
17 (2) , pp.279-285
- [10] Mario Holik, Antun Barac, Josip Zidar, Marinko Stojkov, „Dual-Approach Calibration Unlocks Potential of Low-Power, Low-Cost Temperature and Humidity Sensors“, *Tehnički vjesnik*, Vol. 31 No. 4, 2024., 1335-1347

UTICAJ MJERENJA KLJUČNIH PARAMETARA RADA GLAVNOG BRODSKOG DIZEL MOTORA NA PRODUŽENJE PERIODIKE REMONTA

Sead Cvrk,
Marinko Aleksić, Draško Kovač, Đorđe Nedeljkov,
Univerzitet Crne Gore, Pomorski fakultet Kotor
Put I Bokeljske brigade 44, 85330 Kotor

REZIME

U ovom radu je predstavljen model održavanja uz primjenu tehničke dijagnostike na konkretnom objektu – cilindarskim jedinicama dvotaktnog sporohodnog dizel motora MAN B&W 8K80MC-C. Opisani su: način kontrole osnovnih parametara rada motora očitanih na samom motoru, snimanje pritiska u cilindrima motora uz pomoć elektronskog uređaja “PREMET” te vizuelna kontrola cilindarskih košuljica i klipova. Obradom i analizom dobijenih podataka može se donijeti zaključak o potrebi preventivnog održavanja ili mogućnosti produženja eksploatacije, bez potrebe remonta za određeni vremenski period. Praksa potvrđuje da je moguće produžiti period između dva remonta uz zadržavanje performansi motora u propisanim granicama od strane proizvođača i vrijednostima parametara dobijenih na probnoj vožnji broda, te smanjiti troškove održavanja.

Ključne riječi: brod, dizel motor, održavanje, dijagnostika

1. UVOD

Glavni brodski pogonski motor ima svoje performanse koje su određene cijenom, pouzdanošću i sigurnošću u plovidbi te zaštitom prirodne sredine. Namjena savremenog održavanja je održati projektovanu pouzdanost, raspoloživost i stepen korisnog djelovanja pogonskog motora uz što manje troškove. Na osnovu simptoma koji se dobijaju praćenjem parametara rada daje se dijagnoza stanja, a na osnovu nje eventualna intervencija. Valjanost ovakvog sistema održavanja zavisi od valjanosti informacije koju dobijamo mjerenjem. Ovo se postiže kvalitetom instrumenata za dijagnostiku, obučenosti onih koji vrše mjerenja i sistematičnošću pregleda. Na osnovu izvršene dijagnostike određuje se termin intervencije ili remont uređaja [1, 2].

U ovom radu su prikazani konkretni rezultati dobijeni u toku trogodišnje eksploatacije glavnog pogonskog dvotaktnog motora “MAN B&W 8K80 MC-C” na brodu “HS SCOTT” njemačke kompanije “HANSA SHIPPING”. Brod posjeduje kompjuterski program “TITAN” za planiranje preventivnog održavanja brodskih sistema na osnovu radnih sati ili vremenskog perioda u zavisnosti od vrste sistema. Tako je za remontovanje cilindarskih jedinica predviđen period od 16000 radnih sati [3]. Implementacijom održavanja prema stanju i upotrebom tehničke dijagnostike postignuto je odlaganje početka remonta prve cilindarske

jedinice na 20637 radnih sati, a posljednja cilindarska jedinica remontovana je nakon 26876 radnih sati. Savremeni dijagnostički sistemi, uprkos tome što su opremljeni modernim tehničkim i tehnološkim rješenjima, obično samo informišu inženjere o vrijednostima testiranih parametara. Bazirajući se na tim informacijama ali prvenstveno na zaključcima dobijenim nakon vizuelne kontrole stanja cilindarskih košuljica i klipnih prstenova, donošeni su zaključci o potrebi remontovanja cilindarske jedinice.

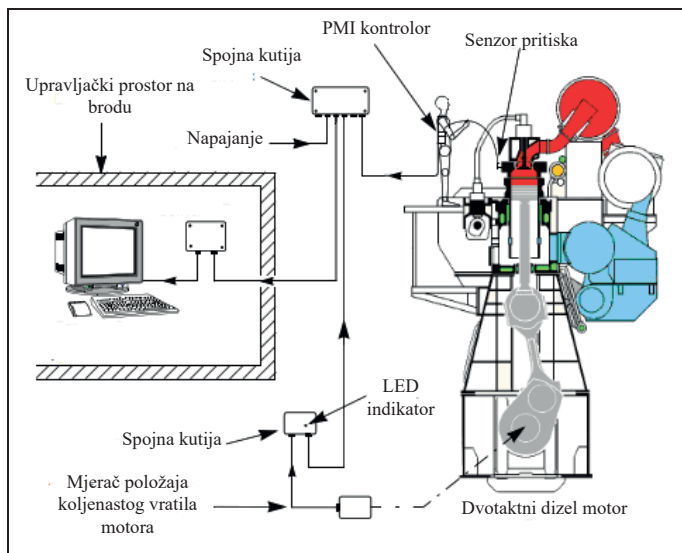
2. ISKUSTVA I DOSTIGNUĆA MAN B&W U ODRŽAVANJU CILINDARSKIH JEDINICA MOTORA

MAN B&W je jedan od vodećih proizvođača dvotaktnih sporohodnih motora u svijetu. Oni su dizajnirali dvotaktni motor koji u potpunosti zadovoljava zahtjeve i propise postavljene pred pomorsku industriju. To podrazumjeva saradnju sa pomorskim vlastima, vladama i internacionalnim organizacijama u unapređivanju i sprovođenju novih pravila a sve u cilju smanjenja emisije štetnih izduvnih gasova realnim metodama. Zahtjevi kupaca pored smanjenja emisije štetnih gasova jesu i smanjenje specifične potrošnje goriva kao i produženje vremenskog intervala između dva remonta. [3]

Pored mnogih novih tehničkih rješenja i inovacija koje su urađene na novim serijama motora MC i ME, na njima je primjenjen i sistem održavanja prema stanju uz primjenu tehničke dijagnostike. Podaci dobijeni sa brodova na kojima je upotrijebljen sistem održavanja prema stanju uz primjenu tehničke dijagnostike pokazuju da je prosječno vrijeme između dva remonta 32000 radnih sati. [3] Ovom načinu održavanja u mnogome pomaže i primjena savremenih elektronskih uređaja za praćenje parametara i dijagnostiku. Za seriju motora MC, MAN B&W je proizveo elektronskih uređaja PMI analizator pritiska. [4, 5]

2.1. PMI analizator za dvotaktne brodske sporohodne motore serije MC

Za motore serije MC, MAN B&W je proizveo PMI analizator pritiska za mjerenje svih relevantnih parametara u cilindru motora u toku odvijanja radnog ciklusa. [3]



Slika 1. Elementi PMI sistema za mjerenje pritiska u cilindru motora [3]

PMI je kompjuterizovani uređaj za pouzdano i precizno izračunavanje performansi dvotaktnih i četvorotaktnih motora. Ovaj uređaj koristi visoko kvalitetni piezo-električni senzor pritiska i može automatski da identifikuje na kojem se cilindru vrše mjerenja. Nakon snimanja performansi podaci sa PMI analizatora se prebacuju na računar radi analize podataka. [4]

Na slici broj 1 prikazani su elementi PMI sistema za mjerenje promjene pritiska u cilindru motora tokom odvijanja ciklusa.

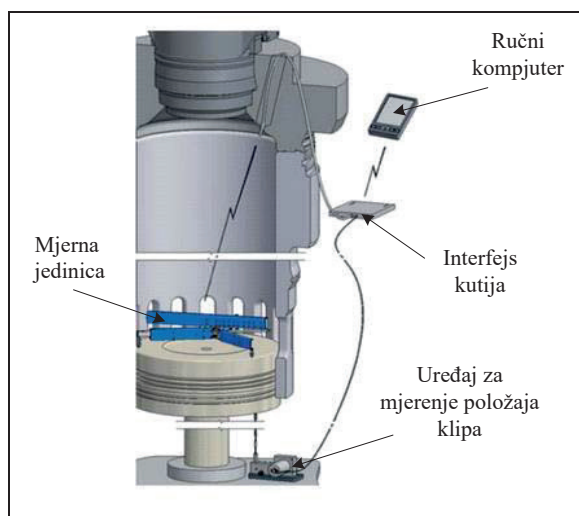
2.2 LDM uređaj za mjerenje unutrašnjeg prečnika košuljice cilindra motora

Uvid u stanje cilindarskih košuljica je veoma bitno. Mjerenje istrošenosti košuljica se redovno vrši prilikom vađenja klipa. Da bi se izmjerio prečnik cilindarske košuljice konvencionalnim internalnim mikrometrom potrebno je demontirati glavu sa cilindarske jedinice ili izduvni ventil. MAN B&W je u uređaje za dijagnostiku uvrstio i LDM (Liner Diameter Measuring Instrument). Korišćenjem uređaja LDM nije potrebno dizati glavu cilindarske jedinice ili izduvni ventil. Uređaj se postavlja kroz otvore ispirnog vazduha cilindarske košuljice do kojih se dolazi kroz kolektor ispirnog vazduha.

LDM uređaj je dizajniran za precizno mjerenje unutrašnjeg prečnika cilindarske košuljice. Sastoji se od:

- Mjerne jedinice koja se postavlja unutar cilindarske košuljice na čelo klipa. Izmjerene vrijednosti se putem radio signala šalju preko antene koja se postavlja na mjesto uputnog ventila. Antena je preko kabla spojena na interfejs kutiju.
- Uređaja za mjerenje položaja klipa koji se uz pomoć magneta postavlja ispod klipa a kablom je spojen na interfejs kutiju.
- Interfejs kutije koja ima dva ulazna signala, antenu i uređaj za mjerenje položaja klipa i jedan izlazni signal ka ručnom kompjuteru.
- Ručnog kompjutera gdje se pohranjuju podaci koji se u eksel formi mogu prebaciti na personalni računar putem blu tut-a, USB-a ili SD kartice.

Prosječno vrijeme mjerenja po jednoj cilindarskoj jedinici je oko jedan sat, pri čemu se vrše četiri mjerenja prečnika cilindarske košuljice na devet različitih visina. Preciznost uređaja je 0,03 mm. Ovaj uređaj se može primjeniti na cilindarske košuljice prečnika od 500 do 980 mm [6].



Slika 2. Prikaz mjerenja unutrašnjeg prečnika košuljice cilindra motora pomoću LDM uređaja [5]

3. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Istraživanje je sprovedeno na cilindarskim jedinicama glavnog dvotaktnog sporohodnog brodskog dizel motora MAN B&W 8K80 MC-C.

Tabela 1: Tehnički podaci za motor [7]

Proizvođač motora	Model motora	Princip rada motora	Maksimalna snaga	Broj cilindara	Prečnik cilindra/hod klipa
MAN B&W	8K80 MC-C	Dvotaktni sporohodni reverzibilni	28880 kW 104 min ⁻¹	8	800 mm 2300 mm

U toku eksploatacije motora praćeni su i evidentirani parametri motora u određenim vremenskim intervalima. Razlog za neprekidnom kontrolom parametara je neophodan kako bi se uočile određene promjene u: procesu sagorijevanju, opštem fizičkom stanju cilindarskih jedinica i generalno promjene u radu motora. [7]

Ključni parametri za određivanje performansi motora su: barometarski pritisak okoline, brzina broda, gaz broda, srednji indikatorski pritisak, pritisak kompresije, maksimalni pritisak sagorijevanja, indeks pumpe visokog pritiska goriva, pritisci izduvnih gasova, temperature izduvnih gasova, pritisak ispirnog vazduha, temperatura ispirnog vazduha, broj okretaja rotora turbokompresora, pritisak izduvnih gasova u izduvnom vodu posle turbokompresora, temperatura vazduha na usisu turbokompresora, razlika pritiska isped i iza usisnog filtera vazduha, razlika pritiska ispred i iza rashladnika vazduha i temperatura vazduha i rashladne vode prije i posle rashladnika ispirnog vazduha. [7]

Pritisci i temperature se moraju permanentno pratiti u cilju zaštite motora od pregrijavanja i kvarova. U tu svrhu se koristi sistem za daljinsko upravljanje i nadzor motora „Auto Chief C20“. Dnevne kontrole obuhvataju sve parametare koji utiču na performanse motora i njihova evidencija se unosi u mašinski dnevnik. Mjesečna kontrola se vrši za sve parametre koji utiču na performanse motora, mjerenjem pritisaka u cilindru motora kao i vizuelna kontrola cilindarskih košuljica i klipova kroz resiver ispirnog vazduha.

Kada su u pitanju performanse motora, posebna pažnja se mora usmjeriti na sledeće pokazatelje: direktno mjerljive pokazatelje, indirektno mjerljive pokazatelje i skrivene pokazatelje. [7]

Pod direktno mjerljivim pokazateljima podrazumjevamo pritiske i temperature koje očitavamo lokalno na samom motoru koristeći ugrađene termometre i manometre. Vrlo bitno je da su mjerni instrumenti ispravni i baždareni radi dobijanja vjerodostojnih podataka.

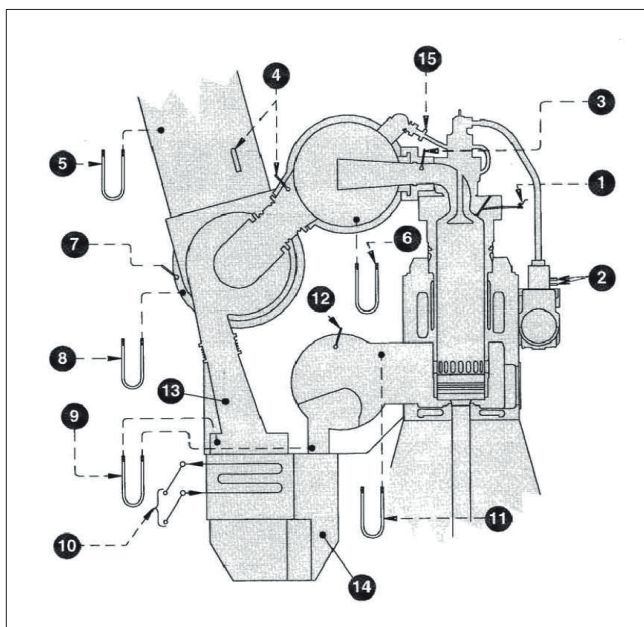
Pod indirektno mjerljivim pokazateljima podrazumjevamo mjerenje pritisaka u cilindru motora za vrijeme njegovog rada. Za snimanje dijagrama i mjerenje pritisaka u cilindru motora, korišćen je elektronski sistem PREMETS XL čija je funkcija identična sistemu PMI analizatora pritiska. Ovaj sistem nam pruža mogućnost da pored maksimalnog pritiska sagorijevanja, odredimo srednji indikatorski pritisak, pritisak kompresije, indikatorsku snagu i odnos između ugla rukavca koljenastog vratila i pritiska. Sistem PREMETS XL posjeduje računar gdje se uz pomoć instaliranog softvera vrši analiza snimljenih podataka. Softver omogućava da prije same analize podataka unesemo i dodatne informacije kao što su: temperatura izduvnih gasova, položaj letvi pumpi visokog pritiska goriva, ugao ubrizgavanja i broj okretaja rotora turbokompresora. Nakon unijetih podataka pristupa se njihovoj analizi. Na ekranu kompjutera prikazuju se slijedeći dijagrami: p/α dijagram za sve cilindre, p/α dijagram uključujući dp/dα krivulje za pojedine cilindre, zimirani p/α dijagram uključujući dp/dα krivulje za pojedine cilindre, p/V dijagram svih cilindara, p/V dijagram pojedinačnog

cilindra, p_{max} za sve izmjerene taktove na jednom cilindru, p_{max} za sve taktove i sve cilindre, srednja vrijednost p_{max} za sve cilindre, dijagram indikatorskog pritiska za sve cilindre, dijagram srednjeg indikatorskog pritiska za sve cilindre, dijagram devijacije srednjeg indikatorskog pritiska, dijagram devijacije indicirane snage i na kraju tabelarni prikaz svih podataka.

Na slici 3 su prikazana mjerna mesta na motoru na kojima se nalaze mjerni instrumenti ili mogućnost njihovog priključenja. [7]

Na označenim mjestima moguće je mjeriti sledeće parametre rada motora: indikatorski ventil za mjerenje pritiska u cilindru motora pozicija 1, poluga indeksa goriva i VIT indeksa pozicija 2, temperatura izduvnih gasova na izlazu iz cilindra pozicija 3, temperatura izduvnih gasova prije i posle turbokompresora pozicija 4, pritisak izduvnih gasova poslije turbokompresora pozicija 5, pritisak izduvnih gasova u izduvnom kolektoru pozicija 6, temperatura vazduha na ulazu u turbokompresor pozicija 7, pad pritiska vazduha na usisu turbokompresora pozicija 8, pad pritiska vazduha na rashladniku pozicija 9, temperatura vode na ulazu i izlazu rashladnika vazduha pozicija 10, pritisak ispirnog vazduha u kolektoru pozicija 11, temperatura ispirnog vazduha u kolektoru pozicija 12, temperatura ispirnog vazduha prije rashladnika pozicija 13, temperatura ispirnog vazduha poslije rashladnika pozicija 14 i temperatura rashladne tečnosti na izlazu iz motora pozicija 15.

Pored navedenih parametara kao dodatni podaci koji se još uzimaju kod direktno mjerljivih pokazatelja su: broj okretaja koljenastog vratila motora, broj okretaja rotora turbokompresora, pritisak goriva, temperatura goriva na ulazu u motor, temperatura rashladne tečnosti na ulazu u motor i barometarski pritisak okoline. [7]



Slika 3. Mjerna mjesta na motoru direktno mjerljivih parametara [7]

Iako su direktni i indirektni pokazatelji u granicama to ne mora da znači da motor radi u području optimalnog opterećenja. Glavni uzroci termičkog preopterećenja su upravo skriveni faktori, a to su: obrasla oplata broad i krila propelera, iskrivljena ili oštećena krila propelera, teško more i plitka voda na ruti plovidbe.

Da bi se izbjegao uticaj skrivenih faktora na termičko i mehaničko preopterećenje motora, potrebno je: da se izračuna efektivna snaga motora i srednji efektivni pritisak na konkretnom broju okretaja koljenastog vratila i da se izračuna skliz brodskog propelera.

Kada se odrede navedeni parametri provjerava se na dijagramu opterećenja motora položaj režima rad u odnosu na definisana ograničenja.

Pored praćenja svih prethodno navedenih parametara, jedna od bitnih mjera za primjenu principa održavanja prema stanju je vizuelna kontrola cilindarskih košuljica i klipova kroz kolektor ispirnog vazduha. Fizičko stanje klipnih prstenova je jako bitno. Uloga klipnih prstenova je da uz pomoć gasova u cilindru obezbjede brtvljenje između klipa i košuljice. Ovo brtvljenje se postiže djelovanjem gasova sa gornje i unutrašnje strane klipnog prstena, što rezultuje potiskivanjem klipnog prstena prema donjoj strani utora u klipu i prema vani ka zidu cilindarske košuljice [8]. Prilikom vizuelne kontrole cilindarskih jedinica bitan faktor čini i iskustvo posade, kao i njihova doslednost u redovnom i temeljnom pregledu i evidenciji dobijenih rezultata.

4. PODACI O SNIMLJENIM PERFORMANSAMA MOTORA U PERIODU OD MARTA 2009. DO MARTA 2012. GODINE

Ukupno je urađeno 12 mjerenja i predstavljeno u tabelama na osnovu čega je izvršeno poređenje izmjerenih parametara, analiza i donošenje zaključaka. Potrebno je naglasiti da su uslovi plovidbe broda za svako mjerenje bili različiti (meteorološki uslovi, stanje oplate broda i stanje mora) a razlikovali su se i u odnosu na mjerenja koja su vršena u probnoj vožnji nakon izgradnje broda.

U tabelama 2 i 3 prikazani su parametri koji karakterišu odvijanje procesa sagorijevanja. Može se uočiti da su svi parametri mjereni na broju okretaja koljenastog vratila motora gdje se postiže maksimalna snaga prilikom ispitivanja motora na kočnici. Svi parametri su u dozvoljenim granicama i neznatno se razlikuju od izmjerenih u probnoj vožnji broda nakon novogradnje.

Tabela 2. Pritisci u cilindru motora dobijeni mjerenjem elektronskim uređajem PREMETS XL [9]

Datum mjerenja	RPM [o/min]	Maksimalni pritisak kompresije p_{kmax} [bar]	Maksimalni pritisak sagorijevanja p_{smax} [bar]	Srednji indikatorski pritisak p_{si} [bar]	Srednja indikatorska snaga P_{si} [kW]	Srednja temperatura izduvnih gasova T_{sizr} [°C]
26.03.09	102,0	100,0	116,1	14,1	22078	333,5
18.05.09	103,5	106,0	119,9	15,5	24739	330,0
18.11.09	103,4	99,4	109,0	14,3	22720	349,4
13.02.10	103,6	104,0	115,9	14,8	23705	333,3
21.06.10	103,4	106,2	116,4	15,3	24420	328,1
22.11.10	103,4	107,9	117,4	15,6	24864	341,0
20.01.11	103,6	107,9	118,4	15,8	25172	357,1
14.06.11	103,5	105,5	115,8	15,2	24170	341,8
26.09.11	103,7	105,1	115,8	15,4	24748	342,9
20.12.11	104,0	103,5	113,6	14,8	23746	352,9
17.01.12	103,8	102,2	113,0	15,1	24207	350,3
13.03.12	103,3	102,9	112,8	15,1	24452	339,3

Još jedan od uslova pravilnog rada motora bez ekstremnih stanja, vibracija i termičkih preopterećenja je i uravnoteženje opterećenja po cilindarskim jedinicama. Za uravnoteženje opterećenja motora po cilindarskim jedinicama važno je da indicirani pritisak pojedinačnog cilindra ne odstupa više od 0,5 bara od srednje vrednosti indiciranog pritiska svih cilindara. Maksimalni pritisak sagorijevanja pojedinačnog cilindra ne smije odstupati više od 3 bara od srednjeg pritiska sagorijevanja svih cilindara motora, a razlika između maksimalnog pritiska sagorijevanja i pritiska kompresije ne smije biti veća od 35 bara [7].

Nakon izvršenog pregleda i kontrole cilindarskih košuljica, klipova i klipnih prstenova, konstatovano je da su cilindarske košuljica, klipovi i klipni prstenovi do momenta remonta prve cilindarske jedinice u zadovoljavajućem stanju.

Tabela 3. Parametri ispirnog vazduha [9]

Datum mjerjenja	Broj okretaja turbo kompresora 1/2 [o/min]	Temperatura				Pritisak ispirnog vazduha p_{isv} [bar]
		Vazduha na ulazu u kompresor T_{vauk} [°C]	Vode na ulazu u rashladnik T_{vour} [°C]	Vazduha na ulazu u rashladnik T_{vaur} 1/2 [°C]	Vazduha na izlazu iz rashladnika T_{vair} 1/2 [°C]	
26.03.09	11120/11100	30	36	151/152	38/38	2,00
18.05.09	11613/11566	41	40	180/170	42/42	2,20
18.11.09	11244/11201	41	34	185/185	39/40	2,00
13.02.10	11320/11324	36	36	165/175	41/40	2,11
21.06.10	11636/11638	41	38	180/84	44/43	2,20
22.11.10	11580/11610	41	38	180/85	44/44	2,20
20.01.11	11708/11714	41	38	179/181	43/43	2,20
14.06.11	11627/11629	42	36	180/85	44/42	2,40
26.09.11	11580/11600	42	36	180/185	44/44	2,20
20.12.11	11460/11460	40	37	180/180	44/44	2,10
17.01.12	11390/11415	42	39	177/180	44/44	2,10
13.03.12	11420/11450	40	38	175/180	44/44	2,10

Remont prve cilindarske jedinice urađen 16. 10. 2010. godine nakon 20637 radnih sati, a remont posljednje cilindarske jedinice urađen je 18. 12. 2011. godine nakon 26876 radnih sati. Pod remontom cilindarske jedinice se podrazumijeva demontaža cilindarske glave, njeno čišćenje i zamjena gumenih brtvi između gornjeg dijela glave i prostora za hlađenje. Zatim, vađenje klipa, njegovo čišćenje, mjerenje istrošenja i po potrebi zamjena donjeg dijela klipa, kao i obavezna zamjena klipnih prstenova. Nakon toga čišćenje gornjeg dijela košuljice cilindra od nakupljenih naslaga karbona i mjerenje istrošenosti cilindarske košuljice uz pomoć internalnog mikrometra.

U tabeli broj 4 prikazani su podaci o istrošenosti cilindarskih košuljica. Istrošenost košuljica mjereno je uzdužno i poprečno, nije prelazila vrijednost veću od 0,03 mm/1000 h, što je veoma malo ako je maksimalno dozvoljeno istrošenje u granicama od 0,4 % do 0,8 % od prečnika cilindarske košuljice. Za prečnik od 800 mm to iznosi 3,2 mm do 6,4 mm [7].

U tabeli 5 su prikazani opšti podaci koji imaju znatan uticaj na pojedine performance motora. Može se uočiti da na brzinu broda značajno utiče deplasman i veličina skliza. Veličina skliza vezana je za uslove plovidbe i koliko je obrastao trup broda.

U tabeli 6 prikazani su parametri vezani za brodsko gorivo. Bitan parametar je specifična potrošnja goriva i može se vidjeti da je ona u funkciji od veličine donje toplotne moći goriva. Donja toplotna moć zavisi od kvaliteta goriva.

U tabeli 7 prikazane su vrijednosti izmjerene snage i opterećenja motora. Opterećenje motora kretalo se između 75 % i 86 %. Izmjerene vrijednosti snage su očekivane s obzirom na uslove plovidbe i deplasman broda.

Tabela 4. Periodika pregleda i kontrole cilindarskih jedinica [9]

Datum	Redni broj	Radni sati	Istrošenje mm/1000 h		Komentar
			Uzdužno	Poprečno	
16.10.10	1	20637	0,03	0,02	Košuljica u dobrom stanju, vidljivi tragovi mašinske obrade, nema tragova ogrebotina, zaribavanja ili korozije.
14.12.10	8	21617	0,02	0,02	Košuljica u dobrom stanju, vidljivi tragovi mašinske obrade, nema tragova ogrebotina, zaribavanja ili korozije.
10.03.11	4	22924	0,02	0,01	Košuljica u dobrom stanju, vidljivi tragovi mašinske obrade, nema tragova ogrebotina, zaribavanja ili korozije.
31.05.11	7	24141	0,02	0,01	Košuljica u dobrom stanju, vidljivi tragovi mašinske obrade, nema tragova ogrebotina, zaribavanja ili korozije.
20.07.11	5	24796	0,01	0,01	Košuljica u dobrom stanju, vidljivi tragovi mašinske obrade, nema tragova ogrebotina, zaribavanja ili korozije.
02.09.11	2	25434	0,01	0,01	Košuljica u dobrom stanju, vidljivi tragovi mašinske obrade, nema tragova ogrebotina, zaribavanja ili korozije.
17.10.11	3	25995	0,01	0,01	Košuljica u dobrom stanju, vidljivi tragovi mašinske obrade, nema tragova ogrebotina, zaribavanja ili korozije.
18.12.11	6	26876	0,01	0,01	Košuljica u dobrom stanju, vidljivi tragovi mašinske obrade, nema tragova ogrebotina, zaribavanja ili korozije.

Tabela 5. Opšti podaci relevantni za performanse motora [9]

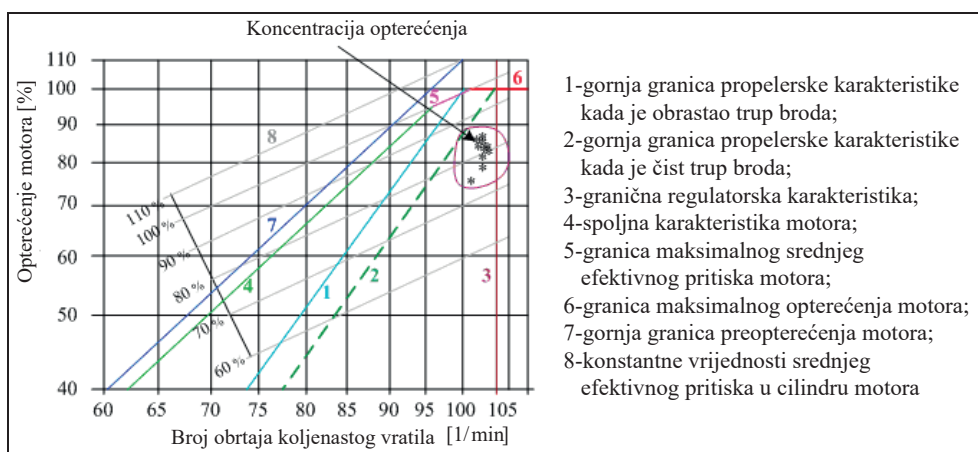
Datum mjerenja	Radni sati motora [h]	Brzina broda u [čv]	Skliz [%]	Deplasman broda [MT]	Deplasman u odnosu na maksimalni [%]	Maksimalni deplasman 51317,9 [MT]
26.03.09	12254	19,9	12,1	44999	87,7	
18.05.09	13197	21,2	8,2	47700	92,9	
18.11.09	15529	19,8	13,8	22993	44,8	
13.02.10	16803	21,3	7,4	28741	56,0	
21.06.10	18966	22,0	4,2	44108	86,0	
22.10.10	21238	22,2	3,3	46615	90,8	
20.01.11	22166	21,8	5,2	47980	93,5	
14.06.11	24337	21,8	5,1	47260	92,1	
26.09.11	25694	22,3	3,4	43289	84,4	
20.12.11	26905	22,6	2,1	37846	73,7	
17.01.12	27286	22,8	1,3	34523	67,3	
13.03.12	28099	22,4	2,3	36497	71,1	

Tabela 6. Parametri goriva [9]

Datum mjerenja	Gustoća ρ [kg/m ³]	Specifična potrošnja		Temperatura na ulazu u motor T_{gum} [°C]	Donja toplotna moć H_d [kJ/kg]	Specifična potrošnja goriva u probnoj vožnji sa ISO korekcijom pri 90 % opterećenja 173.70 g/kWh
		[g/kWh]	korigovana [g/kWh]			
26.03.09	986,2	195,3	184,5	136	40351	
18.05.09	977,6	187,3	177,5	130	40465	
18.11.09	977,0	186,5	176,2	136	40355	
13.02.10	990,0	189,7	177,7	135	40000	
21.06.10	977,2	188,4	178,5	140	40471	
22.11.10	969,9	183,7	175,9	138	40896	
20.01.11	955,8	182,2	175,3	137	41082	
14.06.11	991,0	189,6	176,3	139	39724	
26.09.11	992,1	187,1	176,4	139	40287	
20.12.11	990,3	189,5	177,9	139	39996	
17.01.12	989,6	189,0	175,9	139	39743	
13.03.12	979,9	188,3	176,9	139	40135	

Tabela 7. Izmjerene vrijednosti snage [9]

Datum mjerenja	Indicirana snaga P_i [kW]	Efektivna snaga P_e [kW]	Snaga na propelerskom vratilu P_{pv} [kW]	Opterećenju [%]	Maksimalna efektivna snaga 28880 [kW]
26.03.09	22110,0	20537,8	20332,4	76,6	
18.05.09	24739,0	23132,2	22901,0	85,7	
18.11.09	22792,0	21198,0	20986,0	78,9	
13.02.10	23714,4	22117,5	21896,3	82,1	
21.06.10	24425,7	22831,9	22603,5	84,6	
22.11.10	24844,1	23250,3	23017,8	86,0	
20.01.11	25172,0	23574,7	23338,9	87,1	
14.06.11	24170,2	22574,8	22349,1	83,7	
26.09.11	24748,0	23144,7	22913,3	85,7	
20.12.11	23746,0	22142,8	21921,4	82,2	
17.01.12	24207,0	22603,7	22377,7	83,8	
13.03.12	24044,0	22451,5	22227,0	83,3	



Slika 4. Dijagram opterećenja motora [7]

Na dijagramu opterećenja slika 4, može se vidjeti da je koncentracija opterećenja motora bila u zoni ispod gornje granice propelerske karakteristike kada je čist trup broda (linija 2) što je svakako poželjno i govori o tome da motor nije radio u zoni preopterećenja.

5. ZAKLJUČAK

Održavanje sistema broskog pogona danas je nezamislivo bez upotrebe savremenih dijagnostičkih postupaka i dijagnostičke opreme. Tehnički sistemi kao što je brodski pogon danas zahtijevaju sofisticiranu opremu za njegovo održavanje.

Cilindarska jedinica sama po sebi predstavlja složen sistem sa svojim komponentama i usko je povezana sa drugim sistemima broskog pogonskog motora, kao što su sistem goriva, sistem ulja za podmazivanje i sistem rashladne tečnosti. Održavanje tako složenog sistema ne može se osloniti samo na jedan vid održavanja. Održavanje prema stanju je važan segment sistema planiranog održavanja na osnovu radnih sati i vremenskog intervala pojedinih komponenata sistema cilindarske jedinice.

Rezultati dobijeni istraživanjem glavnog pogonskog dvotaktnog motora "MAN B&W 8K80 MC-C" na brodu "HS SCOTT" pokazuju da je motor tokom perioda eksploatacije pravilno održavan i eksploatisan, te da nije radio u područjima termičkih preopterećenja. I pored konstruktivnih unapređenja motora, primjene elektronske opreme za dijagnostiku i savremenih mjernih instrumenata, najvažniju ulogu u primjeni metode održavanja prema stanju ima posada mašinskog odijeljenja. Stručna osposobljenost i tehničko obrazovanje u kombinaciji sa iskustvom su ključ uspješnosti održavanja brodskih sistema. Pored stručnosti, obrazovanja i iskustva, doslednost i kontinuiranost u sprovođenju mjera održavanja prema stanju su takođe bitne. U koliko se praćenje parametara, snimanje performansi i vizuelna kontrola cilindarskih jedinica ne vrši redovno i zapažanja ne evidentiraju izgubiće se kontinuitet u praćenju stanja i eventualno nastale promjene neće biti blagovremeno uočene. U tom slučaju ni najsoficiranija oprema ne može pomoći. U svakodnevnim aktivnostima vrlo je bitna navika članova mašinskog odeljenja da osluškuje i vizuelno kontroliše sve sisteme motora, jer se prve promjene obično manifestuju u promjeni zvuka, vibracija, temperature ili pritiska.

6. REFERENCE

- [1] D. Petković, M. Aleksić, P. Stanojević (2020), *Koncepcije održavanja*, Mašinski fakultet u Zenici, Zenica.
- [2] I.Šegulja, A. Bukša (2006), *Održavanje broskog pogona*, Pomorstvo, god. 20, br. 2, str. 105-118.
- [3] *Service Experience MAN B&W Two-stroke Diesel Engines*, Copenhagen 2016.
- [4] *PMI System Pressure analyser, MAN B&W Diesel*, Copenhagen 2005.
- [5] *CoCoS Maintenance, Designed for Maintenance Excellence. MAN B&W Diesel A/S*, Copenhagen 2005.
- [6] *LDM Liner Diameter Measuring Instrument, Chris-Marine AB*, Sweden 2019.
- [7] *Instruction Manual Dosan-MAN B&W Diesel Engines 8K80 MC-C*, Copenhagen 2007.
- [8] M.Tomić, S.Petrović (1994), *Motori sa unutrašnjim sagorevanjem*, Mašinski Fakultet, Beograd.
- [9] Arhiva broda HS SCOTT

**ODREĐIVANJE RADIJACIONIH DOZA U RADNOM PROSTORU
LABORATORIJE FIZIKE UNIVERZITETA U TUZLI U SVRHU
ISPITIVANJA POTREBE ZA RADIOLOŠKOM ZAŠTITOM**

**DETERMINATION OF RADIATION DOSES IN THE WORK AREA OF
THE PHYSICS LABORATORY OF THE UNIVERSITY OF TUZLA
FOR THE PURPOSE OF ASSESSING THE NEED FOR
RADIOLOGICAL PROTECTION**

**Dr.sc. Amela Softić, vanredni profesor
Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Tuzli
Urfeta Vejzagića 4, Tuzla**

REZIME

Fokus provedenog istraživanja je bio izračunavanje vrijednosti efektivnih doza osoba koje svakodnevno rade u laboratorijskom prostoru fizike radi estimacije rizika od štetnih efekata uzrokovanih zračenjem. Za izračunavanje radijacionih doza je korišten The Health Physicist Companion (HPC) software. Dobiveni rezultati radijacionih doza u Laboratoriji Univerziteta u Tuzli, za koje do sada nije bilo na raspolaganju nikakvih podataka, su upoređeni sa dozvoljenim vrijednostima prema Međunarodnoj Komisiji za radiološku zaštitu (International Commission on Radiological Protection - ICRP). Takođe je ispitano koliko je postavljanje olovne zaštite umanjilo ove vrijednosti. Dobivene vrijednosti, upoređene sa dozvoljenim, ne ukazuju na neku realnu radijacijsku opasnost po laboratorijsko osoblje.

Ključne riječi: radiološka zaštita, efektivna doza, HPC

ABSTRACT

The focus of the performed research was to calculate the values of the effective doses of personnel working at the physics laboratory on the daily basis order to estimate the risk of harmful effects caused by radiation. The Health Physicist Companion (HPC) software was used for the calculations of the radiation dose. The obtained results of the radiation doses at the Tuzla University Laboratory, for which we have not had any available values, were compared with allowed values according to International Commission on Radiological Protection - ICRP. It was also examined how much the lead shielding installation reduced these values. The results do not indicate a significant radiation hazard for the laboratory staff.

Keywords: radiological protection, effective dose, HPC

1. UVOD

Radioaktivni materijali emituju penetrirajuće jonizirajuće zračenje koje može da ošteti živo tkivo. Pored prirodnih radioaktivnih materijala, okoliš opterećuje i veliki broj vještačkih izvora zračenja. Njihovo zračenje djeluje na sredinu preko apsorbovane energije koja može

da uzrokuje fizičke, hemijske i biološke promjene u datoj sredinikoje ne oviseseamo od kvantiteta već i od vrste zračenja i energetskog spektra [1].

Osnovna veličina u zaštiti od zračenja je apsorbovana doza - D (količina apsorbovane energije zračenja po jedinici mase). Jačina apsorbovane doze označava apsorbovanu dozu u jedinici vremena (D/t). Ekvivalentna doza uzima u obzir kvalitet, odnosno djelotvornost zračenja i to je mjera količine radijacije koju apsorbuje tijelo, korigovana za odgovarajući radijacijski težinski faktor, pošto različite vrste zračenja imaju različit stepen štetnosti. Međutim, kod različitih organa očekujemo različitu mogućnost bioloških posljedica [2], te se uvodi pojam efektivne doze – E, koja se dobije korigovanjem ekvivalentne doze za odgovarajući težinski faktor za određeni organ ili tkivo.

Jačina apsorbovane doze gama zračenja značajno zavisi i od oblika i dimenzije radioaktivnog izvora, apsorpcionog faktora i geometrije snopa zračenja.[2]

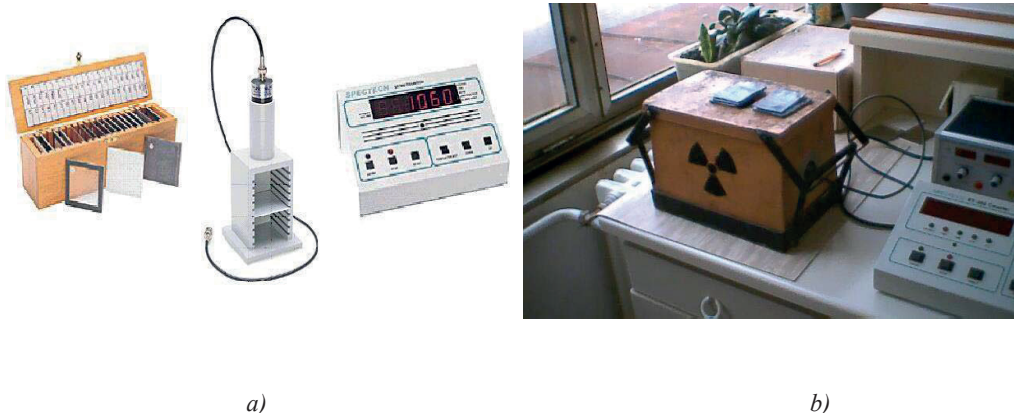
Cilj ovog rada je da se odrede jačine efektivne i ekvivalentne doze u radnom prostoru laboratorije za radioaktivni izvor Co-60, odnosno, upoređivanje dobivenih vrijednosti sa dozvoljenim vrijednostima.

2. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

Laboratorij Fizike Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Tuzli u svakodnevnim laboratorijskim mjerenjima radi sa radioaktivnim izvorom kobalta (Co^{60}). Co^{60} ima složen spektar, odnosno, na svaki njegov raspad emituje se po jedan foton energije 1,17 MeV i jedan foton od 1,33 MeV [1].

Nalaženje jačine apsorpcione doze i izračunavanje efektivne doze zračenja u dijelu Laboratorije za fiziku Univerziteta u Tuzli u kojem se izvode vježbe sa radioaktivnim izvorima daje niz korisnih informacija o eventualnoj potrebi za zaštitom pri svakodnevnom radu sa izvorima gama zračenja kao i načinima optimizacije eksperimentalne konfiguracije.

U okviru raspoložive eksperimentalne opreme Laboratorije, realizovana su transmisiona mjerenja sa GM brojačem (model Pasco ST350) i pratećim elektronskim modulima za registrovanje električnih signala, u cilju estimacije redukcije intenziteta gama zračenja pri prolasku kroz materijale. U cilju optimizacije eksperimentalne konfiguracije, odnosno što veće redukcije fonskih impulsa, jedan dio eksperimenta je uključivao konstrukciju olovne zaštite. Slika 1. prikazuje korištenu eksperimentalnu aparaturu (a) koja je uključivala olovnu zaštitu od 30 mm (b).



Slika 1. a) Osnovni elementi eksperimentalne postavke, b) Eksperimentalna postavka sa zaštitom

Mjerenja su vršena u cilju ispitivanje transmisije zračenja Co^{60} kroz uzorke različitih debljina i od različitih materijala (olovo, aluminijum, plastika, polimer) koji se obično nalaze u okruženju između radnog osoblja i izvora zračenja.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Tabela 1. iznosi rezultate transmisionih mjerenja vršenih u Laboratoriji. Vrijednosti naznačene crvenom bojom označavaju broj registrovanih impulsa u minuti za 10000 gama istorija (potreban broj istorija koji daje relativnu statističku grešku proračuna manju od 1%) i redukciju intenziteta gama zračenja pri transportu kroz materijal. Kao što se da primjetiti, transmisijaje za različite debljine olova, od 0,079 cm, 0,317 cm, 0,635 cm i 1,196, je iznosila 79,34%, 79,12%, 64,09% i 42,85%, respektivno. Tabela 1. takođe prikazuje transmisije za različite debljine ostalih materijala (aluminijum i plastika).

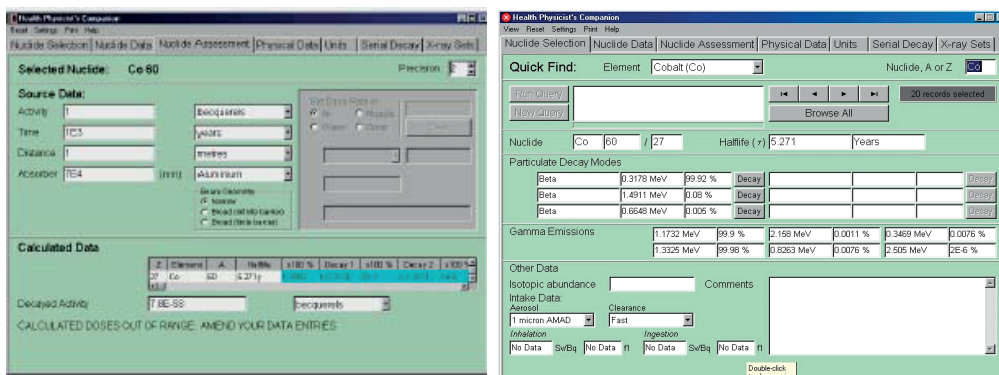
Kao što se može uočiti iz podataka u Tabeli 1. korištenje zaštitne olovne konstrukcije primjetno je reduciralo fonsko zračenje: srednja vrijednost fonskog zračenja u prostoru laboratorije je iznosila 13,5664 imp/min bez olovne zaštite, odnosno 8,3321 imp/min sa zaštitom.

Tabela 1. Rezultati transmisionih mjerenja

FON bez olovne zaštite	IZVOR U ZAŠTITI	OLOVO Q (0,032 in=0,079 cm)	ALUMINIJUM A (folija - 0,7 mm)	PLASTIKA F (0,040 in=0,1 cm)
vrijeme(s)	vrijeme(s)	vrijeme(s)	vrijeme(s)	vrijeme(s)
46.137,4	4.425,00	4.929,36	3.987,83	4.340,57
43.826,3	4.325,13	5.919,87	3.991,76	4.587,78
42.717,1	4.275,91	5.315,15	4.072,69	4.505,42
44.226,9	4.342,01	5.388,13	4.017,43	4477,9233
13,5664	138,1847	111,3560	149,3493	133,9907
transmisija		0,7934 ± 0,0126	1,0860 ± 0,0196	0,9677 ± 0,0166
u olovnoj zaštiti	S (0,125 in=0,3175 cm)	0,0984 N (0,090 in=0,2286 cm)	POLIMER D (10 mm)	
vrijeme(s)	vrijeme(s)	vrijeme(s)	vrijeme(s)	vrijeme(s)
68.996,2	5.217,25	4.975,52		
69.392,1	5.625,83	5.173,37		
77.643,1	5.362,52	4.643,78		
72.010,5	5.401,87	4.930,89		
8,3321	111,0727	121,6819		
	0,7912 ± 0,0125	0,8729 ± 0,0143		
T (0,250 in=0,635 cm)		P (0,125 in=0,315 cm)	vrijeme(s)	
	17.5.2004. 6.507,00	23.3.2004. 5.217,25		4.249,78
	18.5.2004. 6.579,70			4.159,49
	18.5.2004. 6.572,66			4.109,73
	6.553,12	5.217,25		4173,00
	91,5594	115,0031		143,7815
	0,6409 ± 0,0095	0,8215 ± 0,0132		1,0431 ± 0,0185
T+S+Q+R (0,471 in=1,1963 cm)				
	12.4.2004. 9.034,07			
	13.4.2004. 9.211,34			
	29.6.2004. 9888,97			
	9378,13			
	63,9787			
	0,4285 ± 0,0059			
DIMENZIJE				
izvor:	debljina: 5,8 mm	prečnik: 26,0 mm	stalak:	debljina zida: 5 mm
olovna zaštita:	debljina: 30,0 mm		window:	prečnik: 35,0 mm
				d od pločice: 8,0 cm
				d od izvora 10,15 mm

*sva mjerenja su za 10 000 otkucaja

Korišteni softverski paket HPC je pomoćni program koji se koristi u profesionalnoj zaštiti od zračenja kao baza podataka za nukleide, te za izračunavanje radijacionih doza i ostalih aspekata zračenja. Slika 2. prikazuje radni prostor HPC softvera [3]. U proračunima radijacijskih doza je korištena aktivnost izvora Co^{60} kod koje je uzeto u obzir vrijeme proteklo od baždarenja.



Slika 2. Izgled radnog prostora HPC softvera

U Tabeli 2. su prikazane izračunate godišnje ekvivalentne doze za Co^{60} u vazduhu sa i bez olovne zaštite dobivene HPC-om za udaljenosti od 10 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm i 100 cm od izvora. Ove udaljenosti su uzete iz razloga što osobe koje neposredno učestvuju u izvođenju radijacijskih mjerenja sa Co^{60} su tokom mjerenja udaljene od izvora između 10 cm i 100 cm. Tabela 2. takođe daje godišnje efektivne doze za različite organe, odnosno, tkiva torza koje su najviše izložene pri radu u laboratoriji.

Prema podacima Međunarodne Komisije za radiološku zaštitu (International Commission on Radiological Protection – ICRP), dozvoljena gornja granica efektivne doze za zaposlenika starijeg od 18 godina je 20 mSv u jednoj kalendarskoj godini [4,5], dok je dobivena vrijednost 1,147 mSv godišnje (za udaljenost od 10 cm). Kao što se vidi iz Tabele 2. dobivene vrijednosti su manje od dozvoljene vrijednosti efektivne doze za odrasle osobe. Takođe, one su manje i od dozvoljenih vrijednosti za osobe koje se obučavaju u laboratoriju a mlađe su od 18 godina, a koja iznosi je 6 mSv godišnje [4]. Dodatno je, sa upotrebom olovne zaštite, vrijednost ekvivalentne doze za udaljenost od 10 cm smanjena sa 1,147 mSv na $1,553 \cdot 10^{-1}$ mSv godišnje.

Poređenja radi, iz tabele dobivenih vrijednosti izdvajamo vrijednosti efektivne doze za kožu i ovarije, koje iznose $1,147 \cdot 10^{-1}$ mSv godišnje i $2,294 \cdot 10^{-1}$ mSv godišnje na srednjoj udaljenosti od 10 cm, respektivno. Granična ekvivalentna doza za kožu je 500 mSv u jednoj kalendarskoj godini (uzeta kao srednja vrijednost na površini od 1 cm^2 neovisno od ukupne površine izložene zračenju), dok je za abdomen zaposlenika ženskog pola reproduktivnog kapaciteta 13 mSv za tri mjeseca.[4]

Tabela 2. Efektivne i ekvivalentne doze za Co^{60} dobivene korištenjem HPCa

Ekvivalentna Doza (u vazduhu, Co-60, A=1,874 μ Ci)					
	100 cm	75 cm	50 cm	25 cm	10 cm
Realna	5,735E-06 mSv/h	1,020E-05 mSv/h	2,924E-05 mSv/h	9,176E-05 mSv/h	5,735E-04 mSv/h
	5,733E-06	1,020E-05	2,923E-05	9,173E-05	5,733E-04
Godišnja ekvivalentna doza (za 50 radnih sedmica, 40 radnih sati sedmično)					
	1,147E-02 mSv/year	2,040E-02 mSv/year	5,848E-02 mSv/year	1,835E-01 mSv/year	1,147E+00 mSv/year
Ekvivalentna doza (sa olovnom zaštitom od 3 cm)					
	100 cm	75 cm	50 cm	25 cm	10 cm
	7,765E-07 mSv/h	1,380E-06 mSv/h	3,106E-06 mSv/h	1,242E-05 mSv/h	7,765E-05 mSv/h
	1,553E-03 mSv/year	2,760E-03 mSv/year	6,212E-03 mSv/year	2,484E-02 mSv/year	1,553E-01 mSv/year
Efektivna Doza (bez zaštite)					
	jetra/mozak/bubrezi/pankreas/slezena (0,05)	koža (0,1)	pluća/želudac (0,12)	ovariji/testisi (0,20)	
100 cm					
mSv/h	2,868E-07	5,735E-07	6,882E-07	1,147E-06	
mSv/year	5,735E-04	1,147E-03	1,376E-03	2,294E-03	
75 cm					
	5,100E-07	1,020E-06	1,224E-06	2,040E-06	
	1,020E-03	2,040E-03	2,448E-03	4,080E-03	
50 cm					
	1,462E-06	2,924E-06	3,509E-06	5,848E-06	
	2,924E-03	5,848E-03	7,018E-03	1,170E-02	
25 cm					
	4,588E-06	9,176E-06	1,101E-05	1,835E-05	
	9,176E-03	1,835E-02	2,202E-02	3,670E-02	
10 cm					
	2,868E-05	5,735E-05	6,882E-05	1,147E-04	
	5,735E-02	1,147E-01	1,376E-01	2,294E-01	

Da bi se ukazalo o koliko niskim dobivenim vrijednostima se radi, može se uraditi komparacija sa ostalim izvorima zračenja kojim su osobe izložene u svakodnevnom životu. Prema podacima ICRP, a bazirano na istraživanjima provedenim u Velikoj Britaniji, svaka osoba je izložena približno 2,5 milisieverta godišnje od prirodnog zračenja okoline (kosmičkog zračenja, kosmogenih radionuklida, radionuklida u tijelu, itd) [6]. Najveći udio iz prirodne okoline čini plin radon – 1,3 mSv, dok je godišnji doprinos vještačkih izvora 0,4 - 1,5 mSv.[6]

Prema svjetskim istraživanjima, radnici u Nuklearnoj industriji su izloženi do 4,5 mSv godišnje, približno koliko i avionske posade, koji su dodatno izložene kosmičkom zračenju [6]. Doza od 5 Sv može biti fatalna za osobu, dok kod dijela populacije koji je izložen niskim nivoima radijacije, za svaki 10 Sv totalne doze ekvivalent uzrokuje novi slučaj raka.[7]

4. ZAKLJUČAK

Ovim istraživanjem dobivene vrijednosti, upoređene sa dozvoljenim, ne ukazuju na neku realnu radijacijsku opasnost po osoblje. Većina mjerenja su davala očekivane rezultate, dok za par materijala i debljina to nije bio slučaj, što bi bilo interesantno istražiti posebnom detaljnijom analizom, a koja odstupa od primarnih ciljeva ovog rada.

Evidentno je da je korištenje zaštitne olovne konstrukcije reduciralo fonskozračenje i smanjilo vrijednost ekvivalentne doze. Stoga se nameće zaključak da bi u slučajevima kada je

aktivnost testnog uzorka veća, ali i za uzorke sa malim vrijednostima aktivnosti za dugoročne, svakodnevne primjene, postojanje fonske zaštite radnog prostora laboratorije bilo poželjno.

5. REFERENCE

- [1] Young, H., Freedman R. (2020), *UniveristyPhysics*, New York Addison-WesleyPublishing Company Inc., 15th edition.
- [2] Biological Radiation Effects (2008), *Microsoft® Encarta®*, Redmond WA, Microsoft Corporation.
- [3] Health Physicist Companion (2002), *User Manual* (Version 1.4.2), Syberad Ltd..
- [4] Health Physics Society, <http://www.hps.org/publicinformation/radfactsheets/>
- [5] U.S. Department of Health & Human Services (2024), *Radiation emergency medical management*, adopted from ICRP, Guidance for Occupational Exposure, https://remm.hhs.gov/ICRP_guidelines.htm.
- [6] ICRP (2021), *Use of dose quantities in radiological protection*, Ann. 147 ICRP Publication 50(1), <https://www.icrp.org/>.
- [7] ICRP (2005), *Protecting People Against Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack*, ICRP Publication 96.

8. Konferencija „ODRŽAVANJE 2024“
Zenica, Bosna i Hercegovina, 13 - 14. novembar 2024.

SEKCIJA 2
SESSION 2

ULOGA I ZNAČAJ FABRIČKE SLUŽBE ODRŽAVANJA NA PRIMJERU IZRADE KORITA PUŽNOG TRANSPORTERA

THE ROLE AND SIGNIFICANCE OF THE FACTORY MAINTENANCE SERVICE ON THE EXAMPLE OF MANUFACTURING A SCREW CONVEYOR TROUGH

v.prof.dr.sc. Ibrahim Plančić,
Aldina Mehmedović, dipl.inž.maš.
Mašinski fakultet, Univerzitet u Zenici
Fakultetska br.1, 72 000 Zenica

REZIME

Održavanje mašina i opreme je ključni aspekt upravljanja proizvodnim procesima koji osigurava njihovu pouzdanost, efikasnost i dugotrajnost. Tokom nekoliko posljednjih desetljeća, trendovi u oblasti održavanja proizvodnih procesa su se značajno promijenili, posebno usljed napretka i inovacija u tehnologiji, metodološkom pristupu samom održavanju i potrebi za povećanjem produktivnosti. Usvajanje savremenih pristupa, kao što su digitalizacija i prediktivno održavanje korištenjem senzora i analitičkih alata za predviđanje kada će doći do kvara omogućava kompanijama da smanje troškove, povećaju efikasnost i poboljšaju sigurnost na radu. Međutim i pored toga, u većini današnjih proizvodnih organizacija još uvijek je značajno zastupljeno klasično održavanje bazirano na nezavisnosti i vlastitoj izradi rezervnih dijelova posebno kada je u pitanju sektor održavanja konvencionalnih mašina za izvođenje jednostavnih tehnoloških operacija. U radu je ukazano na značaj razvoja i osposobljavanje vlastite službe održavanja kroz primjer projektovanja tehnologija izrade korita za pužni transporter u jednoj proizvodnoj kompaniji. Korito je izrađeno vlastitim resursima kombinovanim metodama oblikovanja lima postupkom kružnog savijanja lima primjenom savijačice sa četiri valjka i postupaka zavarivanja prethodno savijenih dijelova.

Ključne riječi: korito, pužni transporter, oblikovanje lima, kružno savijanje, savijačica

SUMMARY

The maintenance of machines and equipment is a key aspect of managing production processes, ensuring their reliability, efficiency, and longevity. Over the past few decades, trends in the maintenance of production processes have changed significantly, especially due to advancements and innovations in technology, methodological approaches to maintenance, and the need to increase productivity. The adoption of modern approaches, such as digitalization and predictive maintenance using sensors and analytical tools to anticipate failures, allows companies to reduce costs, enhance efficiency, and improve workplace safety.

However, despite this, conventional maintenance based on independence and in-house production of spare parts is still prevalent in most contemporary manufacturing organizations, particularly in the maintenance sector for conventional machines performing simple technological operations. This paper highlights the importance of developing and training an in-house maintenance service through the example of designing technology for producing troughs for screw conveyors in a manufacturing company. The trough was made using in-house resources, combining sheet metal forming methods through the process of circular bending using a four-roll bending machine and welding previously bent parts.

Keywords: trough, screw conveyor, sheet metal forming, circular bending, bending machine

1. UVODNI DIO

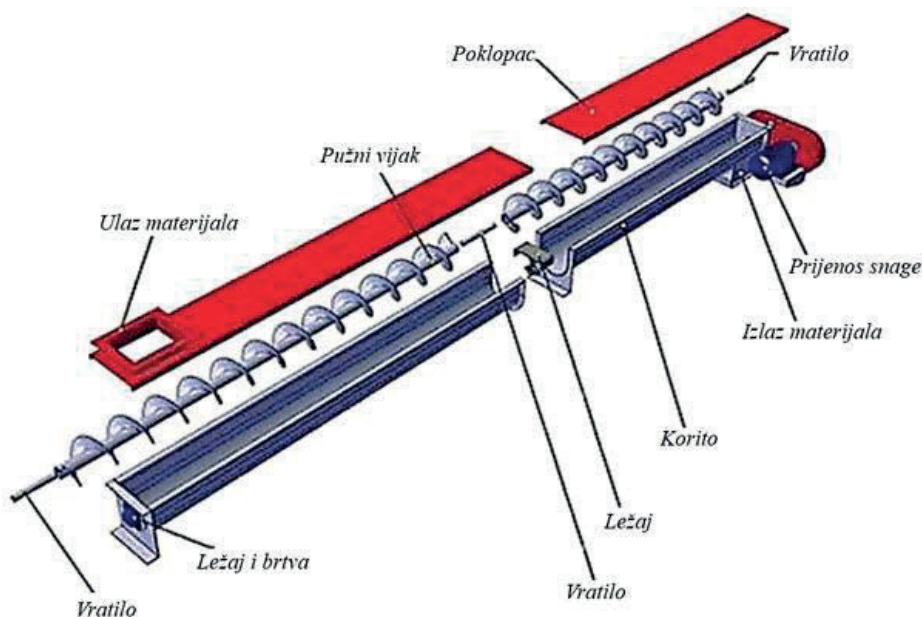
Zadatak službe održavanja svake proizvodne kompanije je održavanje svih sredstava za rad u proizvodnom stanju koje se najčešće provodi njegovim klasičnim i ustaljenim načinom izvođenja. Ovo je neophodno jer je težnja svake proizvodne organizacije poslovati sa što manjim zastojsima proizvodnje i sa što nižim troškovima. U tom smislu, održavanje radnih sredstava mora biti ekonomično i u isto vrijeme kvalitetno, a to omogućava konkurentnost kompanija na tržištu. Ekonomičnost i kvalitet koncepta održavanja svake kompanije ovise o izboru metoda održavanja. Klasično održavanje u proizvodnim kompanijama pored redovnih provjera stanja opreme, njihovog dokumentovanja i praćenja, te obuke zaposlenih, obično uključuje aktivnosti koje se fokusiraju na preventivne i korektivne mjere očuvanja i poboljšanje njihovih performansi, smanjenje zastoja i povećanje efikasnosti. Danas je, također očigledno da se u savremenoj industrijskoj proizvodnji sve više pažnje pridaje potpunoj nezavisnosti službe održavanja prilikom tekućeg i korektivnog održavanja, odnosno izrade rezervnih dijelova za kojima se javlja potreba prilikom održavanja radnih sredstava. Intencija je da se ovakvi dijelovi izrađuju, odnosno proizvode vlastitim resursima i u vlastitom proizvodnom okruženju pogotovo ako su u pitanju jednostavniji dijelovi većih gabarita i sa značajnijim učešćem manualnog rada. Potreba za rezervnim dijelovima dolazi ili usljed kvara postojećih radnih elemenata koje onda treba zamijeniti najčešće brzo i efikasno, ili kao rezultat nastojanja da se unaprijedi postojeći radni element sa nekim novim koji ima bolje tehničko tehnološke karakteristike ili ukupne performanse. Pri tome se najčešće radi o pojedinačnoj proizvodnji, odnosno izradi jednog elementa ili proizvodnji od samo par komada. Usljed toga, takvi dijelovi se nastoje izraditi upravo u fabričkim alatnicama i radionicama, naravno ukoliko je to moguće i za to postoje neophodni uslovi uključujući potrebne mašine, alate, materijal i osposobljene radnike. To ubrzava proces otklanjanja kvarova, zamjenu stradalih i oštećenih dijelova ili unaprijeđenja postojećih dijelova s jedne strane, a također, sa druge strane najčešće predstavlja i značajnu finansijsku uštedu. U nastavku je predstavljen jedan takav primjer, a predstavlja izradu korita pužnog transportera resursima službe održavanja jedne proizvodne organizacije čime je otklonjen problem zastoja u transportu smjese rasutog materijala koji je nastao usljed njegove istrošenosti i oštećenja.

2. TEHNOLOGIJA IZRADE KORITA PUŽNOG TRANSPORTERA

2.1. Pužni transporter i osnovni principi njegovog održavanja

Pužni transporter je uređaj kontinuiranog djelovanja jednostavne konstrukcije koji se često koristi za kosi, vertikalni ili horizontalni transport i prijenos rasute mase, praškastih, kašastih, muljevitih, zrnastih, sitnih i grudastih čestica i komada materijala u drvoprerađivačkoj, hemijskoj, prehrambenoj i građevinskoj industriji, metalurgiji, rudarstvu, građevinarstvu, energetici i drugim industrijskim granama. Postoje različite vrste pužnih transportera, a njihov izbor se vrši prema potrebama i vodeći računa o vrsti materijala koji se premješta, hemijskoj

otpornosti, zapremini ili gustoći materijala, učestalosti upotrebe i svim drugim zahtjevima koje transporter treba da ispuni. Opšta šema pužnog transportera sa sastavnim dijelovima prikazana je na slici 1. Centralni dio transportera je spiralni vijak koji rotira zajedno sa vratilom osiguravajući transportnom materijalu da se kreće unutar korita, oluka ili cijevi duž spirale u smjeru rotacije. Pogon pužnih transportera se vrši elektromotorom preko zupčastog prenosioca sa odgovarajućim brojem obrtaja. Dobro zaptivanje omogućava transport prašinih, muljastih, rastresitih i materijala sa neprijatnim zadahom bez zagađivanja okoline kroz koju se transport vrši. Najčešće se koristi zatvorena konstrukcija korita unutar koje je montiran pužni vijak. Na prednjem dijelu uređaja u gornjem dijelu korita postavljen je prijemni dio u koji se dovodi rasuti materijal, a na drugom kraju transportera se nalazi otvor kroz koji se rasuti materijal odvodi. Izuzetno važan dio pužnog transportera predstavlja njegovo korito koje sprječava rasipanje materijala unutar pužnog transportera. Usljed abrazivnog djelovanja transportnog materijala vremenom dolazi do njegovog trošenja i oštećenja zbog čega je neophodno izvršiti zamjenu.



Slika 1. Sastavni dijelovi pužnog transportera

U zavisnosti od izbora pužnog transportera, koristi se korito koje mora odgovarati potrebama rada pužnog transportera. Korito može biti u obliku slova U, odnosno oluka, pravougaono i cjevasto. Korito u obliku slova U je najčešći tip korita pužnog transportera i jednostavne je konstrukcije. Materijali koji se koristi za proizvodnju korita su meki, nehrđajući i čelici otporni na koroziju, a njihov izbor zavisi o primjeni i vrsti pužnog transportera, te otpornosti na koroziju i habanje koju korito mora zadovoljavati.

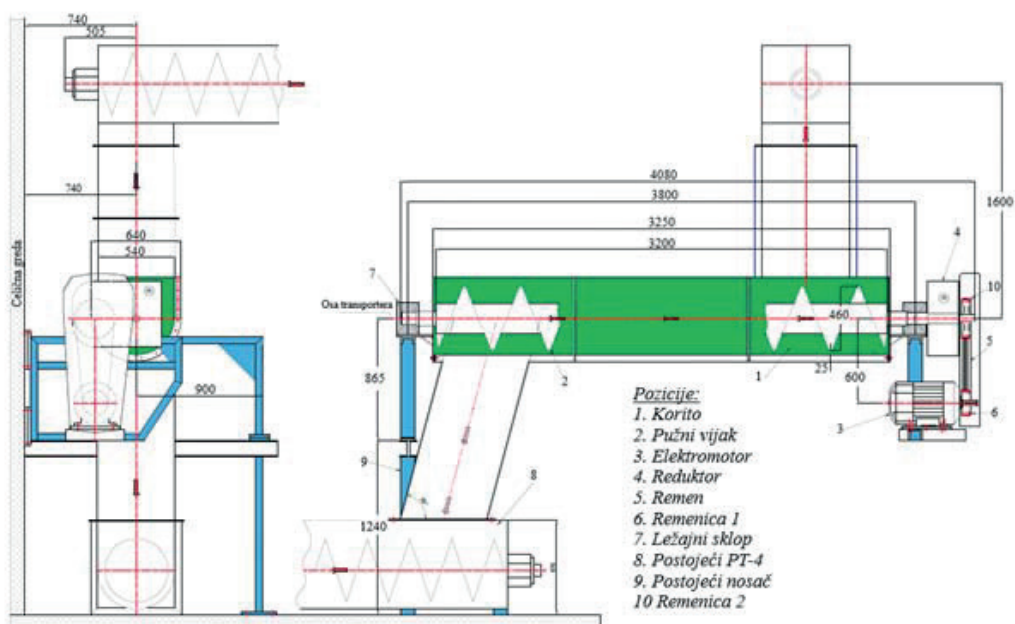
Održavanje pužnog transportera je dio ukupnog održavanja opreme u proizvodnim pogonima i ključno je za njegovu efikasnu i dugotrajnu funkciju [5]. Bazira se na nekoliko ključnih aspekata održavanja pužnog transportera koji uključuju:

- redovne inspekcije i vizualne provjere oštećenja na pužu, kućištu i ležajevima,
- oslušivanje neobičnih zvukova s ciljem signalizacije i identifikacije problema u radu,
- podmazivanje zupčanika, ležajeva i ostalih pokretnih dijelova s ciljem smanjenja trenja i njihovog trošenja,

- redovno čišćenje dijelova transporterera od ostataka materijala kako bi se sprečilo zagušenje i oštećenja,
- zamjenu dijelova poput ležajeva, brtvi, cijelog korita i drugih oštećenih i istošenih dijelova,
- dokumentovanje svih aktivnosti održavanja uključujući inspekcije, zamjene dijelova i popravke, te
- obuku zaposlenih o pravilnom korišćenju i održavanju transporterera kako bi se smanjili rizici od njegovog oštećenja i ugrožavanju sigurnosti osoblja.

2.2. Projektovanje tehnologije i izrada korita pužnog transporterera

Usljed oštećenja korita pužnog transporterera u jednoj proizvodnoj organizaciji, a koje je označeno pozicijom 1. na slici 2. (presjek u zelenoj boji), s ciljem njegove zamjene od strane interne službe za održavanje potrebno je bilo izvršiti projektovanje tehnologije njegove izrade. Nakon prve faze projektovanja tehnologije izrade koja se odnosi na analizu zadanog sklopnog crteža transporterera i radioničkog crteža korita, a s obzirom na njegovu funkciju, oblik, dimenzije i ostale specifične zahtjeve uključujući i mogućnosti izrade u vlastitoj fabrici izvršen je izbor optimalne varijante njegove izrade.



Slika 2. Sklopni crtež pužnog transporterera [7]

Na osnovu detaljno provedene analize, a uzimajući u obzir ukupne troškove izrade, dimenzije korita, potrebu izrade samo jednog komada, mogućnosti izrade u krugu kompanije i pozitivne efekte ojačavanja lima tokom oblikovanja u hladnom stanju izvršen je izbor optimalne tehnološke varijante izrade kombinovanjem postupaka kružnog savijanja lima preko valjaka i zavarivanja. Značajno je napomenuti da kompanija posjeduje odgovarajuću opremu za oblikovanje lima uključujući i mašine za savijanje lima specijalizovane za rad u teškim uslovima. Za izradu korita izabran je austenitni Cr-Ni-Mo čelik oznake Č.4574, odnosno AISI 316 Ti koji ima dobra svojstva deformabilnosti i zavarljivosti svim postupcima zavarivanja, dobru otpornost na kiseline i rad na povišenim temperaturama. Dobra plastična svojstva ga čine pogodnim za različite procese oblikovanja kao što su savijanje, oblikovanje i

zavarivanje, te postizanje kompleksnih oblika bez značajnog rizika od pucanja ili loma. Dodatno, sadržaj titana poboljšava njegovu otpornost na visokotemperaturnu koroziju i stabilnost oblika.

Početne dimenzije lima za izradu korita čiji je izgled sa osnovnim dimenzijama predstavljen na slici 3. su određene razvijanjem širine lima na osnovu poznatog izraza:

$$B = \sum_{i=1}^n l_i + \frac{\pi}{180} \sum_{i=1}^N \varphi_i (r_i + \xi_i \cdot s) \quad \dots (1)$$

gdje je:

l_i - dužine ravnih dijelova,

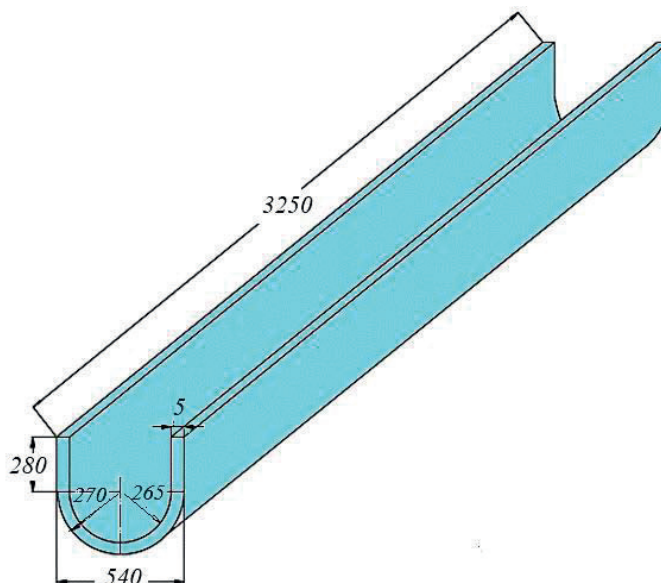
φ_i - uglovi savijanja,

r_i - unutrašnji radijusi savijanja,

ξ_i - koeficijent pomjeranja neutralne linije,

N, n - broj savijenih i nesavijenih elemenata predmeta

s - debljina lima.



Slika 3. Izgled i dimenzije korita transportera

Određujući date vrijednosti u gornjem izrazu na osnovu dimenzija na slici 3. i literaturnih vrijednosti za koeficijent pomjeranja neutralne linije $\xi_i = f(r_i/s) = f(r/s > 10) = 0,55$ izračunata je početna širina lima B prema ranijem izrazu, kako slijedi:

$$B = \sum_{i=1}^n l_i + \frac{\pi}{180} \sum_{i=1}^N \varphi_i (r_i + \xi_i \cdot s) = 280 + 280 + \frac{\pi}{180} \cdot 180 \cdot (265 + 0,55 \cdot 5)$$

$$B = 1400,73 \text{ mm}$$

Usvojena početna širina lima je $B = 1400 \text{ mm}$.

Za provjeru, ista vrijednost širine lima je dobijena na osnovu principa jednakosti zapremine izjednačavanjem zapremine priprema i gotovog dijela, a nakon što su izračunate parcijalne zapremine savijenih i nesavijenih dijelova izratka prema slici 4.

Osnovni princip jednaosti zapremine priprema i izratka je:

$$V_p = V_{iz} = const. \quad \dots (2)$$

Zapremina priprema, table lima je:

$$V_p = L \cdot B \cdot s \quad \dots (3)$$

Ukupna zapremina izratka preko zbira parcijalni zapremina je:

$$V_{iz} = 2 \cdot V_1 + V_2 \quad \dots (4)$$

Zapremina nesavijenog dijela izratka:

$$V_1 = l_{nesavijeno} \cdot b \cdot s = 280 \cdot 3250 \cdot 5 = 4550000 \text{ mm}^3 \quad \dots (5)$$

Zapremina savijenog dijela izratka:

$$V_2 = \frac{(r_v^2 - r_u^2) \cdot \pi}{2} \cdot L = \frac{(270^2 - 265^2) \cdot 3,14}{2} \cdot 3250 = 13649187,5 \text{ mm}^3 \quad \dots (6)$$

Ukupna zapremina izratka:

$$V_{iz} = 2 V_1 + V_2 = 2 \times 4550000 + 13649187,5 = 22749187,5 \text{ mm}^3$$

Izjednačavanjem zapremine priprema i izratka može se odrediti dužina razvijene širine lima, kako slijedi:

$$V_p = V_{iz} = const.$$

$$L \cdot B \cdot s = V_{iz}$$

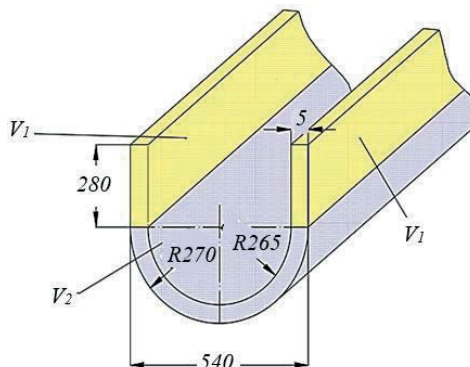
$$B = V_{iz} / (L \cdot s) = 22749187,5 / (3250 \cdot 5) \quad \dots (7)$$

$$B = 1400 \text{ mm}.$$

Shodno tome, priprema za izradu korita je tabla lima početnih dimenzija:

$$L \times B \times s = 3250 \times 1400 \times 5 \text{ mm}.$$

Prva operacija oblikovanja korita je operacija kružnog savijanja lima primjenom savijačice sa četiri valjka, koja je prikazana na slici 5. S obzirom da se korito nije moglo izraditi iz jednog dijela jer je radna dužina valjaka manja od dužine komada, izvršeno je razdvajanja lima na



Slika 4. Parcijalne zapremine savijenih i nesavijenih dijelova [1]

dužine od 1000 mm, 1250 mm i 1000 mm. Tako pripremljeni dijelovi lima su pojedinačno oblikovani kružnim savijanjem na oblik i zadane dimenzije korita. Nakon što su dijelovi savijeni oni su spojeni operacijom TIG zavarivanja formirajući oblik predmetnog korita transportera.



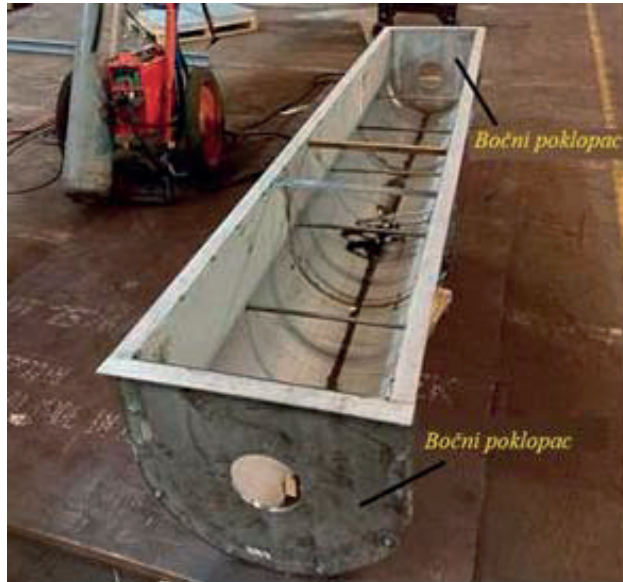
Slika 5. Mašina za savijanje sa četiri valjka [1]

Na slici 6. je prikazano korito transportera nakon operacija savijanja i spajanja dijelova lima postupkom zavarivanja.



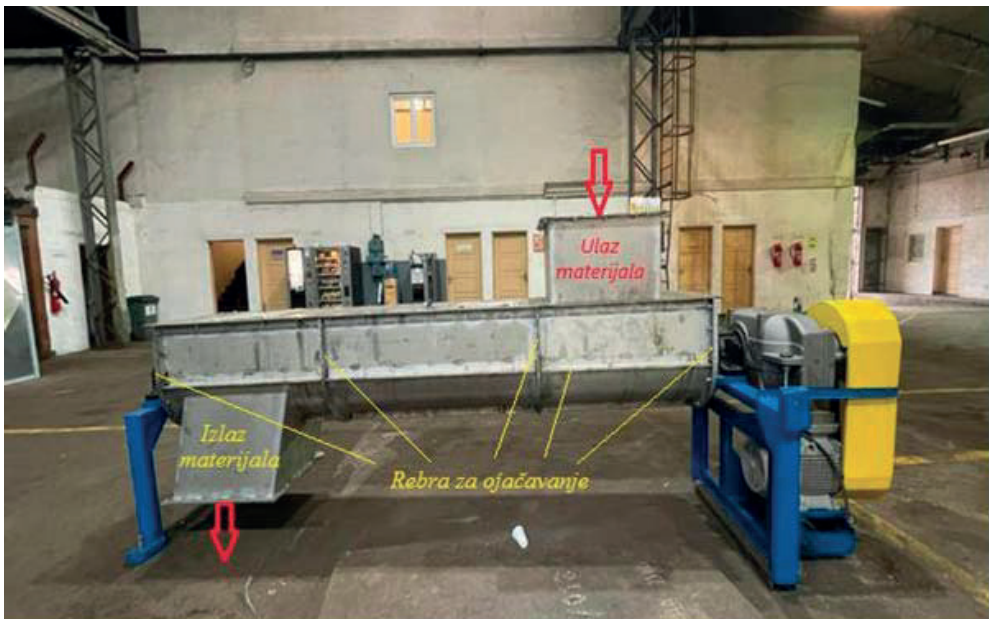
Slika 6. Korito transportera sastavljeno od dijelova lima nakon operacije savijanja i zavarivanja [1]

Na ovako oblikovan profil korita sa obje strane su za rebra za ojačavanje konstrukcije pomoću vijaka pričvršćeni poklopci, a na poklopcima su izrezani otvori za smještaj vratila pužnog vijka, kako je prikazano na slici 7. Na spojnim mjestima dodatno su postavljena rebra za ojačavanje lima koja su kasnije zavarena za korito. Na vrhu korita je postavljen poklopac na kome je sa gornje strane urađen otvor za ulaz materijala, a na dnu korita sa suprotne strane otvor za izlaz materijala, odnosno transportne mase. Također, na vrhu korita iznad izlaza je napravljen i otvor na koji je postavljen poklopac



Slika 7. Izrada bočnih poklopaca sa otvorom za smještaj vratila puža

Nakon što su sve operacije izvršene korito je postavljeno na konstrukciju nosača transportera zajedno sa njegovim ostalim dijelovima. Na slici 8. je prikazan izgled obnovljenog transportera sa potpuno novim koritom i naznačenim položajima otvora za ulaz materijala i izlaz transportne mase, kao i položajima rebara za ojačavanje konstrukcije korita, a koje je izrađeno od materijala koji je otporan na kiseline, ima antikoroziivna svojstva, efekat ojačavanja tokom rada i dug vijek trajanja.



Slika 8. Pužni transporter u novoj izvedbi

3. ZAKLJUČAK

U radu je kroz praktičan primjer projektovanja tehnologije i izradu korita pužnog transportera u jednoj proizvodnoj kompaniji ukazano na ulogu i značaj vlastite službe održavanja. Kadrovskom osposobljenošću i opremljenošću iste neophodnim alatnim mašinama i opremom, kako je prikazano kroz ovaj primjer, efikasno je izvršena izrada i zamjena korita transportera u vlastitoj kompaniji čime su postignute značajne vremenske i finansijske uštede. Izbor optimalne varijante i projektovanje tehnologije izrade specifičnih metalnih dijelova poput korita pužnog transportera uključuje njihovu detaljnu analizu sa aspekta namjene i funkcije koju vrše u određenom sklopu ili samostalno, analizu konstrukcione dokumentacije, te izbor vrste materijala, oblika i dimenzija priprema, kao i načina izrade, odnosno faza oblikovanja i njegove eventualne ugradnje u odgovarajući sklop. Shodno tome, a vodeći računa da se vrši izrada samo jednog polukružnog komada koji je većih gabarita i za čiju izradu nije adekvatna tehnologija klasičnog ugaonog savijanja izvršeno je oblikovanje tri posebna limena dijela postupkom kružnog savijanja na savijačici sa četiri valjka koji su nakon toga postupkom zavarivanja spojeni u jednu cjelinu. Kružno savijanje preko valjaka omogućava oblikovanje cilindričnih dijelova većih prečnika, a primjenom mašina sa četiri valjka omogućava se jednostavno i brzo rukovanje koje ne iziskuje visoko sofisticirano obučene radnike. Dodatno, mogućnost oblikovanja različitih oblika i dimenzija uz primjenu valjaka različitih prečnika kao univerzalnih alata čine ove mašine idealnim izborom za savijanje kružnih dijelova većih gabarita i debljina lima.

4. LITERATURA

- [1] Aldina Mehmedović, Projektovanje tehnologije i konstrukcija alata za izradu korita pužnog transportera prema zadanom crtežu, diplomski rad, Mašinski fakultet u Zenici, decembar 2022.
- [2] Ibrahim Plančić, Postupci i alati za obradu deformisanjem u mašinstvu, Zapreminsko oblikovanje I, Institut za privredni inženjering d.o.o. Zenica 2019.
- [3] Milorad Maksimović, Operacijski aparati u procesnoj industriji, Tehnološki fakultet Banja Luka, 2002.
- [4] Himzo Đukić, Mirna Nožić, Obrada deformisanjem, Univerzitet „Džemal Bijedić“, Mašinski fakultet u Mostaru, 2013.
- [5] Budimir Mijović Održavanje strojeva i uređaja, Veleučilište u Karlovcu 2019.
- [6] Vukota Boljanovic, Sheet metal forming, processes and die design, Industrial Press Inc. 200 Madison Avenue New York, New York 10016, 2004.
- [7] Interna dokumentacija kompanije.

METODE ANALIZE OTKAZA I UTVRĐIVANJA POUZDANOSTI ELEMENTATA VALJAONIČKOG POSTROJENJA - VALJAČKIH STANOVA

METHODS OF FAILURE ANALYSIS AND DETERMINATION OF THE REALIBILITY OF THE ELEMENTS OF THE ROLLING MILLS

Adnan Panjević, dipl. inž. maš.
ArcelorMittal Zenica, d.o.o.
Zenica, BiH

Prof. dr. Mustafa Imamović
Prof. dr. Sabahudin Jašarević
Univerzitet u Zenici
Zenica, BiH

REZIME

Metode analize i utvrđivanja otkaza predstavljaju bitan segment rada u smislu težnje za perfektnim funkcionisanjem svakog proizvodnog sistema kao jedne posmatrane cjeline. Metode analize otkaza su različite za svaki od pogona ponaosob, te se kao takve moraju pojedinačno definisati i odrediti. Da bi analiza otkaza bila realna i održiva, neophodno je pored dobrog odabira metode analize, voditi odgovarajuću evidenciju otkaza i zastoja. Jedino pravilnim vođenjem i prikazom podataka zastoja, moguće je za analizu otkaza primjenjivati neke od preciznijih i savremenijih metoda. Pouzdanost elemenata sistema ili sistema u cjelini predstavlja bitan mjerni faktor u pogledu ocjenjivanja kvalitete komponenti sistema ili sistema u cjelini. Težnja povećavanju pouzdanosti određenim korektivnim mjerama komponenti sistema ili pravilnim održavanjem sistema u cjelini, danas predstavlja izazov za svakog inženjera na poslovima održavanja. Prema tome, pravilnim izborom metoda analize otkaza, kao i korištenje metoda analize pouzdanosti doprinosi povećanju efikasnosti održavanja proizvodnog sistema. U radu će biti prikazana upotreba blok dijagrama, raspodjele pouzdanosti u svrhu analize otkaza na jednom od elemenata valjačkog postrojenja.

Ključne riječi: pouzdanost, analiza otkaza, blok dijagram pouzdanosti, Weibull-ova raspodjela

SUMMARY

The methods of analyzing and determining failures represent an important segment of the work in the sense of striving for the perfect functioning of each production system as an observed unit. Failure analysis methods are different for each of the systems individually and as such must be defined and determined individually. In order for failure analysis to be realistic and sustainable, it is necessary, in addition to a good choice of analysis method, to keep adequate records of failures and downtime. Only by properly maintaining and displaying downtime data, it is possible to apply some of the more precise and modern methods for failure analysis. The reliability of system elements or the system is an important measuring factor in terms of evaluating the quality of a system component or the entire system. The tendency to increase reliability by certain corrective measures of system components or by proper maintenance of the system, today represents a challenge for every engineer in maintenance work. Therefore, the correct choice of the failure analysis method, as well as the use of the reliability analysis method, contributes to increasing the efficiency of the maintenance of the production system. The paper will show the use of block diagrams, reliability distribution for the purpose of failure analysis on one of the elements of the rolling mill.

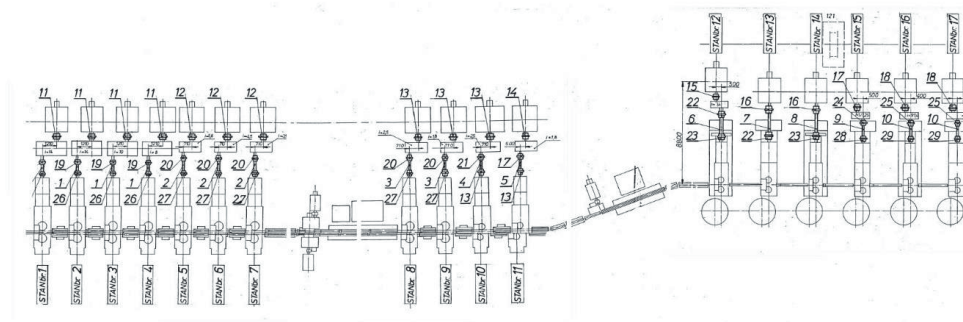
Keywords: reliability, failure analysis, reliability block diagram, Weibull distribution

1. UVOD

Svaki sistem ili komponenta sistema ima svoj životni vijek: početni, srednji ili krajnji. Zavisno u kojem periodu životnog vijeka se komponenta ili sistem nalazili, tako je intenzitet otkaza drugačiji. Prilikom nekih od analiza otkaza sistema, bitan dio analize će biti pretpostaviti fazu životnog vijeka komponente ili sistema. Da bi se otkazi i zastoji nekog sistema analizirali, neophodno je poznavati jedan takav sistem, njegovu strukturu i funkciju. U radu smo prikazali i analizirali otkaze jednog od elemenata sistema u određenom vremenskom periodu. Sistem koji će biti analizom ovog rada jeste sistem valjaoničke pruge. Sama valjaonička pruga se sastoji od valjačkih stanova i ostalih elemenata, a čine je predpruga, međupruga i završna pruga. Svaka od ovih triju nabrojanih podpruga se sastoji od podsistema valjačkih stanova. Glavni pogon valjačkog stana čine mehanizmi kojima se ostvaruje prijenos snage i promjena smjera i broja okretaja valjaka, te time realizuje proces valjanja. U suštini svi ovi pogoni se sastoje od: pogonskog motora, prenosnog mehanizma i valjačkih valjaka [1]. Svaki od podsistema ima svoje elemente koji su ujedno i elementi pod-podsistema. Zbog obima posmatranog sistema u cjelini, u ovakvoj vrsti rada, nije moguće dati i uraditi analizu za duži vremenski period. Zbog toga će posmatrani period rada sistema biti kratak, ali svojim vrstama i frekvencijom otkaza koji će se analizirati, neće puno odstupiti od podataka kakvi bi se dobili ukoliko bi se sistem analizirao za duži vremenski period. Analiza otkaza elementa posmatranog sistema temeljit će se na metodama koje se koriste u oblasti pouzdanosti. Najprije ćemo definisati blok dijagrame sistema u kojem se nalazi posmatrani element. Zatim ćemo na osnovu dostupnih podataka dobivenih praćenjem otkaza elementa kroz posmatrani vremenski period definisati raspodjelu, te na osnovu dobivenih parametara definisati distribucije pouzdanosti, histogram pouzdanosti, te funkcije intenziteta otkaza i funkcije pouzdanosti i nepouzdanosti sistema. Analiza pouzdanosti jedan je od glavnih alata za osiguranje dogovorenih rokova isporuke koji za uzvrat održavaju određene neodredive čimbenike, kao što su dobra volja kupca i ugled firme [2].

2. BLOK DIJAGRAM POUZDANOSTI POSMATRANOG SISTEMA

Sistem se sastoji od niza podsistema dizajniranih za postizanje zajedničkog specifičnog rezultata s prihvatljivom razinom pouzdanosti. Vrsta otkaza podsistema i njegova učestalost direktno utječu na pouzdanost sistema [3-4]. Blok dijagram pouzdanosti u suštini predstavlja način na koji su komponente nekog sistema međusobno povezane prema pouzdanosti, dobiven detaljnom analizom načina funkcionisanja komponente tj. sistema u cjelini, utjecaja otkaza na rad sistema, a u svrhu jednostavnijeg numeričkog proračuna pouzdanosti sistema. Ukoliko posmatrani sistem za koji se definiše blok dijagram pouzdanosti radi u više režima, neophodno je postaviti blok dijagram pouzdanosti za svaki od tih režima. Blok dijagram je prije svega logički grafik, koji na jednostavan i slikovit način pomoću linija i blokova opisuje rezultat otkaza pojedinačnih elemenata sistema na funkcionisanje sistema u cjelini. Na slici 1. prikazan je pregled valjaoničkog postrojenja valjačkih stanova.



Slika 1. Prikaz valjačkog postrojenja – valjačkih stanova

Vidljivo je da se sistem u cjelini sastoji od 3 podsistema, odnosno podsistema 1 – predpruge, podsistema 2 – međupruge i podsistema 3 – završne pruge. Prema tome blok dijagram pouzdanosti postrojenja valjačkih stanova izgleda:

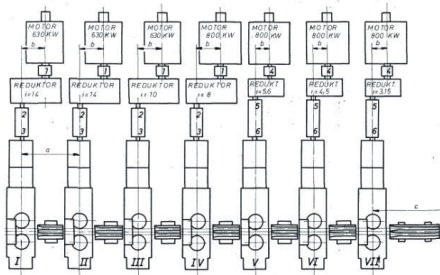


Zbog toga što su podsistemi valjačkih stanova poredani serijski, proračun pouzdanosti ukupnog sistema dobili bi tako što bi pomnožili pouzdanost svakog od podsistema. Formula za proračun pouzdanosti sistema (valjačkog postrojenja) je sljedeća:

$$R_{\text{sist.}} = R_{\text{podsist.1}} \times R_{\text{podsist.2}} \times R_{\text{podsist.3}} \quad \dots (1)$$

Prema dostupnim podacima, te analizom zastoja, moguće je na valjačkim stanovima utvrditi pouzdanost njihovih elemenata. Proračun bi se uradio na osnovu evidentiranih zastoja za svaki element pod-podsistema, evidentiran u posmatranom vremenskom intervalu.

Radi složenosti postrojenja valjačkih stanova, za analizu i definisanje raspodjele bit će uzeta samo jedna komponenta. Kao komponentu ćemo uzeti spojku, koja se nalazi između elektromotora i reduktora valjačkog stana u podsistemu 1 (predpruga valjačkog postrojenja).



Slika 2. Prikaz valjačkog podsistema sa 7 stanova – predpruga

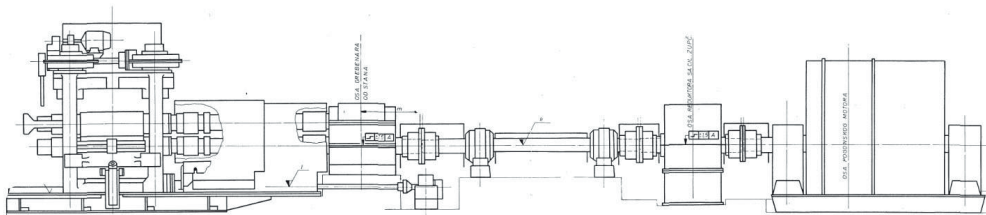
Na slici broj 2. je vidljivo da predprugu valjačkog postrojenja čini 7 valjačkih stanova sa svim pratećim elementima. Blok dijagram pouzdanosti predpruge valjačkog postrojenja na osnovu slike iznad, izgledat će:



Svaki od blokova u prethodno navedenom blok dijagramu predstavlja jedan od valjačkih stanova predpruge. Proračun pouzdanosti podsistema 1 dobili bi tako što bi pomnožili pouzdanost svakog od valjačkih stanova (stanovi su u serijskoj vezi). Naravno, svaki od valjačkih stanova čini pod-pod-sistem koji se sastoji od elemenata koji posjeduju svoju pouzdanost, a računa se prema obrascu datom dalje u radu. Formula za proračun pouzdanosti podsistema 1 (predpruge valjačkog postrojenja) je sljedeća:

$$R_{\text{podsist.1}} = R\text{-I} \times R\text{-II} \times R\text{-III} \times R\text{-IV} \times R\text{-V} \times R\text{-VI} \times R\text{-VII} \quad \dots (2)$$

Na slici 3. je prikazana struktura horizontalnog stana u odjeljenju stanova na sitnoj pruzi. Na slici 3. su vidljivi elementi koje čine sistem. Elementi prikazanog sistema su redoslijedom sa desna na lijevo: elektromotor, spojka, reduktor, spojka, vratilo, spojka, grebenar, zglobno vreteno i duo-topli valjački stan.



Slika 3. Prikaz pogonskog motora, reduktora, grebenara i valjačkog stana sa pratećim elementima

Elementi pod-podsistema su po funkciji poredani serijski, ali i po logici kojom se formira blok dijagram pouzdanosti. Otkazom jednog od elemenata pod-podsistema, dolazi do otkaza cijelog sistema. Na osnovu strukture pod-podsistema, napraviti ćemo blok dijagram pouzdanosti, koji izgleda:



Svaki od elemenata ovog podsistema ima svoju pouzdanost. Ukupnu pouzdanost elemenata u pod-podsistemu izračunali bi na način da pouzdanost svakog elementa pod-podsistema pomnožimo, iz razloga što su elementi u serijskoj vezi.

$$R_{p-p \text{ sist.}} = R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 \times R6 \times R7 \times R8 \times R9 \quad \dots (3)$$

Elementom pod-podsistema ćemo smatrati on dijelove koji su gore navedeni, jer postoje vremena otkaza za svaki od elemenata. Naravno, svaki od ovih elemenata se može dalje rastaviti na drugi podsistem, ali to neće biti predmet ovoga rada. Da bi dobili pouzdanost svakog od pod-podsistema, neophodno nam je da se izračuna pouzdanost svakog od elemenata. Proračun pouzdanosti elemenata računa se preko formule:

$$R(t) = e^{-\lambda.t} \text{ , gdje je } \lambda = \frac{\text{broj otkaza}}{\text{vrijeme}} \text{ .} \quad \dots (4)$$

3. DEFINISANJE RASPODJELE POUZDANOSTI ZA KOMPONENTU POSTROJENJA VALJAČKIH STANOVA

Zbog složenosti posmatranog sistema u radu će biti definisana pouzdanost samo jedne komponente pod-podsistema. Zupčasta spojka između motora i reduktora na valjačkim stanovima predpruge će biti predmet analize ovoga rada. Analiza će biti odrađena za isti posmatrani period komponenti posmatranog sistema. Otkazom komponente spojke, smatrat će se njena nemogućnost daljeg rada i neophodna obustava kompletnog postrojenja. Utvrđivanjem modela raspodjele pouzdanosti mogu se planirati mjere održavanja, predviđati vijek trajanja pojedinih elemenata, plan nabavke rezervnih dijelova, a time povećati kvalitet opreme [5]. Ukoliko posmatramo predprugu valjačkog postrojenja, ona se sastoji od 7 valjačkih stanova, zbog toga će 7 spojki biti posmatrano za ovu analizu. Uvidom u evidencije zastoja i otkaza valjačkog pogona, moguće je izvući periode otkaza za svaku komponentu. Naravno ovdje će se

uzeti u obzir kada je koja spojka ugrađena kao nova, te period njenog otkaza mjereći od perioda ugradnje. Iako se može desiti da neka spojka jednog od 7 posmatranih valjačkih stanova otkáže ranije od druge u datom trenutku, ipak period njenog otkaza može biti duži od one koja je nastavila sa radom, iz razloga što je period ugradnje bio drugačiji. Uvidom u registar otkaza, evidentan je period rada, mjeren u mjesecima, pa prema tome možemo dobiti tabelu perioda otkaza:

Tabela 1. Evidencija perioda otkaza spojke valjačkog stana

Spojka	Period otkaza
1	46
2	50
3	45
4	43
5	26
6	18
7	25

Slijedeći bitan korak jeste razvrstavanje i sortiranje perioda otkaza prema redoslijedu, od najmanjeg perioda otkaza do najvećeg. Zatim ćemo iz tabele izvući medijalni rang za 7 perioda otkaza, a također i putem formule izračunati medijalni rang. Formula koju ćemo koristiti za izračun medijalnog ranga jeste:

$$r_j = \frac{j-0,3}{(n+0,4)} \quad \dots (5)$$

Pa prema tome, tabela sa sortiranim periodima otkaza, tabelarnim i izračunatim medijalnim rangovima izgleda ovako:

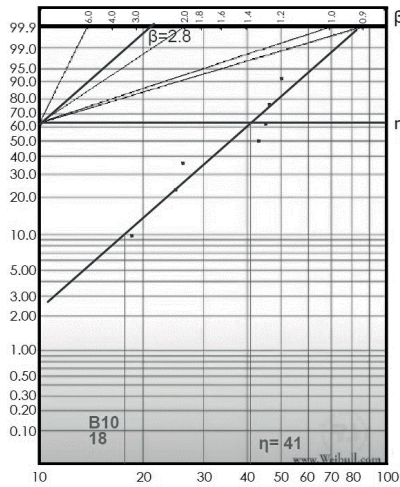
Tabela 2. Evidencija perioda otkaza spojke valjačkog stana

Rank j	Period otkaza	Medijalni rang (tabela)	Medijalni rang (izračunom)
1	18	0,095	0,094594595
2	25	0,23	0,22972973
3	26	0,365	0,364864865
4	43	0,5	0,5
5	45	0,635	0,635135135
6	46	0,77	0,77027027
7	50	0,905	0,905405405

Prema tabeli u kojoj su dati prikazi otkaza, vidljivo je da se periodi otkaza kreću od 18 do 50, s toga ćemo na donjoj liniji Weibull-ovog papira koristiti vrijednosti od 10 do 100, gdje je jedan period na logaritamskoj skali. Na Weibull-ov papir ćemo unijeti tačke, na način da će period otkaza biti definisan po poziciji vrijednosti prema horizontalnoj liniji na papiru, a po vertikalnoj lini ćemo uzeti vrijednosti izračunatog medijalnog ranga izraženog procentualno. Nakon unosa tačaka na Weibull-ov papir, moguće je provući liniju između dobivenih vrijednosti. Tako dobivenu liniju ćemo paralelno povući i pozicionirati u tačno određenu tačnu, kako je i prikazano na slici 4. Na osnovu toga ćemo očitati vrijednost β . Nakon očitane vrijednosti β , očitavamo vrijednost η , kao i vrijednosti za B10. Vrijednosti β iznosi 2,8, dok vrijednost η iznosi 41. Jednostavno kazano, pouzdanost ovih komponenti je takva da će 63,2% komponenti sistema otkazati nakon 41 perioda, odnosno mjeseca.

Za Weibullovu raspodjelu, funkcija pouzdanosti $R(t)$ je data slijedećom formulom:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \text{ gdje su:} \quad \dots (6)$$



Slika 4. Definisane parametara β i η na Weibull-ovom papiru

- t = vrijeme,
- η = skala parametar (također poznat kao karakteristično vrijeme),
- β = oblik parametar (pokazuje oblik raspodjele, npr. da li stopa kvarova raste, opada ili je konstantna).

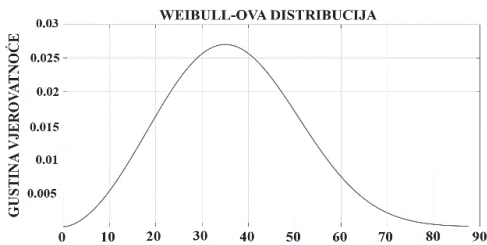
Parametar oblika Weibull-ove raspodjele određuje oblik funkcije intenziteta otkaz, prema tome slijedi:

- ako je $\beta < 1$, intenzitet otkaza opada kao funkcija vremena,
- ako je $\beta = 1$, intenzitet otkaza je konstantan s vremenom,
- ako je $\beta > 1$, intenzitet otkaza raste s vremenom [6].

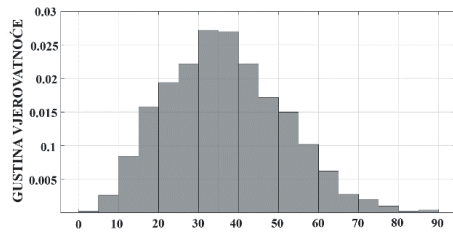
Skala (η): Vrijeme u kojem se 63,2% svih jedinica kviri. Veća vrijednost η znači da sistem ima duži životni vijek. Za naš slučaj, formula pomoću koje možemo izračunati pouzdanost komponente, za bilo koje vrijeme, glasi:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{41}\right)^{2,8}} \quad \dots (7)$$

Za date parametre β i η izgled Weibull-ove raspodjele dat je na slici 5. Za datu komponentu, a na osnovu dobivene raspodjele histogram uzroka podataka iz Weibull-ove raspodjele, dat je na slici 6.

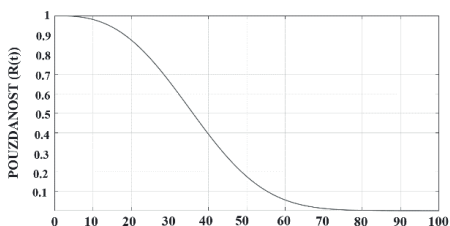


Slika 5. Prikaz Weibull-ove distribucije

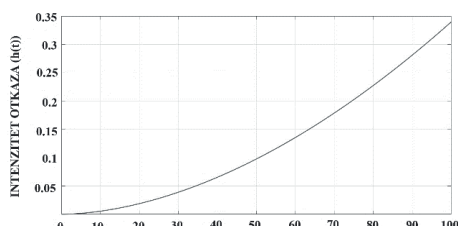


Slika 6. Histogram distribucije

Na histogramu za razmatranu komponentu, vidljivo je da je vjerovatnoća da će najveći broj komponenti otkazati između 30 do 40 mjeseci rada. Na slici 7., data je funkcija pouzdanosti, gdje je vidljivo da je pouzdanost komponenti na početku 1 (odnosno 100%), dok je nakon 50 mjeseci, pouzdanost na nekih 0,18 (18%). Razlog tome je što za analiziranu komponentu (spojnicu između elektromotora i reduktora na valjačkom stanu), prvi period otkaza bio u 18., a zadnji u 50. mjesecu. Iz tog razloga pouzdanost za razmatranu komponentu je jako mala ukoliko posmatramo period poslije 50. mjeseca.



Slika 7. Funkcija pouzdanosti



Slika 8. Funkcija nepouzdanosti

Kako je na slici 7. prikazan izgled funkcije pouzdanosti, tako isto jednostavno možemo odrediti i nepouzdanost razmatrane komponente. Nepouzdanost sistema prema Weibullovoj raspodjeli može se izračunati kao komplement pouzdanosti. Nepouzdanost je vjerovatnoća da će sistem doživjeti kvar u određenom vremenskom periodu. Ako je $R(t)$ pouzdanost sistema u vremenu t , nepouzdanost $F(t)$ se može izračunati kao:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad \dots (8)$$

Dakle, funkcija nepouzdanosti $F(t)$ je:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \dots (9)$$

Za naš slučaj, formula pomoću koje možemo izračunati nepouzdanost komponente, za bilo koje vrijeme, glasi:

$$R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{41}\right)^{2,8}} \quad \dots (10)$$

Prikaz funkcije nepouzdanosti za analiziranu komponentu data je na slici 8.

Intenzitet kvara, poznat i kao hazard funkcija ili stopa kvara, predstavlja vjerovatnoću da će sistem ili komponenta doživjeti kvar u slijedećem trenutku vremena, pod uslovom da je sistem ili komponenta preživjela do tog trenutka, U kontekstu Weibull-ove raspodjele, intenzitet kvara daje uvid u ponašanje kvara tokom vremena. Matematički, za Weibull-ovu raspodjelu sa parametrima β i η , intenzitet kvara $h(t)$ se izračunava kao:

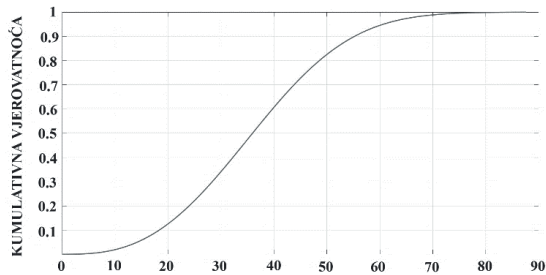
$$h(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad \dots (11)$$

Prema tome matematički model intenziteta otkaza za našu komponentu glavit će:

$$h(t) = \left(\frac{2,8}{41}\right) \left(\frac{t}{41}\right)^{1,8} \quad \dots (12)$$

Izgled funkcije intenziteta otkaza, prikazan je na slici 9.

Pouzdanost intuitivno podrazumijeva uspjeh i predstavlja vjerovatnoću da će sistem (dio) uspješno funkcionisati u određenom vremenskom intervalu [7].



Slika 9. Prikaz funkcije intenziteta otkaza

4. ZAKLJUČAK

U proizvodnim pogonima svaka minuta zastoja je bitna i značajna, kako za proizvedenu količinu robe, tako i za funkcionalnost pogona. Nekada otkaz jedne komponente sistema može uticati na funkcionalnost, pa čak i ugroziti neku drugu komponentu u sistemu pa čak i cjelokupni proizvodni sistem. Analizom prethodnih otkaza, moguće je otkaze koji bi se eventualno desili u budućnosti predvidjeti, te preventivno djelovati da do njih uopšte i ne dođe. Metodologijom koja je prikazana u radu, moguće je definisati i odrediti pouzdanost neke komponente sistema, pa čak i sistema u cjelini. Da bi analiza i zaključci donijeti analizom bili što realniji, neophodno je voditi preciznu i pravovremenu evidenciju svih zastoja u bilo kojem od proizvodnih pogona. Samo pravilnom i odgovornom evidencijom svih zastoja, moguće je sprovesti neke od složenijih metoda analize otkaza. U radu je definisana raspodjela (u ovom slučaju riječ je o Weibull-ovoj raspodjeli). Weibullova raspodjela je moćan alat za analizu pouzdanosti, omogućavajući fleksibilno modeliranje različitih scenarija kvarova. Razumijevanje i pravilno korišćenje njenih parametara (β i η) omogućava preciznije procjene pouzdanosti sistema u vremenu. Raspodjela je urađena za spojnicu, koja se nalazi između elektromotora i reduktora valjačkog stana. Prikupljeni su podaci za 7 spojki na sedam prvih stanova valjačke pruge (predpruga), te su periodi otkaza tih elemenata predstavljeni pomoću odgovarajuće matematičke raspodjele. Najmanji period otkaza tog elementa je bio 18, dok je najveći period bio 50 ciklusa. Ovi periodi predstavljaju mjesece koje su elementi proveli u radu. Pouzdanost ovih komponenti je takva da će 63,2% komponenti sistema otkazati nakon 41 perioda, odnosno mjeseca. Na kraju, neophodno je napomenuti i naglasiti bitnost pouzdanosti kao pod-discipline sistemskog inženjeringa. Pouzdanost, kao sposobnost sistema ili komponente da funkcioniše pod navedenim okolnostima u određenom periodu bez otkaza, igra bitnu ulogu u smislu preventivnog i odgovornog održavanja u svakom složenom sistemu ili proizvodnom pogonu.

5. REFERENCE

- [1] Prof. dr. Mustafa Čaušević, „Obrada metala valjanjem“, Veselin Masleša, Sarajevo, 1983.
- [2] P. O'Connot, A. Kleyner, „Practical reliability engineering“, John Wiley & Sons, 2012.
- [3] C.E.Ebeling, „An introduction to reliability and maintainability engineering“, Tata McGraw-Hill Education, 2004.
- [4] J.Moubray, „Reliability-centered maintenance“, Industrial Press Inc, 1997.
- [5] M. Imamović, S. Jašarević: „Prilog istraživanju pouzdanosti valjačkih stanova kao svojstva kvaliteta tehničkog sistema“ 3. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem „KVALITET 2003“ Zenica, novembar 2003, BiH, ISSN 1512-9268, pp. 469-474
- [6] Imamović, Mustafa: *Inženjering pouzdanosti*, IPI Institut, Zenica, 2024.
- [7] M. Imamović: „Analiza pouzdanosti valjačkih valjaka kao svojstvima kvaliteta mašinskog sistema“ 4. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem „KVALITET 2005“ Fojnica, BiH, 09-12 Novembar 2005, ISSN 1512-9268, pp. 407-412

MAINTENANCE AND SUSTAINABILITY IN THE MEDICAL FIELD: THE IMPORTANCE OF BIOCOMPATIBILITY TESTS

Hatice GUMUSHAN AKTAS, Assoc. Prof., Ph.D.
Harran University, Faculty of Arts and Science, Biology Department
Osmanbey Campus, Sanliurfa, Türkiye

ABSTRACT

Biocompatibility tests are essential for ensuring the safety, efficacy, and longevity of medical devices and materials. By evaluating interactions between biomaterials and biological systems, these tests help prevent adverse reactions such as toxicity or inflammation, ensuring patient safety. Furthermore, biocompatibility is crucial for the long-term maintenance and sustainability of medical devices, supporting consistent performance and reducing device failure risks. These tests also promote using durable and environmentally sustainable materials in healthcare. This abstract emphasizes the importance of biocompatibility assessments in advancing medical device safety, performance, and environmental sustainability and contributing to improved healthcare outcomes and patient well-being.

Keywords: Biocompatibility, Medical devices, Patient safety, Sustainability, Biomaterials

1. INTRODUCTION

The medical field is experiencing rapid advancements characterized by innovations in materials, devices, and treatment methodologies, all aimed at enhancing patient outcomes and improving overall healthcare efficiency. However, the sustainability and long-term maintenance of these medical devices present a significant challenge [1]. The long-term performance, safety, and efficacy of medical devices –ranging from simple catheters to complex pacemakers– are paramount, necessitating not only careful material selection but also a comprehensive understanding of their interactions within biological environments [2].

A critical factor influencing the longevity and safety of these devices is their biocompatibility, which refers to the ability of materials to interact with the biological environment of the human body without inducing adverse effects. Biocompatibility testing is essential in this context, as it evaluates the capacity of medical materials and devices to safely engage with human tissues, ensuring that they do not provoke immunological reactions, toxicity, or other detrimental outcomes [3]. As the healthcare industry increasingly prioritizes sustainable solutions, the need for medical devices to be both effective and environmentally friendly has gained prominence [4,5]. This dual focus on biocompatibility and sustainability is shaping the future of medical innovations, particularly in resource-limited settings where waste management and environmental impact are critical concerns.

Biocompatibility tests not only safeguard patient safety but also contribute to the longevity and sustainability of medical devices, thereby enhancing their lifecycle and reducing the frequency of replacements or modifications [6]. This review aims to explore the roles of maintenance and sustainability in the medical field, with a particular emphasis on the significance of biocompatibility tests in the development and successful application of medical technologies.

2. WHAT IS MEDICAL DEVICE?

A medical device refers to any product or equipment –such as an instrument, apparatus, machine, appliance, implant, reagent for in vitro use, software, or similar article– designed for medical purposes (Table 1). Accordingly, the medical device range includes products from simple tongue depressors to advanced programmable artificial organ systems. Additionally, home-use test kits for pregnancy and blood glucose, as well as radiological devices used for imaging and diagnostics in hospitals, are considered medical devices. The manufacturer intends these devices to be used alone or in combination for one or more specific medical purposes in humans. These purposes are summarized as follows: *i.* the diagnosis, prevention, monitoring, treatment, or alleviation of diseases; *ii.* the diagnosis, treatment, or compensation for injuries or disabilities; *iii.* studying, altering, or modifying anatomy or physiological processes, including pregnancy control [7-9]. Medical devices are categorized into four classes based on the risk associated with their use: Class I, IIa, IIb, and III. Class I includes low-risk, non-invasive devices. If a device is sterile, it is labeled as I_s; those with a measuring function are classified as I_m; and reusable surgical instruments are designated as I_r. Class II represents intermediate-risk devices, while Class III comprises strictly high-risk devices [10].

Table 1. Medical device list.

<i>Medical devices (not all listed)</i>	<i>Classification</i>	
Stethoscope, Nonelectronic wheelchair, Walking aids, Dental examination chairs, Eye patch	I	Low-risk, non-invasive, everyday devices or appliances
Thermometer, Dental hand tools, Manual blood pressure monitor, Urinary catheter	I _{m,s,r}	Low-risk devices. Class I _s devices placed on the market in sterile condition Class I _m devices with a measuring function Class I _r devices reusable surgical instruments
Syringe, Electronic blood pressure monitor, Hearing aids, Dental braces, Oxygen masks	IIa	Low to medium risk and refer mainly to devices installed within the body in the short term (60mins-30days)
Dental implant, Blood bag, Respirator, Dialysis machines	IIb	Medium to high risk and will often be devices installed within the body for periods of 30 days or longer
Knee implants, Pacemaker, Heart stent, Artificial heart devices, Brain implants	III	Strictly high-risk devices

3. CHALLENGES IN THE MAINTENANCE AND SUSTAINABILITY OF MEDICAL DEVICES

Medical devices, particularly those designed for implantation, are frequently subjected to challenging physiological environments, such as exposure to bodily fluids, enzymes, and mechanical stresses. This multifactorial exposure may precipitate material degradation, wear,

and corrosion, particularly in devices that remain within the body for extended durations. The degradation of materials in medical devices is a critical concern, as it can lead to significant clinical complications, including inflammation, toxicity, and device failure.

Metal implants, such as hip prostheses, are particularly vulnerable to wear and corrosion. The wear process can generate wear debris, which may consist of metal ions released into the surrounding tissues. This release can provoke inflammatory responses, as evidenced by the activation of macrophages in response to wear particles from cobalt-chromium (CoCr) alloys, which are commonly used in orthopedic implants [11,12]. The presence of these wear particles can lead to adverse biological responses, including osteolysis and implant loosening, which are significant contributors to the failure of total hip arthroplasties [12,13]. Furthermore, the corrosion of metal implants can exacerbate these issues, as localized corrosion can lead to the release of toxic metal ions, which may sensitize surrounding tissues [14,15].

In addition to metal implants, polymers utilized in medical devices, such as stents and catheters, are also susceptible to degradation. The degradation mechanisms for polymers can include hydrolysis, oxidation, and enzymatic action. These processes can compromise their structural integrity over time [16,17]. For instance, ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE), commonly used in joint replacements, can undergo significant wear, leading to the generation of wear debris that can incite inflammatory responses and contribute to implant failure [18,19]. The mechanical properties of these polymers, including their wear resistance and fatigue strength, are critical for ensuring the longevity and functionality of the devices [20].

The interplay between material degradation and biological responses is complex and multifaceted. For instance, the inflammatory response to wear particles is mediated by macrophages, which play a pivotal role in the host response to foreign materials [11,13]. The presence of wear debris can activate these immune cells, leading to the release of pro-inflammatory cytokines, which can further exacerbate tissue damage and promote osteolysis [12,13]. Moreover, the biocompatibility of the materials used in medical devices is paramount; materials that elicit a strong inflammatory response can lead to adverse outcomes, including chronic inflammation and eventual device failure [17, 21].

To mitigate the risks associated with material degradation and wear, significant advancements have been made in the development of new biomaterials with enhanced properties. For example, titanium alloys, such as Ti-6Al-4V, are recognized for their excellent mechanical strength, corrosion resistance, and biocompatibility, making them suitable for load-bearing applications in orthopedic implants [22, 23]. Additionally, surface modification techniques, such as ion implantation and coating with biocompatible materials like titanium nitride (TiN), have been employed to improve the tribological properties and reduce wear rates of metallic implants [21,24]. These advancements are crucial for enhancing the longevity and performance of medical devices, ultimately improving patient outcomes.

4. DEFINITION AND SCOPE OF BIOCOMPATIBILITY

Biocompatibility is a multifaceted concept that encompasses the interactions between materials and biological systems, including cells, tissues, and blood. It is essential to ensure that medical devices do not elicit harmful biological responses when implanted or used in contact with the human body. The scope of biocompatibility extends beyond mere material

composition; it includes the material's ability to resist biofouling, inflammation, and immune responses, which can significantly affect the performance and longevity of medical devices [25,26]. A pivotal regulatory framework for assessing biocompatibility is outlined in ISO 10993, which specifies a series of standardized tests aimed at evaluating various biological responses, including cytotoxicity, sensitization, and irritation [27,28]. This standard serves as a cornerstone for the development and approval of medical devices, ensuring that they meet the necessary safety and efficacy criteria before clinical use.

4.1. Key Regulatory Requirements and Standards

The regulatory landscape for biocompatibility testing is stringent, with the U.S. Food and Drug Administration (FDA) and other international regulatory bodies mandating comprehensive assessments prior to the approval of medical devices. These assessments are designed to confirm that devices will not provoke adverse biological reactions, which could compromise patient safety [25]. Biocompatibility testing typically involves both *in vitro* and *in vivo* methodologies to evaluate potential toxic effects, including cytotoxicity, genotoxicity, and other harmful interactions with biological systems [26,29]. The ISO 10993 series provides a systematic approach to these evaluations, detailing the necessary protocols for conducting tests that accurately reflect the biological compatibility of materials used in medical devices [27]. As the field evolves, regulatory requirements are increasingly emphasizing the importance of characterizing materials and leveraging existing literature to support biocompatibility claims, thereby reducing reliance on traditional testing methods [25].

4.2. Types of Biocompatibility Tests

Biocompatibility assessment is a critical component of medical device development, governed by rigorous standards and testing protocols. The interplay between material properties and biological responses necessitates a comprehensive approach to ensure that medical devices are safe and effective for clinical use. Various standardized biocompatibility tests are employed to assess the safety and compatibility of medical devices. These tests include as follows:

- i.* Cytotoxicity Testing: This evaluation determines whether a material is toxic to cells, often employing assays such as the MTT assay to quantify cell viability in the presence of the test material [30,31]. The results from cytotoxicity tests are critical for understanding the potential cellular responses to materials used in medical devices.
- ii.* Sensitization Testing: This type of testing assesses the potential for allergic reactions that a material may provoke upon exposure [26]. Understanding sensitization is vital for materials with prolonged contact with the body, as it can lead to significant clinical complications.
- iii.* Irritation Testing: This test determines whether a material can induce irritation to the skin or mucosal surfaces. The assessment is crucial for devices that may contact sensitive tissues, ensuring they do not cause adverse reactions during use [25,26].
- iv.* Hemocompatibility Testing: For devices that interact with blood, such as catheters and stents, hemocompatibility testing is essential to ensure that the material does not trigger coagulation or hemolysis. This testing is governed by ISO 10993-4, which outlines the requirements for evaluating the blood compatibility of medical devices [29].

5. IMPACT OF BIOCOMPATIBILITY ON DEVICE MAINTENANCE

The biocompatibility of medical devices plays a crucial role in determining their maintenance requirements and long-term performance. Understanding the interactions between materials

and biological systems is essential for optimizing device functionality and ensuring patient safety.

5.1. Effects of Material-Tissue Interactions Over Time

Materials utilized in medical devices are often subjected to prolonged exposure to bodily fluids, enzymes, and mechanical stresses, which can lead to material degradation over time. This degradation may result in the release of potentially harmful byproducts that can elicit immune responses or compromise the structural integrity of the device [32,33]. For instance, certain biodegradable polymers used in stents are designed to dissolve gradually; however, if the degradation rate is excessively rapid, it can lead to localized inflammation or premature device failure [34,35]. The interaction between the material and surrounding tissues is critical, as it influences not only the biocompatibility of the device but also its overall efficacy in clinical applications [35,36]. Therefore, understanding these interactions is vital for predicting the long-term performance of medical devices and mitigating potential complications.

5.2. Preventing Degradation and Failure of Devices

Biocompatible materials such as titanium alloys, cobalt-chromium alloys, and specific polymers are frequently employed due to their resistance to corrosion, wear, and biological degradation to enhance the longevity and reliability of medical devices [33,37]. These materials are selected based on their mechanical properties and ability to withstand the physiological environment without eliciting adverse biological responses [35]. Furthermore, advanced surface modification techniques, including plasma treatments and chemical coatings, can significantly improve the biocompatibility and durability of these materials, thereby reducing the need for frequent device maintenance [38,39]. For example, applying zwitterionic materials has been shown to mitigate undesirable biomolecule adhesion, thus enhancing the overall performance of implantable devices [38]. Such innovations are crucial for developing devices that maintain their functionality over extended periods while minimizing the risk of complications associated with material degradation.

5.3. Case Studies: Biocompatibility-Driven Design Choices

Several case studies illustrate the importance of biocompatibility-driven design choices in medical devices. A notable example is the development of drug-eluting stents, which are engineered to release anti-inflammatory drugs that prevent restenosis, or the narrowing of blood vessels [34,35]. By integrating biocompatibility considerations into the design of these stents, manufacturers can significantly reduce the likelihood of immune reactions and enhance long-term patient outcomes [35,36]. Additionally, the use of biodegradable materials in implantable sensors has emerged as a promising approach to minimize the need for surgical removal, thereby reducing the associated risks of infection and inflammation [40,41]. These examples underscore the critical role of biocompatibility in guiding design choices that ultimately improve the safety and effectiveness of medical devices.

6. SUSTAINABILITY CONSIDERATIONS IN BIOCOMPATIBILITY TESTING

The growing emphasis on sustainability within the healthcare sector has significantly influenced the development and evaluation of biocompatible materials. The medical community seeks to ensure patient safety as well as minimize environmental impact thus, integrating sustainable practices into biocompatibility testing has become increasingly important.

6.1. Environmentally Friendly Materials and Alternatives

Sustainable alternatives, such as biodegradable polymers and bio-based materials, are gaining traction in the design of medical devices. Polymers like polylactic acid (PLA) and polycaprolactone (PCL) are notable examples of biodegradable materials that exhibit good biocompatibility, thereby reducing both environmental impact and the necessity for device retrieval or replacement [42]. The use of these materials not only addresses the issue of plastic waste but also aligns with the principles of a circular economy by promoting the development of products that can safely decompose in the environment [43]. Furthermore, incorporating biodegradable metals into medical devices is being explored, as they offer the potential for safe absorption by the body while minimizing long-term waste [44]. This shift towards environmentally friendly materials reflects a broader commitment to sustainable healthcare practices.

6.2. Reducing Waste Through Sustainable Device Design

The design of reusable and modular medical devices is a critical strategy for reducing waste and minimizing the use of hazardous materials. By focusing on sustainability, manufacturers can create devices that maintain functionality and lower their overall carbon footprint [45]. For instance, developing modular systems allows for replacing only the components that require maintenance rather than the entire device, thereby significantly reducing waste [46]. Sustainability-focused biocompatibility testing ensures that these innovative materials and designs do not compromise the safety and efficacy of the devices. By integrating life cycle assessments (LCA) into the design process, manufacturers can evaluate the environmental impact of their products from production through to disposal, leading to more informed decisions that prioritize sustainability [47].

6.3. Life Cycle Assessment of Medical Devices

Life Cycle Assessment (LCA) is a comprehensive method used to evaluate the environmental impact of medical devices throughout their entire lifecycle, from production to disposal. LCAs facilitate identifying opportunities to reduce energy consumption, material usage, and waste, thereby promoting a more sustainable healthcare system [48]. By analyzing each stage of a device's life cycle, manufacturers can pinpoint areas for improvement, such as optimizing production processes to minimize resource use or designing for end-of-life recyclability [49]. This holistic approach not only enhances the sustainability of medical devices but also aligns with regulatory requirements and public expectations for environmentally responsible healthcare solutions [50]. As the healthcare industry continues to evolve, the integration of sustainability considerations into biocompatibility testing and device design will be essential for fostering a more sustainable future.

7. FUTURE DIRECTIONS AND INNOVATIONS

The field of biocompatibility testing and medical device design is undergoing significant evolution, driven by advancements in technology and materials that promise to enhance both functionality and sustainability.

7.1. Emerging Trends in Sustainable Materials

Recent research is increasingly focused on utilizing natural biomaterials such as silk, collagen, and chitosan, which demonstrate excellent biocompatibility and biodegradability. These materials present viable alternatives to traditional synthetic polymers in various applications, offering both functional advantages and environmental benefits [51]. For instance, silk fibroin has been recognized for its mechanical properties and biocompatibility,

making it suitable for applications in tissue engineering and drug delivery systems [52]. The shift towards these sustainable materials aligns with the growing demand for environmentally responsible practices in medical device manufacturing, contributing to a circular economy that emphasizes the use of renewable resources [51].

7.2. Advances in Biocompatibility Testing Methodologies

Innovative testing methodologies are emerging as alternatives to traditional animal testing, significantly enhancing the accuracy of biocompatibility predictions while reducing ethical concerns associated with animal use. Techniques such as *in silico* modeling and 3D bioprinting are at the forefront of this transformation. *In silico* models allow for the simulation of biological interactions at the molecular level, providing insights into potential biocompatibility issues before physical testing [53]. Meanwhile, 3D bioprinting enables the creation of complex tissue structures that can be used for more accurate *in vitro* testing of medical devices [54]. These advancements not only improve the reliability of biocompatibility assessments but also align with ethical considerations by minimizing the reliance on animal models.

7.3. Integrating Maintenance and Sustainability in the Design Phase

Medical device manufacturers increasingly recognize the importance of integrating maintenance and sustainability considerations from the earliest stages of the design process. This proactive approach involves selecting materials and manufacturing processes that comply with biocompatibility standards and enhance the device's longevity and environmental sustainability [55]. For example, the adoption of modular designs allows for replacing specific components rather than entire devices, thereby reducing waste and extending the product lifecycle [56]. Furthermore, incorporating eco-design principles can guide manufacturers in developing devices that are easier to recycle or dispose of responsibly, ultimately contributing to a more sustainable healthcare system [57].

8. CONCLUSION

The sustainability and long-term maintenance of medical devices are critical factors in advancing modern healthcare. Biocompatibility tests play an essential role in ensuring the safety and efficacy of these devices by minimizing adverse biological reactions and prolonging their functional lifespan. Through comprehensive biocompatibility testing, medical devices can be optimized for patient safety while also contributing to environmental sustainability. This dual approach, focusing on material integrity and reducing environmental impact, is key to future innovations in the medical field. As biocompatibility-driven design becomes more prevalent, healthcare can benefit from devices that are not only safe and reliable but also aligned with sustainable practices, ultimately improving patient outcomes and reducing the overall ecological footprint of medical technologies.

9. REFERENCES

- [1] Vienken, J., & Boccato, C. (2024), *Do medical devices contribute to sustainability? The role of innovative polymers and device design*, The International Journal of Artificial Organs <https://doi.org/10.1177/03913988241245013>
- [2] Singh, A. B., et al. (2024), *Advancements in healthcare materials: unraveling the impact of processing techniques on biocompatibility and performance*, Polymer-Plastics Technology and Materials, 63(12), 1608–1644. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2350026>
- [3] Black, J. (2005), *Biological Performance of Materials: Fundamentals of Biocompatibility*, Fourth Edition (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420057843>

- [4] Irimia-Vladu, M. (2014), “Green” electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future, *Chem. Soc. Rev.* 43, 588-610. <https://doi.org/10.1039/C3CS60235D>
- [5] Hosseini, E. S., et al. (2021), *Biodegradable Materials for Sustainable Health Monitoring Devices*, *ACS Applied Bio Materials* 4 (1), 163-194. DOI: 10.1021/acsabm.0c01139
- [6] Moleró, A., et al. (2021), *Sustainability in Healthcare: Perspectives and Reflections Regarding Laboratory Medicine*, *Annals of Laboratory Medicine* 41(2), 139-144. <https://doi.org/10.3343/alm.2021.41.2.139>
- [7] European Medicines Agency (EMA). (2024), *Medical devices*, <https://www.ema.europa.eu/en/human-regulatory-overview/medical-devices> [08/10/2024].
- [8] Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu (TİTCK). (2024), *Tıbbi Cihazda Klinik Araştırmalar*, <https://www.titck.gov.tr/faaliyetalanlari/tibbicihaz/55> [08/10/2024].
- [9] U.S. Food and Drug Administration (FDA). (2024), *Importing Medical Devices*, <https://www.fda.gov/industry/importing-fda-regulated-products/importing-medical-devices> [08/10/2024].
- [10] European Commission. (2024), *Medical device classification*, <https://webgate.ec.europa.eu/udi-helpdesk/en/other-relevant-information/medical-device-classification.html> [08/10/2024].
- [11] Pérez-Maceda, B., et al. (2018), *Macrophage biocompatibility of cocr wear particles produced under polarization in hyaluronic acid aqueous solution*, *Materials* 11(5), 756. <https://doi.org/10.3390/ma11050756>.
- [12] Man, K., et al. (2017), *Immunological responses to total hip arthroplasty*, *Journal of Functional Biomaterials* 8(3), 33. <https://doi.org/10.3390/jfb8030033>
- [13] Affatato, S. (2020), *Advanced biomaterials for orthopaedic application*, <https://doi.org/10.3390/books978-3-03928-637-9>
- [14] Qi, H. and Wu, H. (2013), *Effect of surface modification of pure ti on tribological and biological properties of bone tissue*, *Surface Engineering* 29(4), 300-305. <https://doi.org/10.1179/1743294412y.0000000095>
- [15] Olmedo, D., et al. (2012), *Systemic and local tissue response to titanium corrosion*, In: *Pitting Corrosion*, Ed: Bensalah, N. <https://doi.org/10.5772/32500>
- [16] VanOs, R., et al. (2013), *In vitro macrophage response to nanometer-size chromium oxide particles*, *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials* 102(1), 149-159. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.32991>
- [17] Anwar, I., et al. (2015), *Preliminary study on the biocompatibility of stainless steel 316l and uhmwpe material*, *Advanced Materials Research* 1123, 160-163. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1123.160>
- [18] Gobbi, S. J., Gobbi, V. J. (2018), *Wear resistance of metallic orthopedic implants - mini review*, *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research* 12(3), 9302-9303. <https://doi.org/10.26717/bjstr.2018.12.002266>
- [19] Shirani, A., et al. (2019), *Combined tribological and bactericidal effect of nanodiamonds as a potential lubricant for artificial joints*, *Acs Applied Materials & Interfaces* 11(46), 43500-43508. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b14904>
- [20] Sandu, A., et al. (2019), *Characterization and mechanical proprieties of new timo alloys used for medical applications*, *Materials* 12(18), 2973. <https://doi.org/10.3390/ma12182973>
- [21] Pawłowski, Ł., et al. (2022), *Influence of surface modification of titanium and its alloys for medical implants on their corrosion behavior*, *Materials* 15(21), 7556. <https://doi.org/10.3390/ma15217556>
- [22] Srivastava, N. (2022), *Design and Analysis of Biomedical Implants for Enhanced Biocompatibility and Durability*, *NeuroQuantology* 20(8) 10391-10398. <https://doi.org/10.48047/nq.2022.20.8.nq221060>
- [23] Fazira, M., et al. (2015), *Microstructure and properties of forged cocrmo alloy for load bearing application*, *Advanced Materials Research* 1125, 504-508. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1125.504>
- [24] Kao, W., et al. (2017), *Improved tribological properties, electrochemical resistance and biocompatibility of aisi 316l stainless steel through duplex plasma nitriding and tin coating*

- treatment, *Journal of Biomaterials Applications* 32(1), 12-27. <https://doi.org/10.1177/0885328217712109>
- [25] Reeve, L. and Baldrick, P. (2017), *Biocompatibility assessments for medical devices – evolving regulatory considerations*, *Expert Review of Medical Devices* 14(2), 161-167. <https://doi.org/10.1080/17434440.2017.1280392>
- [26] Bernard, M., et al. (2018), *Biocompatibility of polymer-based biomaterials and medical devices – regulations, in vitro screening and risk-management*, *Biomaterials Science*, 6(8), 2025-2053. <https://doi.org/10.1039/c8bm00518d>
- [27] Thanusha, A. and Koul, V. (2021), *Biocompatibility evaluation for the developed hydrogel wound dressing – iso-10993-11 standards – in vitro and in vivo study*, *Biomedical Physics & Engineering Express* 8(1), 015010. <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ac3b2b>
- [28] Lima, L., et al. (2023), *Evaluation of tensile, thermal, and biological properties of natural rubber-based biocomposite with biosilicate and 45s5-k bioglass*, *Journal of Applied Polymer Science* 140(22) e53894. <https://doi.org/10.1002/app.53894>
- [29] Gemelli, C., et al. (2019), *Monocytes-based in vitro assay for a preliminary biocompatibility assessment of blood-contacting devices*, *European Journal of Inflammation* 17. <https://doi.org/10.1177/2058739218820479>
- [30] Lee, M., et al. (2020), *Novel dental poly (methyl methacrylate) containing phytoncide for antifungal effect and inhibition of oral multispecies biofilm*, *Materials* 13(2), 371. <https://doi.org/10.3390/ma13020371>
- [31] Oh, S., et al. (2022), *Assessment of zinc-bound phosphate-based glass-coated denture-relining material with antifungal efficacy for inhibiting denture stomatitis*, *Nanomaterials* 12(17), 3048. <https://doi.org/10.3390/nano12173048>
- [32] Nouman, M., et al. (2016), *Exudation of additives to the surface of medical devices: impact on biocompatibility in the case of polyurethane used in implantable catheters*, *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 104(12), 2954-2967. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.35837>
- [33] Mani, G., et al. (2024), *A review on manufacturing processes of cobalt-chromium alloy implants and its impact on corrosion resistance and biocompatibility*, *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials* 112(6), e35431. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.35431>
- [34] Wang, K., et al. (2017), *Lab-on-skin: a review of flexible and stretchable electronics for wearable health monitoring*, *Acs Nano*, 11(10), 9614-9635. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b04898>
- [35] Sharma, A. and Luthra, G. (2023), *Significance of iso 10993 standards in ensuring biocompatibility of medical devices: a review*, *Journal of Pharmaceutical Research International*, 35(8), 23-34. <https://doi.org/10.9734/jpri/2023/v35i87342>
- [36] Chiong, J., et al. (2021), *Integrating emerging polymer chemistries for the advancement of recyclable, biodegradable, and biocompatible electronics*, *Advanced Science* 8(14). <https://doi.org/10.1002/advs.202101233>
- [37] Ali, S., et al. (2020), *Biocompatibility and corrosion resistance of metallic biomaterials*, *Corrosion Reviews* 38(5), 381-402. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0001>
- [38] Li, B., et al. (2019), *Trimethylamine n-oxide-derived zwitterionic polymers: a new class of ultralow fouling bioinspired materials*, *Science Advances* 5(6). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9562>
- [39] Rokade, K. A., et al. (2024), *CogniFiber: Harnessing Biocompatible and Biodegradable 1D Collagen Nanofibers for Sustainable Nonvolatile Memory and Synaptic Learning Applications*, *Advanced Materials*, 36(24), 2312484. <https://doi.org/10.1002/adma.202312484>
- [40] Tsui, C., et al. (2022). *The effects of electrical stimulation on glial cell behaviour*. *BMC Biomedical Engineering*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s42490-022-00064-0>
- [41] Omar, R. (2024), *Biodegradable, biocompatible, and implantable multifunctional sensing platform for cardiac monitoring*, *Acs Sensors*, 9(1), 126-138. <https://doi.org/10.1021/acssensors.3c01755>
- [42] Silva, R., et al. (2018), *Evaluation of hydrolytic degradation of bionanocomposites through fourier transform infrared spectroscopy*, *Polímeros* 28(4), 348-354. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.09217>

- [43] Arias, C., et al. (2022), *Biodegradable polymers: a review about biodegradation and its implications and applications*, Packaging Technology and Science, 36(2), 81-95. <https://doi.org/10.1002/pts.2699>
- [44] Zhang, H., et al. (2024), *Effects of serum proteins on corrosion rates and product bioabsorbability of biodegradable metals*, Regenerative Biomaterials 11. <https://doi.org/10.1093/rb/rbad112>
- [45] Zhu, B., et al. (2015), *Silk fibroin for flexible electronic devices*, Advanced Materials 28(22), 4250-4265. <https://doi.org/10.1002/adma.201504276>
- [46] Narancic, T., et al. (2018), *Biodegradable plastic blends create new possibilities for end-of-life management of plastics but they are not a panacea for plastic pollution*, Environmental Science & Technology 52(18), 10441-10452. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02963>
- [47] Mtibe, A., et al. (2023), *Recent insight into the biomedical applications of polybutylene succinate and polybutylene succinate-based materials*, Express Polymer Letters, 17(1), 2-28. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2023.2>
- [48] Sonseca, A., et al. (2015), *Mechanical properties and degradation studies of poly(mannitol sebacate)/cellulose nanocrystals nanocomposites*, RSC Advances, 5(69), 55879-55891. <https://doi.org/10.1039/c5ra06768e>
- [49] Yang, H., et al. (2020), *Alloying design of biodegradable zinc as promising bone implants for load-bearing applications*, Nature Communications 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14153-7>
- [50] Khandelwal, G., et al. (2021), *Enhancing hydrophobicity of starch for biodegradable material-based triboelectric nanogenerators*, Acs Sustainable Chemistry & Engineering 9(27), 9011-9017. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01853>
- [51] Poblete, S., et al. (2023), *Emerging materials fostering interdisciplinary collaboration in Materials Design*, In: Yong-Gyun Ghim and Cliff (Sungsoo) Shin (eds) Interdisciplinary Practice in Industrial Design. AHFE 2023 International Conference. AHFE Open Access, vol 100. AHFE International, USA. <http://doi.org/10.54941/ahfe1002978>
- [52] Williams, D., et al. (2020), *A framework for the management of donated medical devices based on perspectives of frontline public health care staff in ghana*, Medicine Access Point of Care, 4, 239920262094136. <https://doi.org/10.1177/2399202620941367>
- [53] Armillas-Mateos, C. (2021), *Improving the sustainability of emergency ventilators for Covid-19 : A case study on OxyGEN-IP*, Proyecto 56: An industrial design journal 1, 22-37. <https://doi.org/10.25267/p56-idj.2021.i1.4>
- [54] Ruengpirasiri, P., et al. (2024), *Graphene pseudoreference electrode for the development of a practical paper-based electrochemical heavy metal sensor*, ACS Omega 9(1), 1634–1642. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08249>
- [55] Song, H., et al. (2024), *Neuromodulation of the peripheral nervous system: Bioelectronic technology and prospective developments*, BMEMat, 2(1), e12048. <https://doi.org/10.1002/bmm2.12048>
- [56] Mariotti, N., et al. (2020), *Recent advances in eco-friendly and cost-effective materials towards sustainable dye-sensitized solar cells*, Green Chemistry 22(21), 7168-7218. <https://doi.org/10.1039/d0gc01148g>
- [57] Vohra, V. (2018), *Can polymer solar cells open the path to sustainable and efficient photovoltaic windows fabrication?*, The Chemical Record 19(7), 1166-1178. <https://doi.org/10.1002/tcr.20180007>

**PROCJENA STANJA STRUKTURNIH PLOČA BRODOVA ZA
PREVOZ RASUTOG TERETA U FUKCIJI ODREĐIVANJA
STRATEGIJE ODRŽAVANJA**

**ASSESSMENT OF THE CONDITION OF THE STRUCTURAL PANELS
OF BULK CARRIERS IN THE FUNCTION OF DETERMINING THE
MAINTENANCE STRATEGY**

mr Ivan Krivokapić, dipl. inž.

prof. dr Špiro Ivošević, dipl. inž.
Pomorski fakultet Kotor, Univerzitet Crne Gore

REZIME

Brodovi su projektovani da obavljaju svoju transportnu funkciju tokom planiranih 25 godina. Međutim, uslovi eksploatacije, različite metode održavanja, uslovi okruženja i brojni drugi operativni faktori čine njihov životni vijek nepredvidljivim. Usljed brojnih uticajnih faktora, neki strukturni elementi i oblasti brže propadaju tokom vremena, a neki sporije, što je veoma značajno s aspekta planiranja održavanja brodova.

U ovom radu koristimo značajnu bazu podataka o stanju dvije strukturne oblasti brodova za prevoz rasutog tereta. Razmatraju se podaci za dva stara broda, odnosno za ravno brodsko dno i za dno skladišta tereta. Mjerenjem debljine čeličnih ploča korišćenjem standardnih ultrazvučnih mjernih instrumenata tokom redovnih klasifikacionih pregleda, dobijene su vrijednosti smanjenja debljine čeličnih ploča nakon 15, 20 i 25 godina eksploatacije. Od tako dobijenih podataka formirana je sistematizovana baza podataka, koja će biti korišćena za analizu stanja broda i procjenu stanja čeličnih površina. Primjenom metode linearne regresije biće procijenjeno stanje razmatranih strukturnih površina.

Dobijeni rezultati istraživanja, za oba razmatrana broda su pokazala da dno skladišta tereta znatno brže propada u odnosu na ravno brodsko dno, te da brzina porasta korozije može uticati na značajne zahvate održavanja unutar skladišta tereta u odnosu na ravno dno broda.

Ključne riječi: korozija, trup broda, održavanje, regresiona analiza

SUMMERY

The ships are designed to perform their transport function during the planned 25 years. However, exploitation conditions, different maintenance methods, environmental conditions and numerous other operational factors make their life expectancy unpredictable. Due to numerous influential factors, some structural elements and areas deteriorate faster over time, and some more slowly, which is very significant from the aspect of ship maintenance planning.

In this paper, we use a significant database on the condition of two structural areas of bulk carriers. The data for two old ships are considered, that is, for the flat bottom of the ship and for the bottom of the cargo hold. By measuring the thickness of steel plates using standard ultrasonic measuring instruments during regular classification inspections, the values of the reduction in the thickness of steel plates after 15, 20 and 25 years of exploitation were obtained. From the data thus obtained, a database was created, which will be used for the analysis of the condition of the ship and the assessment

of the condition of the steel surfaces. By applying the linear regression method, the condition of the considered structural surfaces will be assessed.

The obtained results of the research, for both considered ships, showed that the bottom of the cargo hold deteriorates much faster compared to the flat bottom of the ship, and that the rate of corrosion growth can affect significant maintenance operations inside the cargo hold compared to the flat bottom of the ship.

Key words: corrosion, ship hull, maintenance, regression analysis

1. UVOD

Brodovi za prevoz rasutog tereta predstavljaju plovila dizajnirana za prevoz različitih vrsta suvog tereta u prostor ograničen stranicama broda i sa značajno velikim otvorima za ukrcaj tereta na glavnoj palubi. Brod za rasuti teret je konstruisan sa jednom palubom, jednostrukom ili dvostrukom oplatom, duplim dnom, bočnim i gornjim balastnim tankovima [1]. Konvencionalni dizajn broda za rasuti teret, sa jednostranom oplatom između gornjih bočnih tankova i tankova duplog dna, izlaže njegov vertikalni okvir zamoru, koroziji i mehaničkim oštećenjima. Značajno poboljšanje i otpornost donio je posljednjih godina kreirani dvooplatni alternativni dizajn brodova [2].

Zajednički za sve vrste brodova je intenzivan transport tokom nekoliko decenija transporta, agresivni uslovi radne sredine kojima su izloženi, procedure održavanja, kao i procedure i postupci rukovanja sa teretom u luci. Između brojnih vrsta neželjenih događaja koji su registrovani u eksploataciji kod ovih brodova, kao što su sudari, požari, nasukanja i drugo, jedan od značajnih uzroka nastanka oštećenja i na kraju gubitka ovih brodova i dalje su strukturalne greške prouzrokovane korozijom, zamorom, deformacijama i krakovima. Da bi spriječilo ove situacije, Međunarodno udruženje klasifikacionih društava (IACS - International Association of Classification Societies), kao udruženje pojedinačnih klasifikacionih društava, uložilo je značajan trud u kreiranje pravila koja će unaprijediti sigurnost brodova.

U cilju obezbjeđivanja međunarodnih standarda za sigurno upravljanje i rad brodova, kao i za sprječavanje zagađenja, Međunarodna pomorska organizacija (IMO - International Maritime Organization) propisala je Međunarodni kodeks upravljanja sigurnošću (ISM - The International Safety Management), koji predstavlja standard za sigurno upravljanje i rad brodova na moru.

Prepoznajući da ne postoje dvije iste brodarske kompanije ili brodovlasnici i da brodovi posluju pod širokim spektrom različitih uslova, ISM kodeks se zasniva na opštim principima i ciljevima, koji uključuju procjenu svih identifikovanih rizika za brodove, osoblje i životnu sredinu jedne kompanije i uspostavljanje odgovarajućih zaštitnih mehanizama. Stoga najvažniji doprinos u primjeni ISM kodeksa ima proces planskog održavanja brodova i procjena rizika. Strateški cilj dobrog upravljanja sigurnošću je posvećenost sa vrha. U pitanjima sigurnosti i zaštite životne sredine krajnji rezultat određuje posvećenost, kompetentnost, stavove i motivaciju pojedinaca na svim nivoima [3].

Značajan tehničko-tehnološki napredak u oblasti površinske zaštite metalnih čeličnih površina omogućio je definisanje više različitih metoda sprečavanja intenziteta korozije i obraštanja, a samim tim i njome prouzrokovanih posljedica. Neke od ovih metoda su površinska zaštita različitim premazima, primjena nerđajućeg čelika, upotreba inhibitora, anodna zaštita i katodna zaštita [4]. Površinska zaštita trupa je efikasna, ali i veoma skupa, obzirom na neophodan obim i prirodu posla, zbog čega u potpunosti mora biti urađena u skladu sa standardima. Pored kvaliteta zaštite, prilikom nanošenja zaštitnih premaza, neophodno je voditi računa o efikasnosti i ekonomičnosti plovidbe [5].

Korozija materijala je pojava koja nastaje kao posljedica odvijanja fizičkih, hemijskih i elektrohemijskih reakcija koje dovode do promjena hemijskih i mehaničkih karakteristika

metala. Uopšteno govoreći, korozija kao elektrohemijska reakcija izaziva prostornu degradaciju metala i njihovih legura, čija korozija u stvari predstavlja oksidaciju gasovitih sredina. Slabljenje karakteristika metala u sredinama koje obiluju vlagom predstavlja elektrohemijsku ili vlažnu koroziju [6].

U zavisnosti od načina nastanka i mehanizma razvoja, koroziju je moguće podijeliti u nekoliko grupa: uniformna korozija, korozija na pukotinama, galvanska korozija, eroziona korozija, lokalna korozija i druge [7].

Procjena stanja korozije danas je precizno definisana pravilima klasifikacionih društava, kako u djelu dijagnostike stanja, tako i u djelu procjene dalje eksploatacije i zahtjevanog remonta. Mjerenje strukturnih elemenata i oblasti izvodi se u precizno definisanim terminima koji omogućavaju trenutnu procjenu stanja i planiranje opravki oštećenih površina. Takođe, omogućavaju definisanje strategije održavanja i opšte procjene dalje ekonomske opravdanosti eksploatacije brodova.

Ovaj rad je sačinjen u četiri poglavlja. U drugom poglavlju je prikazana metodologija sa bazom podataka i primjenom odgovarajuće metode obrade podataka. Treće poglavlje prikazuje rezultate i njihovu diskusiju, dok su u četvrtom poglavlju data zaključna razmatranja.

2. METODOLOGIJA

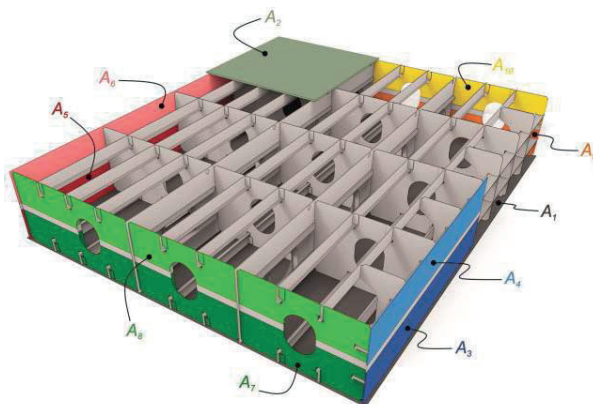
U cilju predikcije napredovanja korozije u periodu nakon 25 godina eksploatacije i održavanja brodova, u ovom radu analiziramo dvije strukturne oblasti kod dva broda u eksploataciji. Mjerenje debljine čeličnih ploča realizovano je u planiranim klasifikacionim periodima od strane odobrene kompanije i operatera. Mjerenje je izvedeno pomoću ultrazvučnih mjernih instrumenata, a na bazi precizno definisanih kriterijuma. Koristeći tako kreirane izvještaje o stanju debljine svih čeličnih strukturnih ploča, ukrucenja i nosača oba broda nakon 15, 20 i 25 godina eksploatacije, izvršen je odabir dvije strukturne oblasti, ravnog dna i unutrašnjeg dna broda. Nad tako kreiranom bazom podataka, biće primjenjena metoda linearne regresije, koja se zasniva na rezultatima mjerenja u mjernim tačkama razmatranih oblasti. Primjena metode linearne regresije omogućava se predikciju smanjenja debljine ploča i u skladu s tim definisanje postupaka održavanja kojima bi se korozija mogla usporiti, a životni vijek broda produžiti.

2.1. Baza eksperimentalnih podataka

U cilju obezbjeđivanja podataka potrebnih za analizu i predikciju ponašanja elemenata broda u budućnosti, kompanija INVAR-Ivošević realizovala je mjerenja na dva broda za prevoz rasutog tereta. Mjerenje je obavljeno u skladu sa pravilima i propisima klasifikacionih društava, odnosno u svim tankovima oba broda, tako što su mjerne tačke raspoređene na lijevoj i desnoj strani u po pet presjeka svakog tanka. Parametri koji su mjereni odnose se na ravno dno i unutrašnje dno jednog i drugog broda. Na Slici 4. prikazana je osnovna strukturna šema područja tankova za gorivo broda za rasuti teret. U radu će biti sprovedena analiza za dva elementa i to A_1 - donja ploča i A_2 - unutrašnja donja ploča. Ove dvije oblasti su posebno značajne, s obzirom da su izložene različitim uslovima okruženja, te se na njih primjenjuju različite metode održavanja.

Ravno dno broda je tokom eksploatacije, sa njegove spoljne strane izloženo degradirajućem uticaju morske vode različite temperature i saliniteta u različitim okruženjima, kao i uticaju mikroorganizama, dok je sa unutrašnje strane izloženo djelovanju goriva, balastne vode ili suvih prostora. Održavanje spoljnih ploča, u cilju sanacije posljedica korozije, sprovodi se redovno, na suvom doku, svake dvije do tri godine, tokom kojeg čelične ploče oplata broda bivaju adekvatno zaštićene površinskim premazima, čime se sprječava obraštanje i korozija. S druge strane ploče unutrašnjeg dna broda predstavljaju dno skladišta tereta i nisu izložene uticajima koji deluju na njegovo ravno dno. Pored vlage iz atmosfere, čiji je korozioni uticaj

manji od uticaja morske vode, ove ploče su sa gornje strane izložene uticaju tereta, manipulativnoj opremi i primjenjenom sistemu održavanja, dok su sa donje strane izložene gorivu, balastu ili svim prostorima. Ploče unutrašnjeg dna broda nikada se ne farbaju sa gornje strane, odnosno iz skladišta s obzirom da površinski premaz, zbog prisustva tereta vrlo brzo izgubi svoju zaštitnu funkciju.



Slika 4. Osnovna strukturalna šema područja tanka za gorivo broda za rasuti teret [1]:
 A₁ - donja ploča, A₂ - unutrašnja donja ploča, A₃ - unutrašnji nosač (vodonepropusni), niži, A₄ - unutrašnji nosač (vodonepropusni), viši, A₅ - bočni nosač (vodonepropusni), niži, A₆ - bočni nosač (vodonepropusni), viši, A₇ - pod prednji (vodonepropusni), niži, A₈ - pod prednji (vodonepropusni), viši, A₉ - pod zadnji (vodonepropusni), niži, A₁₀ - pod zadnji (vodonepropusni), viši

Tankovi prikazani na Slici 4. obično su postavljeni duž glavne ose broda, iako mogu biti orijentisani i upravno na nju. Primjenom odgovarajuće opreme i mjernih tehnika, izvršena su mjerenja u planom predviđenim tačkama unutar po pet presjeka u svim tankovima oba broda, pri čemu su dobijene vrijednosti debljina čeličnih ploča. Nakon sistematizacije ovih podataka, formirane su tabele koje prikazuju prosječne debljine ploča nakon 15, 20 i 25 godina eksploatacije i održavanja oba broda. Na Slici 5. tabelarno su prikazani rezultati mjerenja debljine čeličnih ploča, uključujući debljinu ravnog i unutrašnjeg dna u svih pet presjeka tanka 4 broda 1.

TANK 4																																	
	PRESJEK 1				PRESJEK 2				PRESJEK 3				PRESJEK 4				PRESJEK 5																
Šir	Osnaška	original	Lijeva	Desna	%	%	Osnaška	original	Lijeva	Desna	%	%	Osnaška	original	Lijeva	Desna	%	%	Osnaška	original	Lijeva	Desna	%	%	Osnaška	original	Lijeva	Desna	%	%			
4	Bottom plate	A	20.0	19.7	19.8		A	20.0	19.9	19.7			A	20.0	19.7	19.7			A	20.0	19.8	19.7			A	20.0	19.8	19.6					
5		B	16.0	15.8	15.8		B	16.0	15.9	15.8			B	17.0	16.7	16.8			B	17.0	16.8	16.8			B	18.0	17.7	17.8					
6													C	17.0	16.8	16.9			C	17.0	16.7	16.8			C	18.0	17.7	17.8					
7																																	
8		Uk.	16.0			1.4	1.1	Uk.	16.0			0.0	1.4	Uk.	16.0			1.5	1.4	Uk.	16.0			1.3	1.3	Uk.	16.7			1.4	1.4		
9	Inner bottom plate	T0	19.3	19.1	19.4		T0	19.3	19.2	19.3			T0	19.3	19.0	19.3			T0	19.3	19.1	19.3			T0	19.3	19.2	19.3					
10		T2	19.3	19.3	19.4		T2	19.3	19.3	19.4			T2	19.3	19.2	19.3			T2	19.3	18.9	19.2			T2	19.3	19.2	18.9					
11																																	
12		Uk.	19.5			0.3	0.0	0.5	Uk.	19.5			1.0	1.3	0.0	Uk.	19.5		2.2	1.4	1.0	Uk.	19.5		2.0	1.4	Uk.	19.5			1.9	1.0	2.1
13	P tunnel W T Girders Lower	T	14.0	14.0	14.0		T	14.0	13.8	13.8			T	14.0	13.8	13.7			T	14.0	13.8	13.8			T	14.0	13.8	13.8					
14																																	
15		Uk.	14.0			0.0	0.0	Uk.	14.0			1.4	1.0	Uk.	14.0			1.4	1.2	Uk.	14.0			1.4	1.0	Uk.	14.0			1.4	1.4		
16	P tunnel W T Girders Upper	T	14.0	13.8	13.9		T	14.0	13.8	13.8			T	14.0	13.8	13.9			T	14.0	14.0	14.0			T	14.0	13.9	13.9					
17																																	
18		Uk.	14.0			1.4	0.2	Uk.	14.0			1.4	1.0	Uk.	14.0			1.4	0.7	Uk.	14.0			0.0	0.0	Uk.	14.0			0.2	0.8		
19	Side W T Girders Lower																																
20																																	
21		Uk.																															
22	Side W T Girders Upper																																
23																																	
24		Uk.																															
25	W T Floor All Lower	Item 1	14.0	13.8	13.9																												
26		Item 3	14.0	13.8	13.9																												
27		Item 5	14.0	13.9	13.9																												
28																																	
29																																	
30		Uk.	14.0			1.2	1.0	Uk.																									
31	W T Floor All Upper	Item 2	14.0	13.8	13.8																												
32		Item 4	14.0	13.8	13.9																												

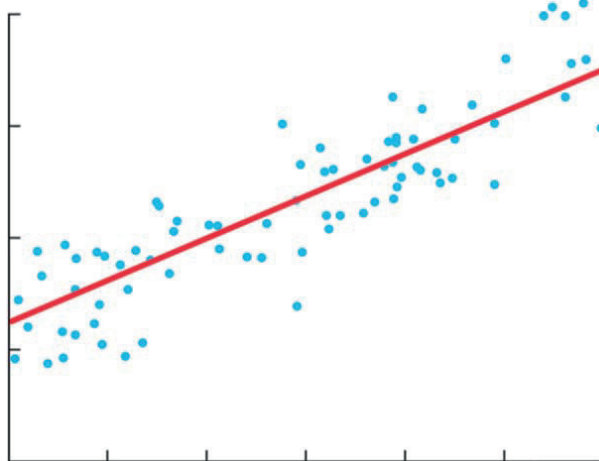
Slika 5. Tabelarni prikaz rezultata mjerenja tanka 4 broda 1

Na isti način sistematizovani su i podaci za ova dva parametra za sve druge tankove i presjeka oba broda. Podaci dobijeni na ovaj način nakon 15, 20 i 25 godina eksploatacije i održavanja

oba broda biće korišćeni kao baza podataka za analizu stanja ravnog dna i unutrašnjeg dna oba broda.

2.2. Metoda

Kako bi mogli biti donijeti određeni zaključci, koji za cilj imaju produženje životnog vijeka brodova, kao i određivanje strategije održavanja, primjenjena je metoda linearne regresije, koja omogućava da se linearnom aproksimacijom, prikazanom na Slici 6. predvidi ponašanje broda u budućnosti na osnovu rezultata obavljenih mjerenja.



Slika 6. Linearna regresija [8]

Regresiona analiza nam govori o povezanosti nezavisno promjenljive (x), sa zavisno promjenljivom (y , odnosno $f(x)$), tako što pokušava da predvidi koju će vrijednost poprimiti zavisno promjenljiva (y), na osnovu poznate vrijednosti nezavisno promjenljive (x). Jednostavna linearna regresija se može prikazati jednačinom (1):

$$y = f(x) = ax + b \quad (1)$$

gdje je:

x_i - vrijeme eksploatacije i održavanja,

y_i - procentualna vrijednost smanjenja debljine ploča ravnog dna i unutrašnjeg dna broda,

a - odsječak i

b - nagib.

Linearna regresija podrazumjeva aproksimaciju dobijenih rezultata mjerenja pravom linijom na optimalan način. U tu svrhu korišćen je softverski paket Excel, koji u jednom od menija pruža mogućnost sprovođenja linearne regresije. Pored iscrtavanje prave linije, softverski paket definiše i njenu jednačinu, što omogućava izračunavanje procentualnog oštećenja na oba broda nakon 30 godina eksploatacije i održavanja.

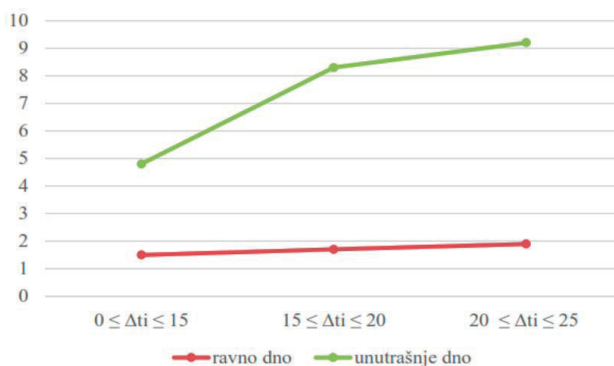
3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Grafički prikaz i analiza dobijenih rezultata za brod 1

Objedinjavanjem podataka dobijenih mjerenjem u tačkama na lijevoj i desnoj strani svih tankova broda 1, moguće je dobiti njihove srednje vrijednosti koje se odnose na brod 1 kao cjelinu. Podaci se odnose na ravno dno i unutrašnje dno broda 1, nakon 15, 20 i 25 godina eksploatacije i održavanja. Na slici 7 prikazane su vrijednosti degradacije dna i unutrašnjeg dna broda 1, dobijene na osnovu podataka prikazanih u Tabeli 1.

Tabela 1. Izmjerene vrijednosti smanjenja debljina ploča broda 1

starost broda (godine)	srednje vrijednosti smanjenja debljine ploče uzrokovane korozijom (%)	
	ravno dno	unutrašnje dno
	srednja vrijednost	srednja vrijednost
15	1.5	4.8
20	1.7	8.3
25	1.9	9.2



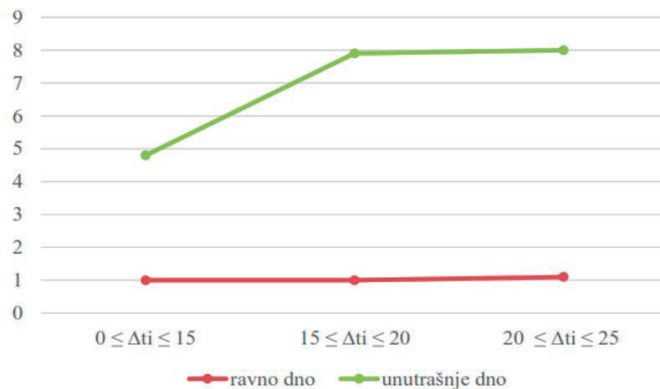
Slika 7. Degradacija ravnog dna i unutrašnjeg dna broda 1

3.2. Grafički prikaz i analiza dobijenih rezultata za brod 2

Objedinjavanjem podataka dobijenih mjerenjem u ranije definisanim mjernim lokacijama moguće je dobiti srednje vrijednosti istrošenja čeličnih ploča koje se odnose na brod 2 kao cjelinu. Podaci se odnose na ravno dno i unutrašnje dno broda 2, nakon 15, 20 i 25 godina eksploatacije i primjenjenih metoda održavanja. Na slici 8. Prikazane su vrijednosti degradacije ravnog dna i unutrašnjeg dna broda 2, koje su dobijene na osnovu podataka prikazanih u Tabeli 2.

Tabela 2. Izmjerene vrijednosti smanjenja debljina ploča broda 2

starost broda (godine)	srednje vrijednosti smanjenja debljine ploče uzrokovane korozijom (%)	
	ravno dno	unutrašnje dno
	srednja vrijednost	srednja vrijednost
15	1	4.8
20	1	7.9
25	1.1	8



Slika 8. Degradacija ravnog dna i unutrašnjeg dna broda 2

3.3. Rezultati regresione analize

Primjenom metode linearne regresije, u sklopu analitičke obrade mjerenjem prikupljenih podataka, moguće je predvidjeti ponašanje sistema u budućnosti, odnosno u našem slučaju degradaciju ravnog dna i unutrašnjeg dna brodova 1 i 2. Mjerenjem smo dobili podatke nakon 15, 20 i 25 godina eksploatacije, a primjenom ove metode ćemo dobiti predikciju kolika će se vrijednost oštećenja pojaviti nakon 30 godina.

Slika 9. prikazuje objedinjenu grafičku interpretaciju linearne regresije za brod 1 i brod 2 kao cjelinu. Tabela 3. i Tabela 4. prikazuju vrijednosti izmjerenih oštećenja ravnog dna i unutrašnjeg dna, ali i prediktovanog oštećenja nakon 30 godina eksploatacije brodova, kao i procentualno uvećanje u odnosu na prethodna mjerenja. Za razliku od unutrašnjeg dna čija linearna regresija pokazuje napredak degradacije, u slučaju ravnog dna se može reći da ona praktično konstantna, što se svakako može pripisati redovnom održavanju.

Tabela 3. Izmjerena i prediktovana vrijednost smanjenja debljina ploča broda 1

starost broda (godine)	srednje vrijednosti smanjenja debljine ploče uzrokovane korozijom (%)	
	ravno dno	unutrašnje dno
	srednja vrijednost	srednja vrijednost
15	1.5	4.8
20	1.7	8.3
25	1.9	9.2
30	1.9	9.6 - 4.3%

Tabela 4. Izmjerena i prediktovana vrijednost smanjenja debljina ploča broda 2

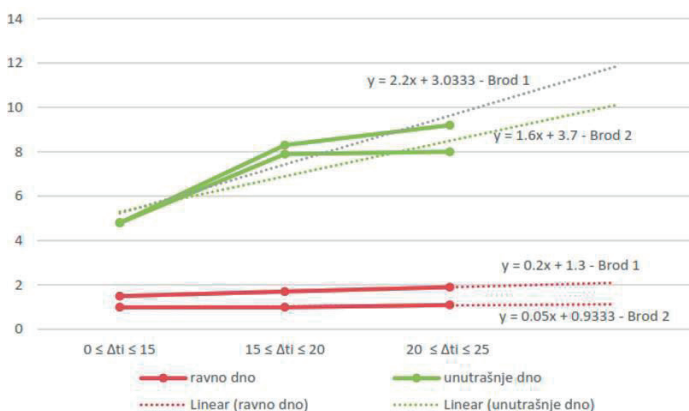
starost broda (godine)	srednje vrijednosti smanjenja debljine ploče uzrokovane korozijom (%)	
	ravno dno	unutrašnje dno
	srednja vrijednost	srednja vrijednost
15	1	4.8
20	1	7.9
25	1.1	8
30	1.1	8.5 - 6.3%

3.4. Diskusija

Izuzimajući ekstremne vrijednosti, koje se mogu pripisati djelovanju ekstremnih i neuobičajnih uslova okruženja u kojima je brod boravio, a nakon analize čitavog niza statističkih podataka do kojih se došlo mjerenjem parametara debljine čeličnih ploča nakon 15, 20 i 25 godina eksploatacije i primjenjenih metoda održavanja, može se zaključiti da je stanje dna broda u navedenim periodima konstantno tj. da je efikasnost zaštite premazom ujednačena i ne prelazi degradaciju od 1.5%. Ovom stanju očigledno je doprinjelo kvalitetno održavanje realizovano na svake dvije godine, koje je uspješno odolijevalo djelovanju morske vode i drugih negativnih uticaja.

Za razliku od stanja ravnog dna broda, situacija sa unutrašnjim dnom značajno je drugačija. Vrijednosti degradacije njihovih zaštitnih slojeva u prvih 15 godina eksploatacije bliske su, ali

se razlikuju, što je razumljivo uzimajući u obzir okruženje i način održavanja. Njihovo stanje se značajno mijenja u narednom periodu, pa je tako degradacija zaštitnog sloja veća pri mjerenju nakon 15 godina eksploatacije i značajno raste nakon 20 godina eksploatacije. Treba istaći da je degradacija u periodu nakon 20 godina eksploatacije sporija u odnosu na onu prije 20 godina, što je posljedica zamjena onih čeličnih ploča koje su nakon zamjene morale biti zamjenjene. Očigledno je da je intenzivan korozioni proces unutar skladišta i nemogućnost primjene površinske zaštite uticala na odvajanje intenzivnog korozionog procesa u skladištima terete.



Slika 9. Linearna regresija ravnog dna i unutrašnjeg dna broda 1 i broda 2

Bez obzira na činjenicu da su uticaji koji postoje u okruženju u kome radi ravno dno broda oštriji i pogodniji za razvoj korozije, zahvaljujući njihovom redovnom održavanju na svake dvije godine do tri godine tokom redovnih dokovanja broda, postignuta je približno ujednačena i prihvatljiva efikasnost zaštite tokom eksploatacije. Sa druge strane, unutrašnje dno radi u blažem korozionom okruženju, ali je tokom vremena, zbog odsustva površinske zaštite, frekventnih ukrcajno iskrcajnih operacija, uticaja manipulativne opreme i korozivnog tereta, izostanka odgovarajućeg održavanja, došlo do brže i intenzivnije degradacije čeličnih ploča. U cilju zaustavljanja ovog procesa potrebno je razmotriti mogućnosti održavanja i unutrašnjeg dna broda ili transporta manje korozivnih materijala, makar u drugom dijelu životnog ciklusa broda.

4. ZAKLJUČAK

U radu su analizirani podaci do kojih se došlo mjerenjem debljine čeličnih ploča od kojih su izrađeni ravno dno i unutrašnje dno dva stara broda nakon 15, 20 i 25 godina eksploatacije. Mjerenje je realizovano u svim tankovima oba broda. Rezultati mjerenja su statistički obrađeni, nakon čega su prikazani za oba broda u cjelini, odgovarajućim tabelama i dijagramima. Dijagrami pokazuju da je zahvaljujući redovnom održavanju, procenat smanjenja debljine ploča ravnog dna nakon 15, 20 i 25 godina eksploatacije konstantan. Situacija sa unutrašnjim dnom je znatno drugačija. Tokom eksploatacije procenat istrošenja čeličnih ploča se povećava, s tim da je brzina njegovog povećanja nakon 20 godina eksploatacije manja od one nakon 15 godina eksploatacije.

U cilju predikcije ponašanja broda u budućnosti realizovano je ispitivanje primjenom metode linearne regresije, koja podrazumjeva definisanje linearne zavisnosti procenta smanjenja debljine ravnog dna i unutrašnjeg dna od vremena. Podaci dobijeni primjenom ove metode pokazuju da se u narednom petogodišnjem periodu nakon 25 godina eksploatacije, što ukupno

predstavlja period od 30 godina eksploatacije može očekivati isto što se dešavalo i u prošlosti. Procentualno smanjenje debljine čeličnih ploča ravnog dna pokazuju tendenciju konstantnih vrijednosti u vremenu, dok se na unutrašnjem dnu zapaža dalji značajan porast procenta smanjenja debljine čeličnih ploča. Kako bi se to izbjeglo, što bi rezultovalo produženju životnog vijeka brodova, mogla bi biti razmotrena mogućnost održavanja unutrašnjeg dna primjenom drugih tehnika ili na neki drugi efikasniji način operativne eksploatacije brodova, što bi ahtjevalo i primjenu odgovarajuće strategije održavanja. Buduća istraživanja bi trebala usmjeriti na uvećanju razmatrane baze podataka, te praćenju postojećih procedura i metoda održavanja tokom eksploatacije brodova.

ZAHVALNOST

Ovaj istraživački rad je podržala kompanija INVAR-Ivošević. Više informacija o Kompaniji možete pronaći na URL: <http://vvv.invar.me/indek.html>. Naime, podaci prikupljeni i sistematizovani tokom posljednjih dvadeset pet godina od strane operatera i stručnjaka Kompanije korišćeni su u analizi prikazanoj u radu koja se bavi uticajem korozije na dva broda za transport rasutog tereta. Treba istaći da kompanija INVAR-Ivošević svojim kupcima pruža pomorske usluge ultrazvučnog mjerenja debljine konstrukcija trupa plovila i da posjeduje sedam važećih sertifikata priznatih klasifikacionih društava: LR, BV, DNV, GL, RINA, ABS. i NKK. Kompanija trenutno pregleda više od tri stotine plovila, uglavnom starih brodova za rasute terete.

5. LITERATURA

- [1] Ivošević, Š., Meštrović, R., Kovač, N., *An approach to the probabilistic corrosion rate estimation model for inner bottom plates of bulk carriers*, Brodogr. Teor. PraksaBrodogr. Pomor. Teh., vol. 68, no. 4, pp. 57–70, 2017.
- [2] Beko, M., Ivošević, Š., Dlabač, T., *Application of Sensors in the Corrosion Monitoring of the Ship's Structural Parts*, in: 2021 25th International Conference on Information Technology (IT), pp. 1–4, 2021.
- [3] Ivošević, Š., Meštrović, R., Kovač, N., *Probabilistic estimates of corrosion rate of fuel tank structures of aging bulk carriers*, Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng., vol. 11, no. 1, pp.165–177, Jan. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.03.003>
- [4] Gulsun, B., Cemmedo, M. M., *Protection of Ship from Corrosion*
- [5] Ivošević, Š., Drégelyi-Kiss, Á., *Application of regression analysis on some thickness measurement data collected for inner bottom plates of aging bulk carriers*, no. 3, p. 5, 2020.
- [6] Ivošević, Š., *Analiza strukturne degradacije broskog trupa*, Doktorska disertacija, Pomorski fakultet Kotor, Univerzitet Crne Gore, Kotor, 2012.
- [7] Ivošević, Š., Kovač, N. *The reliability of watertight longitudinal girders of fuel tankson aging bulk carriers*, p. 9.
- [8] <https://www.centarzaistrazivanja.com/blog/regresija/>
- [9] Officer of the Watch, *Corrosion/Pitting on Ship's Side, Officer of the Watch*, available online (Dec 06 2013), <https://officerofthewatch.com/2013/12/06/corrosion-pitting-on-ships-side/>(accessed Oct. 26, 2022)
- [10] Lin, B., Dong, X., *Ship Hull Inspection: A Survey*, Ocean University of China, 2023.
- [11] Anastasopoulos, A., Kourousis, D., Botten, S., Wang, G., *Acoustic emission monitoring for detecting structural defects in vessels and offshore structures*, Ships and Offshore Structures vol. 4, pp. 363–37, 2009.
- [12] Brasunas, A., de S, A., *Corrosion Basics: an introduction*, National Association of Corrosion, Engineers Press, p. 535, 1984.

- [13] Leygraf, C., Graedel, T., *Atmospheric Corrosion*, Wiley-Interscience, New York, 9 (2000) National Physical Laboratory Middlesex, Basics of Corrosion Control, 2000.
- [14] Bonnin-Pascual, F., Ortiz, A., *Corrosion Detection for Automated Visual Inspection*, Intech Open, 2014a.
- [15] Raskovic, M., Ivosevic, S., *Reliability Analysis of Bottom Plate and Inner Bottom Plate of Fuel Tanks on the Example of Bulk Carriers*, 2022.
- [16] Raskovic, M., Ivosevic, Š., *Structural fuel tank reliability analysis using the example of bulk cargo vessels*, 2022.
- [17] Gardiner, C. P., Melchers, R. E., *Corrosion analysis of bulk carriers, Part I: operational parameters influencing corrosion rates*, Mar. Struct., p. 20, 2003.
- [18] Bauk, S., Aleksić, M., Ivošević, Š., *Scanning Fuel Tanks' Corrosion Wastage of Some Aged Bulk Carriers Due to Security Reasons*, PROMET – TrafficTransportation, vol. 23, no. 6, <https://doi.org/10.7307/ptt.v23i6.181>
- [19] Qin, S., Cui, W., *Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steelplated elements*, Mar. Struct., vol. 16, no. 1, [https://doi.org/10.1016/S0951-8339\(02\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0951-8339(02)00028-X)
- [20] Melchers, R. E., *Corrosion uncertainty modelling for steel structures*, J. Constr. SteelRes., 1999.
- [21] Boon B. *et al.*, *Condition assessment of aged ships and offshore structures*, presented at the International Ship and Offshore Structures Congress, vol. 2, 2009.
- [22] Ivošević, Š., Kovač, N., *An Analysis of Hull Structure Plating Failures Due to Corrosion*
- [23] Ivošević, Š., Meštrović, R., Kovač, N., *A Probabilistic Method for Estimating the Percentage of Corrosion Depth on the Inner Botto, Plates of Aging Bulk Carriers*, Jurnal of marine Science and Engineering

INVENTORY MAINTENANCE TO OPENFOAM TUTORIAL FOR SUBSONIC ROCKET WITH TUNED STABILITY VALUES

Ahmet Furkan OZKAN

Harran University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering
Sanliurfa, Türkiye

Yusuf ISIKER

Harran University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering
Sanliurfa, Türkiye

Zeynel Abidin FIRATOGLU

Harran University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering
Sanliurfa, Türkiye

ABSTRACT

With the development of technology, scientists have started to use various rocket models with higher performance according to their usage areas. They have developed many modelling methods and test studies for the rockets to be used and carried out their production. Scientists working in the space and aviation sector, where a lot of research and money is spent today, have focused on rocket models and flow analyses in recent years. Model rockets are considered to be in the category of powerful rockets, cost-effective and at the same time they are not included in a legal process for starting studies. Improvements to be made on such rockets will contribute to future rocket studies. In this context, in this study on the model rocket; rocket modelling was carried out through the open source OpenRocket program, and the 3D design of the model rocket with appropriate outputs was carried out in CAD environment. The design was completed by working on OpenFoam, an open source and continuous environment mechanics simulation programme. What makes this study different is that an open source tutorial for rockets has been created in the tutorial inventory within the OpenFoam programme. This tutorial was prepared to be a developable flow analysis study for engineers who will work in the field of aerospace and aeronautics with the maintenance to be done in the inventory.

Keywords: Model Rocket, Aerospace, Continuum mechanics, OpenFoam

1. INTRODUCTION

For years, scientists have investigated the study of “aerodynamic optimizations” to improve flight performance. Aerodynamicists have tried to achieve a better external geometry in terms of flight performance. Many studies have been conducted to perform aerodynamic shape optimizations to find the optimal shape that minimizes the cost function and maximizes efficiency while meeting specified constraints. [1-2-3]. As a result of these studies, many

different optimal shape geometries were found in terms of fuel efficiency. They also aimed to make improvements in aerodynamics and performance by designing optimum rocket designs and to create suitable geometries. Rockets are designed by calculating high lift/drag ratios for the nose cone, body, engine area and fins. Rocket aerodynamics is analysed under the headings of drag, thrust, incoming airflow and appropriate stable margin. There are some commonly used methods for optimizing rocket geometry in previous studies. The effect of yaw motion on the rocket, which is one of the motions exhibited by the rocket while flying, was observed. In the study, the effect of the nose cone and the rear body on the flight had investigated numerically. As a result of the research, it have been determined that the flight launch angle is important, but the rocket geometry is the most important. [4]. Another study includes a three-dimensional study of the effect of different turbulence models for external supersonic flow field simulations, aiming to achieve the best accuracy in rocket aerodynamics. In the study, they found that more accurate results can be obtained with the Navier-Stokes stress method in supersonic rockets [5]. In this study, the aerodynamic analysis of the rocket using a solid fuel rocket engine and the differences between the parameters OpenFoam and OpenRocket were investigated. As a result, the accuracy of the results obtained in the open source software program was observed. It was observed that the difference was due to the difference in the parameters entered and the creation of real world conditions, and the OpenRocket program was observed to be superficial. With the results obtained, a code sequence and an OpenFoam tutorial were created. With the maintenance and changes to be made in this tutorial, it will be a ready-made flow analysis tutorial for those who will work in the field of aerospace and aviation. This study was conducted for this purpose.

2. MATERIAL

In this study, basically 3 open source software were used. Firstly, rocket modelling and motion modelling in 2 dimensions were performed using OpenRocket software. 2ndly, solid model design of the motion modelled rocket was made with Freecad software. Finally, the aerodynamic performance of the rocket was calculated with OpenFoam software. As a result of these processes, an open source software tutorial for rocket design was developed for OpenFoam. The methods and materials used are presented below respectively.

2.1. ROCKET DESIGN PARAMETERS

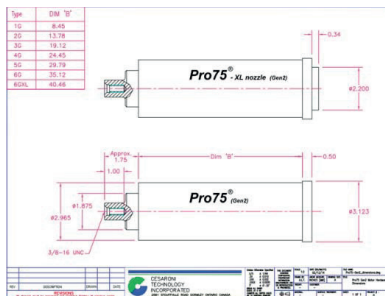
While designing rockets, scientists paid great attention to aerodynamics. They have obtained a number of mathematical theorems and geometric designs for various parts of the rockets. They have developed many programmes to easily create such mathematical theorems and geometries. At the beginning of these programs, [6] they used OpenRocket, an open source software package with an easy user interface, to model a model rocket and simulate the entire flight by using experimental aerodynamics and entering various geometric properties of the rocket. When modelling is performed, it must be performed within a system. While modelling, the design should be started to obtain the desired data in line with the objectives. The materials selected for rockets should consist of high quality materials that are resistant to high energy that will occur during flight, regardless of other products. The high quality and durable materials to be selected include issues such as certain geometric limits and fluid mechanics. While designing, the rocket engine to be used is determined first. The biggest reason for this is the in-rocket product that will determine the C_g (centre of gravity) and C_p (centre of pressure) of the rocket. All the remaining rocket parameters are presented below accordingly.

2.1.1. ROCKET ENGINE

In this study, the 8429-M2020-IM-P type rocket engine of Cesaroni Technology Incorporated, which is a solid rocket engine in OpenRocket, was selected. By selecting this engine, the study was carried out and appropriate data were obtained with the engine. The technical drawing information of the rocket motor used for the rocket to be analysed is shown in Figure 1. Figure 2 shows the values of the rocket engine. The table shows the dry weight, average acceleration, combustion time, empty weight and impulse values of the engine [7]. The thrust time graph of the rocket engine used in the rocket study is shown in Figure 3. From here, the second-dependent flight performance thrust of the rocket engine is seen. The maximum thrust of the rocket engine is 2640N and the fuel combustion time is 4.17 seconds [8].

Figure 1 Technical drawing of the motor

Figure 2. Values table of the rocket engine



Total impulse:	8429 Ns (65% M)
Avg. thrust:	2021 N
Max. thrust:	2649 N
Burn time:	4,17 s
Launch mass:	7032 g
Empty mass:	2683 g
Data points:	30

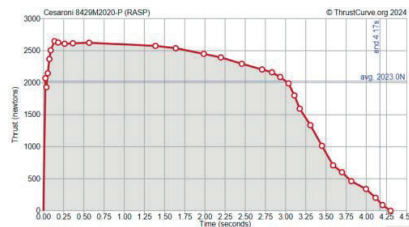


Figure 3. Thrust-time graph chart

Rocket design was made in accordance with the determined rocket engine. The stages of critical parameters for the design are presented below accordingly.

2.1.2. ROCKET BALANCE AND FINS

When designing a model rocket, one of the most important issues for stable flight is fin design. If the wing designs are designed without adhering to the correct parameters, the desired stable flight performance will not be achieved. As a result, model rockets can go out of the targeted trajectory [9]. When designing rockets, the static margin value must be calculated to a certain extent. Static margin is one of the most critical design parameters for stable flight of rockets. If the static margin of a rocket is not at the desired values, this situation can be corrected by designing the correct fins. There are two key points in model rocketry: the centre of pressure and the centre of gravity. The centre of pressure is where all compression forces are concentrated and where drag and lift act. The centre of gravity is the sum of the gravitational forces acting on all the products in the rocket. The static margin is the region where the centre of gravity and centre of pressure are concentrated and where all forces are concentrated. In order for the static margin to cause a stable flight, the rocket centre of gravity must be above

the rocket centre of pressure [10]. In order for the centre of gravity and centre of pressure to reach the desired data, the most suitable product to be used in model rockets are fins. The static margin shown in Figure 4 is calculated with reference to the main body. The equation is obtained by the ratio of the distance between the centre of gravity (C_g) and the centre of pressure (C_p) to the body diameter of the rocket [11]. In this study, design calculations were made to keep the wing geometry static margin value between 2-2.5 for a stable flight.

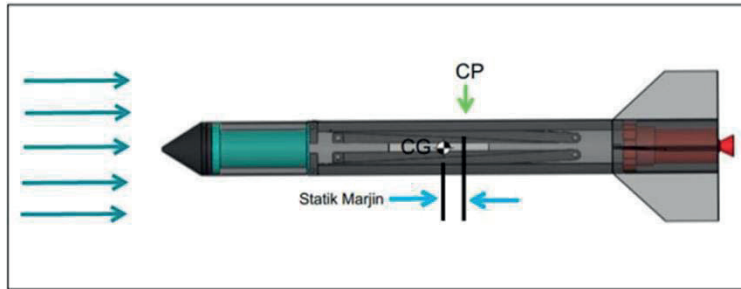


Figure4. Static margin

$$\text{Statik Marjin} = \frac{cg - cp}{\text{roketin çapı}}$$

For the rocket study, 3 fins were preferred. The reason for this is the number of fins that gives the most suitable static margin value for the designed rocket. Figure 5 shows the fin geometries mostly used in model rockets.

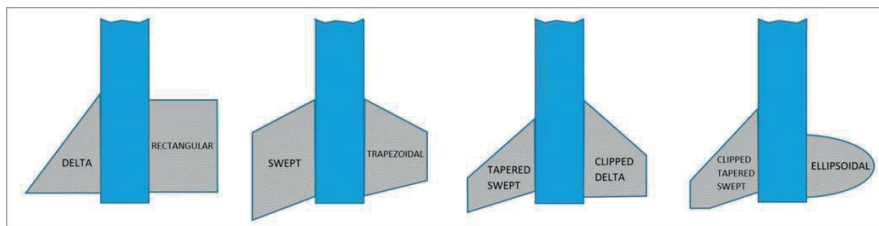


Figure5. Wing Models Used in Model Rockets

The designed rocket wing was chosen as a truncated delta wing model. Figure 6 shows the 2D drawing of the fin used in the designed model rocket. After the designed rocket fin is designed in the 3D design programme, it is assembled to the rocket with the help of the clamps inside the rocket. The mounting of the rocket fin to the clamps is shown in Figure7. Rocket fins and clamps were assembled to the rocket engine area through the channels opened on the rocket engine area and assembled as shown in Figure 8.

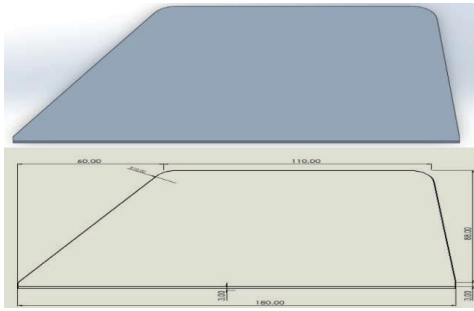


Figure6. Designed wing and technical drawing

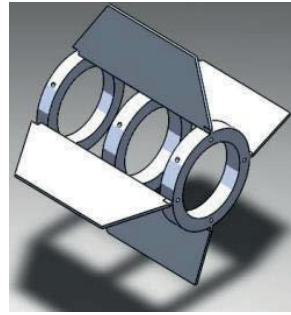


Figure 7. Wing clamp assembly

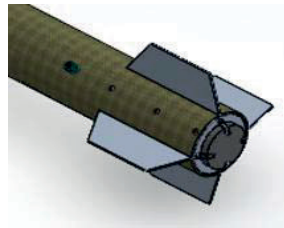


Figure8. 3D view of the assembled winglets

2.1.3. NOSE CONE

A nose cone is a cone-shaped part used in rockets to reduce aerodynamic resistance [12]. There are oval, elliptical, parabolic, etc. nose cone shapes. Figure 9 shows the nose cone geometries generally used in rockets [13].

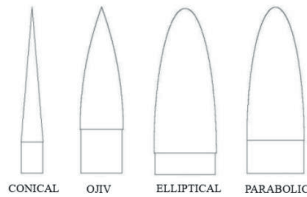


Figure 9. Commonly used nose cone shapes in rockets

The general dimensions of the defined nose cone shape can be defined as in figure 10.

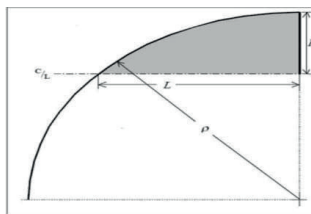


Figure10. Ojiv nose cone geometry

The tangent figure consists of a circle segment. The nose cone is a model formed by intersecting the drawn circle segment with a specific tangent [14].

$$\rho = \frac{R^2 + L^2}{2R} = \frac{58^2 + 500^2}{116} = 2.184,17\text{mm}$$

The symbol marked with R is called the radius of the ogive. L must be equal to at most R or less than R, otherwise the shape will be hemispherical. The length of the nose cone should be approximately 1/3 of the body (part of it). For this, a size of 50cm has been determined here so that our rocket length is not too long (This length has been made so that the rocket engine, rocket internal statics are optimally small and light in terms of the material used). We determine our rocket diameter by looking at our rocket motor diameter, which is approximately Ø>10. From here, by adding our diameter to the rocket internal materials, a diameter of 12.6 cm was determined. With the result calculated above, the nose cone was neither fully parabolic nor round, this design criterion was calculated in this way in this rocket. By making an optimum aerodynamic selection, the nose cone part of the rocket design parameters was selected in this way.

2.1.4. COMPARISON OF THE DESIGNED ROCKET WITH OPENROCKET AND OBTAINED OPENROCKET OUTPUTS

One of the important issues in model rocket studies is the comparison of the modelled rocket with the CAD design. The main reason for this is that the dimensions of the materials to be used in the superficially designed rocket interior design are drawn from the CAD program and compared with the modelling program. According to the analysis of the modelled rocket using the OpenRocket analysis program, the stability value obtained was calculated as 2.1. The maximum altitude reached is 3006m. The maximum speed reached by the rocket was calculated as 254m/s, i.e. (0.75 mach). The maximum altitude obtained was observed as 82m/s². The comparison of the drawings of the modelled rocket and the rocket designed in CAD environment is presented below Figure 11.

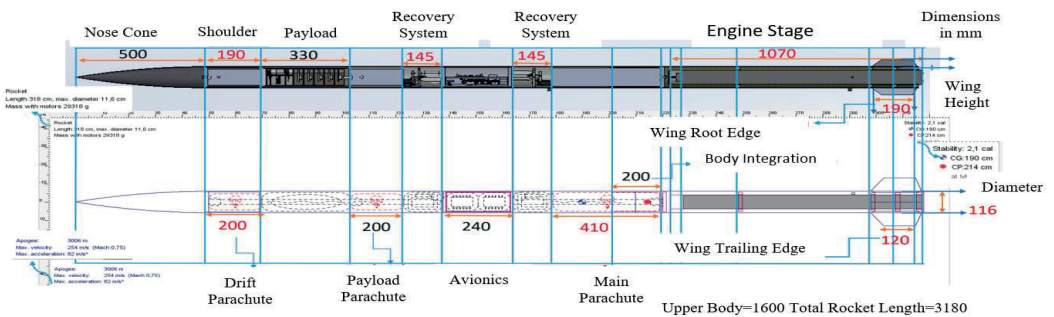


Figure 11. Solid Modelling of the Designed Rocket with OpenRocket

CAD drawings of the designed model rocket were made in accordance with the parameters used. Flow analyses are presented below in accordance with the rocket.

2.2. AERODYNAMIC ANALYSIS

Aerodynamics is the interaction of moving solids with air. In this study, an artificial wind turbine was created on the OpenFoam flow analysis program by creating real world conditions

on the Ubuntu program, which is an open source software program for the designed rocket, and an aerodynamic flow analysis simulation was designed by placing the rocket inside. The mesh process of the rocket, whose flow analysis was performed on OpenFoam, was controlled through the Salome program, and the ParaView program was used to animate the rocket. As a result of the study, data from the rocket analysis C_l (Lift force - time), C_m (Momentum - time) and C_d (Friction force - time) graphs as well as velocity, pressure and temperature analyses are given in ParaView program. In the study, firstly, the rocket was meshed with the Snappyhex Mesh command through the OpenFoam program. Mesh outputs were obtained with the CheckMesh command, the number and quality of the mesh thrown on the rocket are as shown in Figure12.

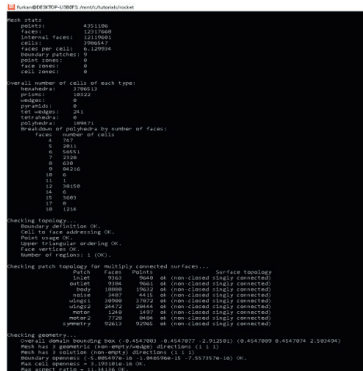


Figure12. Number and quality of meshes on the rocket

In the study, 9,989,547 meshes were applied on the rocket, generally hexagonal faceted mesh was used while meshing. The number of hexagonal faceted meshes is seen as 3,786,519. This mesh modeling was used because it is the most suitable method for the designed rocket. This analysis was done with the help of RAS (Reynolds Averaged Simulation) in rhoPimpleFoam, one of the tutorials of OpenFoam program.

3. RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION

When scientists work on flow analysis, they work within a number of important issues. In many aerodynamic problems, the following forces are important forces of flight: lift, drag, weight and pitch. Of these, lift and drag are aerodynamic forces. That is, they are the forces generated by the air flow on a solid object. To calculate these units, calculations are made assuming that the air flow is continuous. Continuity is defined in units such as flow fields, velocity, pressure, density and temperature. These properties are measured directly or indirectly in aerodynamic experiments from conservation of mass, conservation of momentum and energy in the airflow. Density; velocity and the additional property of viscosity are used to classify flow fields [15]. In this study, velocity, pressure and temperature profiles were created for the rocket by placing the model rocket in an artificial turbine. The velocity profile of the analyzed rocket is shown in Figure 13.

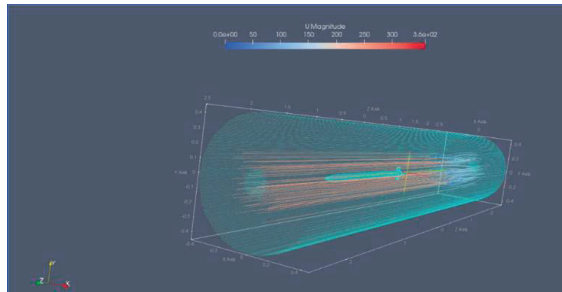


Figure13. Rocket velocity profile

As can be seen from the velocity profile examined, the turbulence model increases gradually according to the flow direction as it moves away from the rocket and the velocity profile obtained is within the velocity values in the OpenRocket program data outputs. Figure14 shows the pressure profile of the rocket.

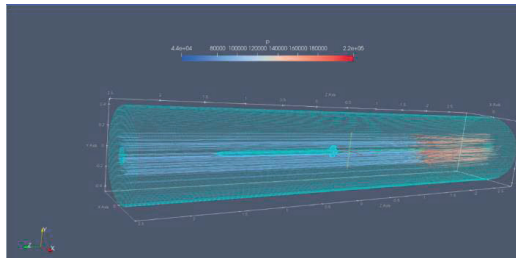


Figure14. Rocket pressure profile

Figure15 shows the temperature profile of the rocket. According to the data observed here, improvements are made in the materials used in rockets and more suitable material preferences are made.

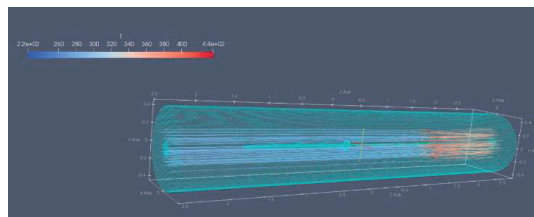


Figure15. Temperature Profile for Rocket

The C_d (Friction force-time) graph obtained as a result of the data output of the velocity, pressure and temperature profiles in the rocket study is presented as in Figure 16. Figure 16 shows the time graph of the friction force, in the case where the rocket is at a maximum speed of 254m/s (0.75 mach), the C_d coefficient is 0.4829 in the region formed. As a result of the analysis as in Figure 17, C_l (Lift force-time) data output of the rocket was obtained. As a result of the flow analysis output to the rocket, the maximum lift force obtained in the graph was observed at approximately +0.06 and -0.06 levels. The last graph obtained in the flow analysis is the C_m (Momentum-time) graph. It is given in Figure 18. As seen in Figure 18, the maximum and minimum amounts obtained were found to be +0.023 and -0.017.

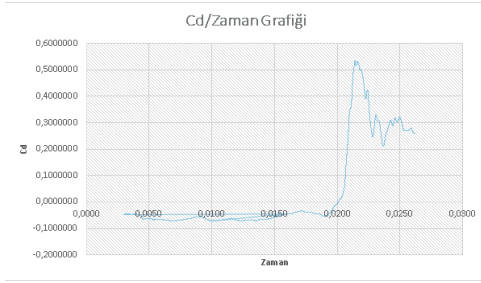


Figure 16. C_d (Friction force-time)

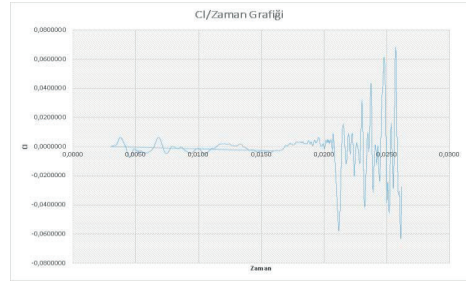


Figure 17. C_l (Lifting force - time) graph

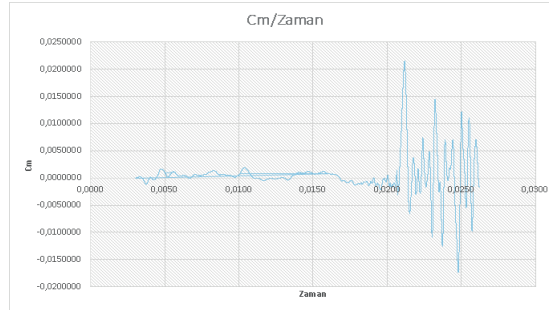


Figure 18. C_m (Momentum-time) graph

Based on previous studies, we can say that the data obtained as a result of rocket flow analysis is more detailed and accurate than the analysis in the OpenRocket pragma [16-17-18]. The most important condition for this analysis to occur is the conditions created, the way the entered data is placed in the analysis and the correct progress of the values; in the analysis performed, it was determined that the data to be obtained if the air temperature, wind direction, altitude and speed levels that the rocket will reach in the time interval in the region selected for analysis are determined and placed in the program are correct. However, in case of a possible incorrect data entry, it can be observed that the data to be obtained will be incorrect if the program does not terminate.

4. CONCLUSION

The data outputs obtained consisted of mathematical, graphical and visuals. In the light of the data obtained; C_d , C_m , C_l data as well as U (velocity profile), P (pressure profile) and T (temperature profile) data of the rocket were visually observed on the ruler. The values of these data show that the C_d coefficient is 0.4829. C_l (Lift force-time) was observed to reach values of approximately +0.06 and -0.06. In the C_m (Momentum-time) graph, +0.023 and -0.017 levels were observed as a result of the data. The data obtained as a result of this study were accepted as correct based on other studies. The aim of this study is to use it in the flow analysis studies to be carried out for rockets, which is one of the domestic and national technology and defense tools of our country, and an open source tutorial has been prepared for the OpenFoam program for the rockets they will model and design for engineers who will work in the field of aerospace and aviation, and they will be able to perform the flow analysis of their own rockets with the maintenance and changes they will make here. This study was conducted for this purpose.

5. REFERENCES

- [1] Gumbel, J. (2001). Aerodynamic influences on atmospheric in situ measurements from sounding rockets. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A6), 10553–10563
- [2] Krzysiak, A., Cieśliński, D., Placek, R., & Kekus, P. (2023). Experimental study of the boosters impact on the rocket aerodynamic characteristics. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95(2), 193–200. <https://doi.org/10.1108/AEAT-01-2022-0025/FULL/PDF>
- [3] Sagliano, M., Heidecker, A., Hernández, J. M., Fari, S., Schlotterer, M., Woicke, S., Seelbinder, D., & Dumont, E. (2021). Onboard guidance for reusable rockets: Aerodynamic descent and powered landing. *AIAA Scitech 2021 Forum*, 1–35. <https://doi.org/10.2514/6.2021-0862>
- [4] Inatomi, A., Kitamura, K., & Nonaka, S. (2019). Advance published date. *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, 17(4), 439–446. <https://doi.org/10.2322/tastj.17.439>
- [5] López, D., Domínguez, D., & Gonzalo, J. (2013). Impact of turbulence modelling on external supersonic flow field simulations in rocket aerodynamics. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 27(8–10), 332–341. <https://doi.org/10.1080/10618562.2013.867951>
- [6] Brown, W., Wiesneth, M., Faust, T., Huynh, N., Montalvo, C., Lino, K., & Tindell, A. (2018). Measured and simulated analysis of a model rocket. <https://doi.org/10.1177/0954410017752730>, 233(4), 1397–1411. <https://doi.org/10.1177/0954410017752730>
- [7] CESARONI, 2011-2013 Web: http://www.pro38.com/pdfs/Pro75_dimensions.pdf
- [8] CESARONI, 2024, Web: <https://www.thrustcurve.org/motors/Cesaroni/8429M2020-P/>
- [9] Haciabdullahoglu, U., Hava, T., Üniversitesi, K., Pektaş, A., Demircan, Z., Haciabdullahoğlu, Ü., Ejder, N., & Tola, C. (n.d.). Effects of Different Fin Shapes on Apogee and Stability of Model Rockets Nurdan Ejder Zeren Demircan Effects of Different Fin Shapes on Apogee and Stability of Model Rockets. <https://doi.org/10.1109/RAST.2019.8767439>
- [10] Abate, M., Anandapadmanaban, E., Bao, L., Challani, S., Gaughan, J., Jiang, A., Lingineni, A., Vora, A., Yang, C., Zhao, D., Murawski, R., & Zorn, S. E. (n.d.). *CORRELATION BETWEEN SIMULATED, CALCULATED, AND MEASURED MODEL ROCKET FLIGHT*
- [11] MODEL ROKET, 2020 Web: <https://modelroket.com/model-rokette-neden-kanatcik-kullaniyoruz/>
- [12] WIKIPEDIA, 2020 Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Nose_cone
- [13] OKTANYUMROKET, 2014, Web: http://www.oktanyumroket.com/yapim/burun/burun_konisi.html
- [14] CFD ANALYSIS OF DRAG FORCE FOR DIFFERENT NOSE CONE DESIGN, 2024 Web: https://www.researchgate.net/publication/336345689_CFD_analysis_of_drag_force_for_differen_t_nose_cone_design
- [15] WIKIPEDIAAERODYNAMICS, 2019 Web: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aerodynamics>
- [16] Shyy, W., Papila, N., Vaidyanathan, R., & Tucker, K. (2001). Global design optimization for aerodynamics and rocket propulsion components. *Progress in Aerospace Sciences*, 37(1), 59–118. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(01\)00002-1](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(01)00002-1)
- [17] Sagliano, M., Heidecker, A., Hernández, J. M., Fari, S., Schlotterer, M., Woicke, S., Seelbinder, D., & Dumont, E. (2021). Onboard guidance for reusable rockets: Aerodynamic descent and powered landing. *AIAA Scitech 2021 Forum*, 1–35. <https://doi.org/10.2514/6.2021-0862>
- [18] Jr., A. E. B., & ROSS, S. E. (2012). Optimum Rocket Trajectories With Aerodynamic Drag. <https://doi.org/10.2514/8.7355>, 28(7), 465–469. <https://doi.org/10.2514/8.7355>

SIGURNOST I ODRŽAVANJE INDUSTRIJSKIH ROBOTA U PROCESU INKREMENTALNOG OBLIKOVANJA LIMOVA

SAFETY AND MAINTENANCE OF INDUSTRIAL ROBOTS IN THE PROCESS OF INCREMENTAL SHEET FORMING

v.prof.dr. Ibrahim Plančić
r.prof.dr. Malik Čabaravdić
Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici
Fakultetska 1, Zenica, BiH

REZIME

Industrijski roboti su bitni elementi današnjih automatiziranih proizvodnih sistema. Njihova upotreba značajno doprinosi povećanju produktivnosti sistema i ujednačavanju i poboljšanju kvaliteta proizvoda.

Inkrementalno oblikovanje tankih limova je tehnologija koja se javlja tek početkom prošlog vijeka. Njen daljnji razvoj omogućen je prije svega razvojem i korištenjem računarski kontrolisanih obradnih mašina, a potom i robota za izradu složenijih i mnogostruko kvalitetnijih proizvoda u malim serijama i za potrebe brze izrade prototipova.

Da bi jedan robotski sistem za inkrementalno oblikovanje limova pravilno funkcionisao potrebno je posebnu pažnju posvetiti njegovom pravilnom održavanju, kao i sigurnosti radnih mjesta koja opslužuju roboti, čime se sprečavaju kolizije u radu koje mogu dovesti do opasnih povreda radnika ili do oštećenja samog robota.

Analiza primjene industrijskih robota kod inkrementalnog oblikovanja limova, kao i mjere koje se poduzimaju za održavanje i sigurnost robotskih sistema u navedenom procesu su glavne teme ovog rada.

Ključne riječi: sigurnost, održavanje, industrijski roboti, inkrementalno oblikovanje limova

ABSTRACT

Industrial robots are essential elements of today's automated production systems. Their use significantly contributes to increasing the productivity of the system and to the improvement of product quality and uniformity.

Incremental forming of thin sheets is a technology that appeared only at the beginning of the last century. Its further development was made possible first of all by the development and use of computer-controlled processing machines, and then by robots for the production of more complex products with increased quality in small batches and for the needs of rapid prototyping.

For an appropriate function of robotic system for incremental sheet metal forming, it is necessary to pay special attention to its proper maintenance, as well as to the safety of workplaces served by robots, thus preventing collisions during work that can lead to dangerous injuries to workers or damage to the robot itself.

The analysis of the use of industrial robots in incremental sheet metal forming, as well as the measures taken for the maintenance and safety of robotic systems in the mentioned process, are the main topics of this work.

Key words: safety, maintenance, industrial robots, incremental sheet metal forming

1. UVOD – ZNAČAJ INKREMENTALNOG OBLIKOVANJA LIMOVA

Industrija i tržište u posljednjih desetak godina pokazuju trend ka sve većoj prilagodbi proizvoda. Povezano povećanje broja varijanti i kraći životni ciklus proizvoda zahtijevaju veću brzinu i fleksibilnost u razvoju proizvoda [1, 2]. Dok se prelaz sa masovne proizvodnje na varijantnu proizvodnju dogodio u prošlom vijeku, ekonomska proizvodnja pojedinačnih proizvoda (veličina serije 1) je zadatak koji treba riješiti u budućnosti [3]. Kao rezultat toga, potreban je kontinuirani razvoj inovativnih proizvodnih sistema da bi se ispunili ovi zahtjevi [1].

Posebno u oblasti oblikovanja lima, postoji veliki potencijal za poboljšanje u pogledu ekonomične i brze proizvodnje komponenti u malim količinama, kao što su male serije ili prototipovi. Klasični procesi oblikovanja (npr. duboko izvlačenje) rezultiraju niskim nivoom fleksibilnosti zbog upotrebe masivnih i specifičnih alata za radni komad za geometrijski različite radne komade i prototipove, što se odražava u većim troškovima i dodatnom potrebnom vremenu za izradu. Stoga su posljednjih godina intenzivirana istraživanja inkrementalnih procesa oblikovanja lima, koji imaju potencijal za fleksibilniju proizvodnju. Inkrementalno oblikovanje lima karakteriziraju prostorno ograničene deformacije koje se ponavljaju postepeno formirajući oblik, što omogućava korištenje alata koji su neovisni o geometriji proizvoda. Osim toga, ove lokalno ograničene zone oblikovanja nude, u odnosu na klasične procese, prednost da su potrebne znatno manje procesne sile. Kao rezultat vrlo male dodirne površine alata za oblikovanje sa limom koji se obrađuje, za pomicanje alata često se koriste CNC mašine ili industrijski roboti, koji se odlikuju fleksibilno programabilnim putanjama kretanja. [1, 4]

Iz tog razloga je u posljednjoj deceniji razvijen novi proces za istraživanje u oblasti inkrementalnog oblikovanja lima, tzv. **roboforming**. Uz pomoć dva suprotstavljena šestoosna robota za teška opterećenja, dijelovi se formiraju od limene ploče pričvršćene okomito između njih u fiksni okvir. Alati potrebni za to su pričvršćeni na krajeve obje robotske ruke koje se pomiču na sinhroniziran način, zajednički deformirajući lim s obje strane. [5]

2. ROBOFORMING RADNA STANICA

Za izvođenje procesa inkrementalnog oblikovanja kao i za dalja istraživanja formirana je radna stanica (Institut LPS, Ruhr Univerzitet Bochum, Njemačka) koja je data na slici 1 [6, 7]. Industrijski roboti velike nosivosti, mjerni uređaji i drugi inventar potreban za oblikovanje smješteni su u ovom sistemu unutar ograde koja je pričvršćena iz sigurnosnih razloga. U radnoj stanici se nalaze dva robota KUKA KR600 i dva robota KUKA KR360 (vidjeti 1 i 2 na slici 1) a proces oblikovanja se može vršiti na oba radna mjesta, nezavisno jedan od drugog.

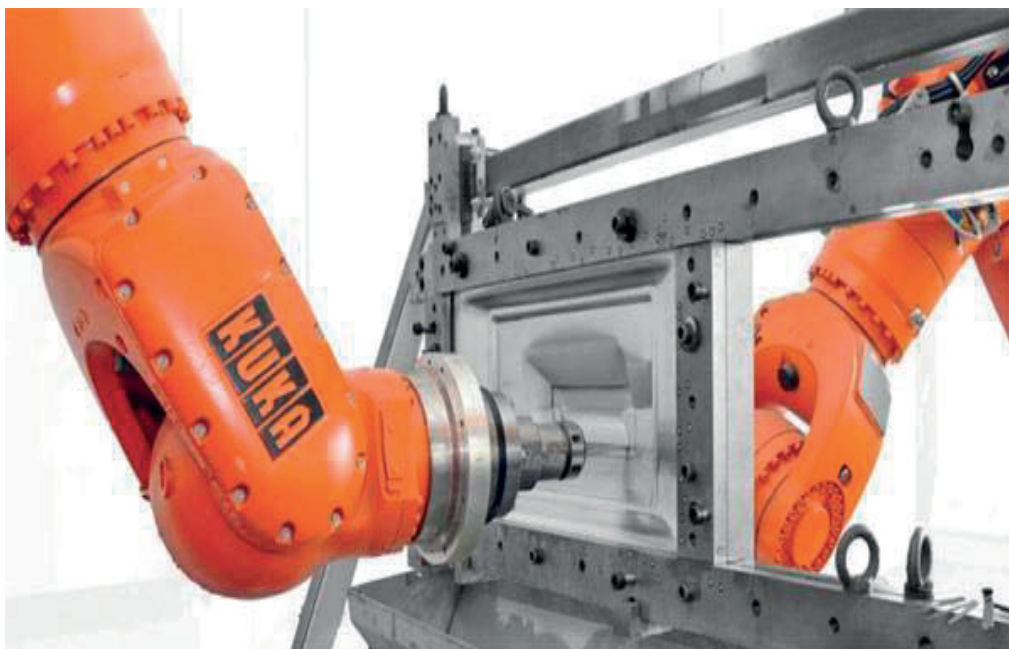
Za proces roboforminga, dva KUKA robota velike nosivosti su umrežena u takozvani KUKA RoboTeam. Ovo omogućava robotima da izvode kooperativno oblikovanje tokom proizvodnog procesa kroz sinhronu pokrete. Jedan od dva robota preuzima aktivno oblikovanje lima i zove se master. Zadatak podrške obavlja drugi robot, koji se zove slave.



Slika 1. Roboforming radna ćelija [6]

Dva robota KUKA KR600 imaju odgovarajuće alate za oblikovanje lima, koji su pričvršćeni na prirubnicu, a između njih je pozicioniran FT-NET Omega191 senzor sile/momenta firme SCHUNK GmbH & Co. KG. Lim koji treba oblikovati je fiksiran u steznom okviru (označen brojem 5 na slici 1), koji je pričvršćen za pod između dva industrijska robota i nalazi se otprilike na polovini udaljenosti između dva robota. U radnoj stanici na slici dva robota KR600 se nalaze na udaljenosti od 2262 mm od stegnutog limenog obratka sa bočnim pomakom od 628 mm od sredine prozora okvira. Time se sprečavaju moguće singularnosti robota tokom izvršavanja pokreta. Sam stezni okvir zahvaljujući svojoj konstrukciji omogućava fiksiranje limaova različitih veličina koje mogu biti u rasponu od 220 mm x 220 mm do 1500 mm x 600 mm. Slika 2 prikazuje strukturu steznog okvira i alat za oblikovanje kojeg nosi robot ispred njega.

Radna ćelija takođe sadrži KR C4 kontrolere povezane sa robotima kablom (3 i 4 na slici 1). U radnoj ćeliji se nalazi i ručni uređaj za programiranje (broj 6 na slici 1). Svi ovi uređaji su ograđeni pomenutom sigurnosnom ogradom (broj 7 na slici 1) koja ima dvojna ulazna vrata i svi ovi uređaji su dio ćelije za roboforming. Računar za kontrolu procesa koji se koristi za kompenzaciju krutosti i kontrolu sile pozicioniran je izvan ćelije. Proces roboforminga je ilustrovan na slici 2.



Slika 2. Roboforming proces [8]

3. ODRŽAVANJE ROBOTSKIH SISTEMA ZA PROCES ROBOFORMINGA

Radno mjesto industrijskog robota u procesu inkrementalnog oblikovanja limova je izloženo raznim štetnim uticajima. Prije svega se tu misli na visoke temperature u procesu obrade, uticaj sredstava za podmazivanje i hlađenje. Svim ovim uticajima je posebno izložen završni mehanizam robota, ali se taj uticaj u velikoj mjeri prenosi i na preostalu mehaničku konstrukciju manipulatora. Zbog toga, da bi robotski sistem uprkos negativnim uticajima okoline mogao efikasno vršiti svoju funkciju u dužem vremenskom periodu, potrebno je veliku pažnju posvetiti njegovom održavanju i zaštiti.

Kod velikih robotskih sistema, koji su duži vremenski period u upotrebi se uglavnom provodi preventivno održavanje. Služba održavanja proizvođača robota obično vrši ovu vrstu održavanja i to prema ugovoru o održavanju koji se sklapa prilikom nabavke robotskog sistema. Terenski radnici firme koja proizvodi robote obilaze u dogovorenim vremenskim intervalima robotsko postrojenje i provode redovne mjere održavanja kao što su čišćenje nepristupačnih dijelova, različita podmazivanja ili promjene ulja kod dijelova koji su podložni trenju, zamjena baterija kod upravljačkih jedinica itd.

U velikom broju slučajeva se servis, odnosno zamjena pojedinih dijelova robotskog sistema vrši tek nakon kvara tih dijelova. To ponekad može dovesti do višesatnog ili višednevnog zastoja u proizvodnji, što u slučaju velikih serija izaziva velike gubitke. Zbog toga proizvođači robota preporučuju standardne vremenske intervale za zamjenu pojedinih dijelova da ne bi dolazilo do neočekivanih zastoja u proizvodnji.

Industrijski roboti su sofisticirani tehnički sistemi, koji vremenom postaju sve kompleksniji i opremljeni sve većim brojem dodataka, kao što su različiti senzori i hvataljke, da bi mogli izvršavati sve kompleksnije proizvodne operacije. Da bi neko preduzeće moglo proizvoditi visokokvalitetne proizvode i pri tome povećati svoju efikasnost, neophodno je da tehnička

oprema koju koriste, uključujući tu i robote, bude pouzdana. Zbog toga je efikasno održavanje tehničke opreme veoma bitan faktor opstanka jednog preduzeća na tržištu [9].

Da bi osvojili tržište proizvođači industrijskih robota posebnu pažnju poklanjaju pouzdanosti svojih proizvoda i što lakšem održavanju istih. Zbog toga se u samoj konstrukciji industrijskih robota vodi računa o tome da njihovo održavanje bude što lakše i da ne oduzima puno vremena. Neke od konstruktivnih mjera koje primjenjuju vodeći proizvođači industrijskih robota, a koje im dozvoljavaju savremena tehnička rješenja su [11]:

- potpuna izolacija elektroničkih dijelova vezanih za upravljanje robotom. Na taj način se ovi osjetljivi dijelovi štite od raznih nepoželjnih uticaja sredine,
- elektromotori koji se koriste za pogon pojedinih osa robota se na današnjem stepenu razvoja tehnike izrađuju tako da je potrebno njihovo minimalno ili nikakvo održavanje,
- za podmazivanje glavnih prenosnika se redovno koristi ulje ili mast za podmazivanje,
- kablovi su dobro zaštićeni vođicama i mogu se po potrebi vrlo lako zamijeniti.

Pored ovih klasičnih konstrukcionih rješenja, za održavanje robota se sve više koriste i savremena rješenja vezana za upotrebu različitih senzora kojima se mjere određene karakteristične veličine kod pojedinih dijelova i daju signal upravljačkom sistemu kada je potrebno izvršiti zamjenu nekog od dijelova. Tako se npr. na osnovu stalnog preciznog mjerenja dimenzija dijela izloženog trenju i trošenju u toku rada može utvrditi kada taj dio dostiže kritičnu vrijednost trošenja i upravljačkoj jedinici, odnosno korisniku robota se šalje upozoravajući signal da dio treba izmijeniti. U novije vrijeme se pravi i software koji na bazi podataka sa raznih senzora koji se nalaze robotskoj ćeliji uz pomoć statističke analize određuju kada je potrebno izvršiti zamjenu potrošnih dijelova robota. Najčešće se ovdje koriste unutrašnji senzori robota, koji mjere brzinu i opterećenje pojedinih osa robota, ali i vanjski senzori koji mjere fizičke uticaje na samom radnom mjestu, npr. temperaturu ili vlažnost, koji mogu uticati na životni vijek pojedinih dijelova robota.

Sa razvojem informacionih tehnologija, svi podaci se senzora se efikasno putem interneta mogu preneti direktno do proizvođača ili ovlaštene službe za održavanje. Na osnovu tih podataka koji su dostupni u svakom trenutku službe mogu obavijestiti krajnjeg korisnika o neophodnosti održavanja sistema i zamjeni određenih dijelova.

Sve ove nabrojane mjere održavanja jednog robotskog postrojenja u velikoj mjeri doprinose pouzdanosti rada istog i znatno smanjuju gubitke u proizvodnji nastale iznenadnim prekidima rada usljed kvarova.

4. SIGURNOST RADNIH MJESTA ZA PROCES ROBOFORMINGA

Kao što je već opisano, roboti koji se koriste kod inkrementalnog oblikovanja limova moraju ostvariti velike kontaktne sile, da bi proces mogao biti izvršen. Zato se roboti korišteni za ove operacije moraju odlikovati velikim dimenzijama i velikom nosivošću (i do 5 kN), pri čemu se završni mehanizam može kretati veoma velikom brzinom. Zbog toga može doći do veoma opasnih situacija ukoliko se čovjek nađe u radnom području robota za vrijeme automatskog izvođenja operacija, pri čemu u slučaju kolizije može doći do teških i po život opasnih povreda.

Da bi se to izbjeglo u konstrukciji i opsluživanju robota moraju se poštovati norme vezane za sigurnost robotizovanih radnih mjesta. Neka od pravila propisanih tim normama odnose se na sljedeće [12]:

- svaki robotski sistem mora biti opremljen sigurnosnim sistemom koji je zadužen za osmatranje ispravne funkcije robota. Ako se primijeti bilo kakva nepravilnost u radu, motori pojedinih osa se isključuju, a uključuju se sigurnosne kočnice,
- robot može raditi u manuelnom i automatskom modu. U manuelnom modu robot može biti opsluživan samo uz pomoć ručnog programatora, a nikako uz pomoć vanjskih uređaja,
- u manuelnom modu se znatno smanjuje dozvoljena brzina pokretanja robota,
- na ručnom programatoru se nalazi taster za potvrdu kretanja, koji prilikom programiranja (u manuelnom modu) mora biti pritisnut da bi se robot uopšte mogao pokrenuti,
- ručni programator i vanjska upravljačka jedinica su opremljene tasterima za slučaj opasnosti. Pritiskom na neki od ovih tastera se automatski prekida kretanje robota,
- robotizovana radna mjesta moraju biti ograđena da bi se spriječio neželjeni pristup u toku automatskog izvršavanja programa,
- svako robotizovano radno mjesto mora ispunjavati norme zaštite od požara.

U opisanom robotiziranom radnom mjestu za inkrementalno oblikovanje limova postoji naročito velika opasnost od povreda, pa su u njoj ugrađeni dodatni sigurnosni uređaji u vidu svjetlosnih senzora koji mogu detektovati prisustvo čovjeka u radnoj ćeliji za vrijeme izvršavanja programa. U tom slučaju senzori daju signal upravljačkoj jedinici za zaustavljanje kretanja robota. Karakteristični su i senzori na vratima radne ćelije, koji ne dozvoljavaju automatsko pokretanje programa sve dok vrata nisu zatvorena.

5. ZAKLJUČAK

Inkrementalno oblikovanje je tehnologija oblikovanja limova kojom se dobijaju složene geometrijske forme proizvoda visokog kvaliteta.

Ovu tehnologiju karakterizira korištenje alata koji su neovisni o geometriji proizvoda. Kao rezultat vrlo male dodirne površine alata za oblikovanje sa limom koji se obrađuje, za pomicanje alata često se koriste CNC mašine ili industrijski roboti, koji se odlikuju fleksibilno programabilnim putanjama kretanja. To u značajnoj mjeri doprinosi osiguravanju visokog kvaliteta hladno oblikovanih proizvoda iz lima u domenu izrade prototipova, pojedinačne i maloserijske proizvodnje za potrebe jako zahtjevnih industrijskih grana i medicine.

Industrijski roboti, kao izuzetno fleksibilni uređaji, imaju vrlo značajno mjesto u automatizaciji proizvodnih operacija. Da bi jedan robotski sistem u proizvodnim procesima kao što je inkrementalno oblikovanje limova pravilno i pouzdano funkcionisao potrebno je veliku pažnju posvetiti njegovom održavanju i sigurnosti.

Moderni senzorski i upravljački sistemi znatno doprinose efikasnosti održavanja robota tako da se uz pomoć podataka tih sistema i savremenih algoritama na bazi statistike može predvidjeti vijek trajanja pojedinih dijelova robota, te se ti dijelovi mogu na vrijeme zamijeniti. Na taj način se sprečavaju neželjeni prekidi proizvodnje usljed kvara na robotskom sistemu.

Kako se u radnoj ćeliji za inkrementalno oblikovanje limova nalaze industrijski roboti velike nosivosti koji su u stanju razviti vrlo velike kontaktne sile (i do 5kN), posebna pažnja se mora posvetiti sigurnosti ovakvih sistema. Senzorski sistemi novije generacije doprinose i povećanoj sigurnosti robotizovanih radnih mjesta, pošto se pomoću njih mogu utvrditi eventualne greške u radu robota, kao i prisustvo čovjeka u robotskoj ćeliji, čime se mogu spriječiti neželjene povrede na radu.

6. REFERENCE

- [1]. [Meier, H., Smukala, V., Buff, B. (2008), *Roboterbasierte inkrementelle Blechumformung: Bauteilgenauigkeitssteigerung in einem automatisierten industriellen Gesamtkonzept*, wt Werkstatttechnik online (98) H. 10, pp. 831-836.
- [2]. Groche, P., Kraft, M., Schmitt, S. O., Lorenz, U., Pokutta, S., Martin, A., Ziems, N. (2010), *Rechnet sich Flexibilität in der Umformtechnik?: Ein wirtschaftlicher Vergleich konventioneller und flexibler Umformanlagen*, wt Werkstatttechnik online (100) H. 10, pp. 734-742.
- [3]. Uhlmann, E. (2013), *Wandel der Fabrik durch Produktindividualisierung*, Marktchance Individualisierung. Softcover reprint of the hardcover 1. ed., Gunther Reinhart; Michael F. Zäh (Hrsg.). Berlin: Springer, pp. 119-127.
- [4]. Kreimeier, D., Smukala, V., Magnus, C., Buff, B., Zhu, J. (2010), *Kraftgeregelte Umformung im Roboforming: Einfluss auf Bauteilgenauigkeit, Oberflächenqualität und multimodale Geometrien*, wt Werkstatttechnik online (100) H. 10, pp. 772-778.
- [5]. Ruhr-Universität Bochum Lehrstuhl für Produktionssysteme (2010) *"Roboforming" - Roboterbasierte Blechumformung komplexer Bauteile in kleinen Stückzahlen*, Abschlussbericht des Verbundprojektes.
- [6]. Gorlas, T.: *Entwicklung einer Steifigkeitskompensation für die roboterbasierte inkrementelle Blechumformung*. Masterarbeit. RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM, 2020
- [7]. Cabaravdic, M., Möllensiep, D., Hypki, A., Kuhlenkötter, B. (2021), *Analysis of Pressure Force in Robot Supported Sheet Metal Forming*, The 11th International Conference Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering „KOD21“, Novi Sad, Serbia, 10 - 12 June 2021.
- [8]. Störkle, D., Altmann, P., Möllensiep, D., Thyssen, L., Kuhlenkötter, B.: *Automated parameterization of local support at every toolpath point in robot-based incremental sheet forming*, 18th International Conference on Sheet Metal, SHEMET 2019
- [9]. Cabaravdic, M. (2010), *Maintenance and Safety of Robot Systems*. Proceedings of Conference "Maintenance 2010", Zenica.
- [10]. Ibrahim Plančić, Malik Čabaravdić, Edin Begović, *Specifičnosti i uticajni parametri na kvalitet izradaka pri inkrementalnom oblikovanju lima primjenom robota*, 13th Research/Expert Conference with International Participation "QUALITY 2023", Neum, B&H, June 19-21, 2023.
- [11]. ABB Flexible Automation: IRB 4400 Handbücher-Produkthandbuch, (2008).
- [12]. Mitsubishi industrial robot instruction manual, (2001).

ORGANIZATION OF MAINTENANCE AND REPAIR ACTIVITIES IN MINES

MSc mech. Eng. Emir Đulić,
Faculty of Mechanical Engineering,
University of Zenica, Bosnia and
Herzegovina

Amer Neimarlija, mech. Eng.,
Faculty of Mechanical Engineering,
University of Zenica, Bosnia and
Herzegovina

MSc mech. Eng. Faris Hazić,
Faculty of Mechanical Engineering
University of Zenica, Bosnia and
Herzegovina,

SUMMARY

The aim of this paper is to provide an overview of the position of the maintenance service in a complex business system such as a mine and to define the key aspects of overhaul activities in the mining industry. Defining KPIs for overhauls in mines is crucial for improving operational efficiency and resource management. The paper gives general guidelines for overhaul management so that the planning, organization and control of all activities can be carried out more successfully despite all the risks and problems associated with mining.

Keywords: mining, maintenance service, overhaul, organization of maintenance

1. MAINTENANCE DEPARTMENTS IN MINES

The organization of the maintenance department in mines is usually complex due to the specificity of mining activities and high requirements for work safety and equipment reliability. In mines, the maintenance department plays a key role in ensuring production continuity, reducing downtime and costs, and increasing worker and plant safety.

The organization of the maintenance department in mines can basically be divided into the following components:

1. Planning and organization of maintenance

Preventive maintenance: It is planned in advance to prevent breakdowns. It includes regular inspections, replacement of consumable parts and servicing. Corrective maintenance: It is performed after the occurrence of a malfunction. It is focused on getting equipment back up and running quickly to minimize production disruptions. Predictive maintenance: It is based on monitoring the condition of the equipment using sensors and diagnostic tools, thereby predicting failure before it occurs.

2. Organizational structure of the maintenance sector

Director or Head of Maintenance Sector: Responsible for all aspects of maintenance. Maintenance engineers: Maintain technical documentation, monitor machine performance, manage preventive and corrective activities. Technicians and Mechanics: Perform operational tasks, such as repairs, replacement of parts, and routine maintenance. Electricians and specialized technicians: In charge of electrical systems and equipment specific to mining operations (transporters, drilling machines, ventilation systems).

3. Specific services within the maintenance department

Maintenance of mechanical equipment: Includes the care of mobile machines (excavators, loaders) as well as stationary plants. Maintenance of electrical equipment: Care of electrical installations, control systems and sensors. Maintenance of hydraulic and pneumatic systems: Very important due to the presence of machines that function on these principles. Maintenance of IT systems and automation: In charge of monitoring and optimizing systems for remote monitoring and control of mining processes.

4. Management of spare parts and tools

Spare parts warehouse: Ensures the availability of key spare parts for machinery and equipment, thereby reducing downtime. Tools and equipment: The Maintenance Department has separate tools and equipment for different types of interventions to reduce dependence on external suppliers and optimize repair times.

5. Safety at work and training

The maintenance service ensures a high level of safety at work through employee training, implementation of safety procedures and use of protective equipment. Periodic training ensures that all workers are familiar with maintenance procedures, as well as the rules of working in a high-risk mining environment.

6. Use of maintenance software systems

CMMS systems (Computerized Maintenance Management System): Maintenance management programs that help plan, monitor and optimize activities. Data analysis: The frequency of failures and the performance of the equipment are monitored, which enables the optimization of maintenance.

The maintenance technology depends to a great extent on the structural and other features of the system being maintained, but also on the conditions in which the maintenance is carried out. Economic factors have the same influence, which relate to available capacities, productivity, the required speed of performing the maintenance procedure, that is, the required readiness of the technical system. The maintenance technology can be selected for each special case and applied in many different ways. Each solution more or less directly affects the quality of the maintenance system, that is, the convenience of maintenance, readiness and other characteristics of the maintenance process, as well as the maintenance costs and the total costs of the achieved effectiveness. The choice of maintenance technology is one of the important stages in the design of the maintenance system of a technical system. The choice of maintenance technology is directly influenced by other components of the maintenance system, that is, the concept and organization of the maintenance system. This means that the maintenance system should be designed uniquely, always looking for the most favorable compromises of all possible individual solutions. Maintenance technology is directly connected to development and production technologies.

Mines in FBiH implement a combination of all basic maintenance strategies: corrective, preventive and condition maintenance, with corrective being the most prevalent, bearing in mind the economic situation of the mine. Given that machines and plants in production facilities do not have the same maintenance priority, we can divide them into two groups:

- High-priority work equipment - means equipment whose breakdowns can cause huge financial losses, work stoppages, jeopardizing work safety, or which have far-reaching economic consequences, etc. (e.g. longwall mining systems, fans for ventilating mining areas, suspended hydraulic diesel locomotives for the delivery of raw materials and maintenance materials, certain parts of export equipment with accompanying equipment, pumping plants, etc.). This type of equipment requires the application of preventive maintenance, which is carried out according to the recommendations and instructions for maintenance by the manufacturer or in accordance with the maintenance plan.
- Medium-priority work equipment - means equipment whose downtime can cause serious financial losses (e.g. continuous and cyclical transport for transporting excavation from the pit, excavation machine - harvester for the construction of wider preparation rooms, export plant, pumping plants of minor importance, etc.). The maintenance of these technical systems can be reduced to corrective (maintenance after failure) and condition maintenance (predictive maintenance, based on appropriate condition assessment parameters).

Appropriate spare parts are procured for all types of machines and plants. For certain machines in mining (winches, export facilities, belt and rake transporters, locomotives, cable cars, etc.), the FBiH Law on Mining prescribes periodic inspections: daily, weekly, monthly, quarterly, six-monthly and annually. Separate technical systems inspection books are kept for each type of inspection, and observed defects are eliminated according to the degree of importance.

2. MANAGEMENT OF MAINTENANCE DEPARTMENT

The maintenance department in mining companies is usually organized across different sectors and teams that focus on maintaining equipment, infrastructure and safety. The hierarchical organization of a mine maintenance service usually includes several levels of management and various technical positions to ensure the efficiency and safety of operations. The structure may vary depending on the size of the mine, the type of ore, the technology used, and local regulations.

The most common hierarchical structure includes:

- Management of the maintenance department:
 At the top is the management that plans and manages all maintenance activities.
 Director of Maintenance: Responsible for all aspects of maintenance, including strategy, planning and budget.
 Maintenance Manager: Coordinates maintenance activities and supervises teams, performs analyzes and reports on work efficiency.
 Maintenance Supervisor: Manages teams of technicians and workers, ensures that maintenance tasks are carried out effectively and safely.
 Supervisor of specialized sectors: May exist for different areas, such as mechanical, electrical, or hydraulic maintenance.
- Technical support and administrative staff: The team responsible for long-term maintenance planning, prioritization and monitoring the execution of plans. Specialists dealing with technical issues, equipment upgrades and troubleshooting.
 Maintenance Planner: Plans and organizes work orders, keeps records of maintenance activities. Analysts and Engineers: Provides technical support, data analysis and process optimization.

- Technicians and Workers: Maintenance Technicians: Specialized in a specific type of equipment (eg electrical, mechanical). Maintenance workers: Perform routine and emergency repairs. They can be trained for different jobs depending on the needs. Preventive Maintenance Team: Responsible for regular maintenance procedures to prevent breakdowns. Corrective Maintenance Team: Focuses on repairing equipment when it breaks down. Infrastructure Maintenance Team: Maintains roads, lighting and other facilities within the mine.
- Training and Safety at Work: Training Specialist: Maintaining safety standards is critical in the mining industry, so members of the maintenance team are trained to implement safety procedures. Ensures that all employees are trained in safety and maintenance procedures. Safety Coordinator: Ensures that all maintenance work is carried out in accordance with safety standards.

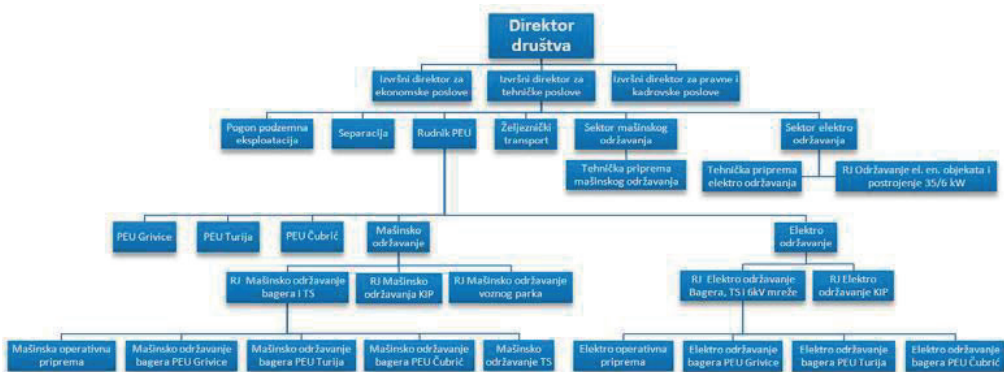


Figure 1. Macro organization of the maintenance function at RMU Banovići

The aforementioned structure enables efficient management of resources and information, quick problem solving and continuous improvement of equipment maintenance in the mine. Sustainability of operations and worker safety are priorities in this hierarchy. As in other industries, there is a large share of outsourcing in the maintenance sector in mines today. The share of outsourcing in mines can vary significantly depending on the specific company, region and type of ore that the mine exploits. In general, many mines in FBiH use outsourcing for certain specialized services such as equipment maintenance, transport, logistics, or even for certain operations related to ore exploitation. According to some analyses, the share of outsourcing in mines can be between 10% and 50%, but this depends on the company's strategy and its approach to resource management. In some cases, companies choose to outsource to reduce costs, increase efficiency, or gain access to specialized skills and technologies.

3. OVERHAUL ACTIVITIES IN MINES

In the mining industry, overhaul is usually defined as the process of maintaining, renewing or repairing equipment and infrastructure facilities to ensure their efficiency and safety. Overhaul in mines is a complex process that requires careful planning and adherence to relevant standards and procedures to ensure worker safety, smooth functioning of mining operations, and environmental protection. Overhaul is planned in advance and is usually carried out in periods when exploitation is reduced, in order to minimize losses in production. Also, the overhaul can last several weeks or months, depending on the scope and complexity

of the planned works. There are various standards and regulations related to the safety and quality of work in mines, and some of them include:

- ISO Standards: The International Organization for Standardization (ISO) provides a number of standards that can be applied to the mining industry, including 9001, 14001, 45001, etc.
- National laws and regulations: Each country has its own laws and regulations related to mining activities, including measures for safety, environmental protection and health standards.
- Industry association manuals and guidelines: Various associations such as the Mining Commission, or specialized equipment maintenance and overhaul organizations, also provide guidelines and best practices for mine overhaul.
- Technical standards: Each company may have its own internal standards and procedures for overhaul, taking into account the specific needs of equipment, technology and working conditions.

During overhaul, common activities include:

- ❖ Equipment Maintenance: Regular servicing and repair of mining machinery and plant, including excavators, belts and other mechanisms used in the mining process.
- ❖ Inspections and repairs: Conducting detailed inspections of infrastructure, such as transport routes, storage areas and other facilities to ensure their efficient and safe functioning.
- ❖ Improving safety at work: Implementation of new safety standards and technologies to reduce the risk of accidents and protect workers' health.
- ❖ Employee Training: Organizing training programs for employees to improve their expertise and familiarity with new technologies and procedures.
- ❖ Environmental measures: Introducing new environmental standards and technologies to reduce the impact of mining on the environment, including measures to control emissions and waste management.

Proper planning, training and communication are key to a successful mine overhaul activities.

4. OVERHAUL METHODOLOGY

Overhaul of large facilities in mines requires detailed planning and specialized procedures due to the complexity of the equipment and high safety standards. The organization of the overhaul requires teamwork between different sectors, including the engineering, maintenance, procurement and management sectors. A well-executed overhaul contributes to the reliable operation of the plant, fewer unplanned downtimes and the overall efficiency of the mining operation. The key steps in performing the overhaul are:

1. Preparation and planning of overhaul

Scope of Work Assessment: A team of engineers and technicians first assess which plant components are critical and which require replacement or repair. The engineering team performs an initial inspection of all parts of the plant to identify potential failures and wear. **Creating an overhaul plan:** The plan contains all the steps, resources and time required for each task, with a detailed schedule to avoid downtime. **Coordination with other sectors:** In the event that certain processes have to be stopped, the plan is coordinated with the production sector to ensure minimal downtime.

2. Preparation of necessary resources

Provision of necessary equipment and parts: Before the start of the overhaul, spare parts and tools are procured so that the process is continuous and efficient. Before starting the overhaul, all necessary spare parts are provided, including sprockets, bearings, conveyor belts,

hydraulic or electrical components, etc. Safety Equipment: Equipment is provided to protect workers, such as helmets, safety glasses, gloves and seatbelts.

3. Carrying out the overhaul

Disassembly and inspection of components: Overhaul usually begins with disassembly and detailed inspection of parts subject to wear (bearings, conveyor belts, pump systems). The plant is dismantled by segments (eg conveyor belts, motors, reducers) in order to access each part and inspect the condition in detail. For example: Conveyor belts are checked for wear, damage and tension, while rollers and shafts are carefully inspected. Engine and hydraulic components are checked for oil leaks and functionality. Wiring and sensors are thoroughly tested to ensure correctness and precision in operation. Cleaning and Inspection: Parts are thoroughly cleaned and then inspected to determine which components can remain in service and which need to be replaced. Replacement and repair: Based on the inspection, worn parts are replaced, while those that can be repaired (such as gears and shafts) are sent for processing and repair. Modernization and adaptation: In case the plant uses outdated technologies, modernization is carried out, including the installation of new sensors, control devices and protection systems.

4. Quality control

Testing of replacement parts and assemblies: Before assembly, all replacement parts undergo quality control to ensure they meet standards.

5. Installation and commissioning

Assembly: Assembly is done carefully to avoid mistakes that could lead to future failures. Commissioning: The plant is started up under controlled conditions and the operation of all systems is monitored for a certain period. Tuning and final optimization: Based on the results of the trial run, the plant is fine-tuned and optimized for maximum performance. Electrical and control systems: Electrical systems are connected and adjusted, including programming of control systems and calibration of sensors. Before restarting in operating mode, each part of the plant is tested at a lower load, checking the correct parameters and safety functions. The plant is started in a controlled operating mode, where all parameters are monitored in real time to identify potential irregularities.

6. Documentation and overhaul analysis

Qualitative inspection: A team of engineers performs a final inspection to ensure the correct operation and safety of the plant. Creating a report: After the overhaul is completed, a report is created on the work performed, replaced parts and identified problems. Analysis and recommendations for further maintenance: Based on recorded data and overhaul results, engineers make recommendations for future maintenance activities to keep the plant in optimal condition.

7. Safety and environmental aspects

Safety measures: Refurbishment includes strict safety protocols, such as work permits, protective equipment and inspection of all work procedures. Environmental control: Renovation includes environmental protection measures, such as proper disposal of waste and the use of environmentally friendly materials.

Calculating the time of overhaul activities in a mine includes a series of steps that help in planning and optimizing those activities. The key aspects to consider are:

- Identification of activities: First, it is necessary to identify all activities that are part of the overhaul, including: Inspection of equipment, Repair and replacement of parts, Maintenance and cleaning, Functional testing, Training of personnel.
- Estimating the duration of each activity: Each identified activity should have an estimated duration. This can be based on past experience, standard operating procedures or averages from past overhaul cycles.

- Preparation of resources: It is necessary to provide all necessary resources, including: Workforce (number and qualifications of workers), Tools and equipment, Materials needed for repairs.
- Activity Sequencing Planning: Determining how activities will be performed to minimize interdependencies and waiting time. Some activities may need to be performed in parallel while others must be performed sequentially.
- Contingency reserve: Always include a reserve in the time calculation for unforeseen events, such as additional repairs or problems that arise during the overhaul process.
- Update and monitoring: During overhaul, it is important to regularly monitor progress and adjust plans and time estimates based on the real situation.
- Documentation: After completion of the overhaul, an efficiency analysis should be performed based on the recorded data, which can help improve future calculations and plans.

The time calculation itself can be made in the form of tabular displays, where the activities, estimated duration, responsible persons and other relevant information are listed. It is useful to use project management software tools that allow for better planning and tracking of progress. Optimizing the overhaul of large facilities in mines requires a complex approach that combines different techniques and management strategies.

5. CHOICE OF KEY PERFORMANCE INDICATORS FOR OVERHAULS IN MINES

Optimizing the overhaul of large facilities in mines requires teamwork, innovation and constant adaptation to changing conditions. In this regard, the integration of technology and data can significantly contribute to process efficiency and cost reduction. KPIs (Key Performance Indicators) are means used to measure the efficiency and success of certain processes within the organization, including processes related to mine overhaul. Defining KPI for overhaul in mines can cover several aspects. Below are some steps and examples of KPIs that can be used:

1. Defining objectives – The first step is to identify the objectives of the overhaul. The goals may be to improve efficiency, reduce costs, increase safety or reduce downtime.
2. Selection of relevant KPIs – Based on the objectives, specific KPIs should be developed. Some of the possible mine overhaul KPIs include:
 - Overhaul Duration: A measurement of the total time required to complete an overhaul. Reducing this time can increase efficiency.
 - Overhaul costs: Monitoring total overhaul costs against the budget. This helps control costs and optimize resources.
 - Overhaul success rate: The percentage of successful overhauls in relation to the total number of overhauls. This tracks how often the repairs were effective and how the devices performed after the overhaul.
 - Downtime frequency: The number of downtimes on the equipment related to irregularities after overhaul. Fewer downtimes indicate a quality overhaul.
 - Percentage of compliance with overhaul plan: Percentage of overhauls that were completed according to plan (time, costs, quality). This tracks how well teams stick to plans.
3. Data collection – For each of the selected KPIs, a data collection system needs to be established. This may include software tools, spreadsheets, or manual tracking.
4. Regular reporting – Setting up regular reports on the performance of KPIs. Reports can be weekly, monthly or quarterly, depending on the needs and complexity of the process.

5. Analysis and Adjustment – Based on collected data and reports, analyze performance and identify areas for improvement. KPIs should be regularly reviewed and adjusted to ensure they remain relevant and useful.

6. CAMt SYSTEMS AND EXPERT PROGRAMS

In general, computers are playing an increasing role in the maintenance process in various industries, and consequently, more recently in mines as well. Computerized predictive maintenance in mining represents a significant step forward in optimizing processes and increasing efficiency, using the latest technologies and data to improve operational safety and reduce costs.

The use of computers in mines can be divided into several key segments:

- **Equipment Monitoring:** The use of sensors and computer systems to monitor the condition of mining equipment allows mining companies to monitor the performance of machines in real time. This includes collecting data on vibrations, temperature, pressures and other relevant parameters that may indicate potential problems.
- **Predictive maintenance:** Analysis of data collected from equipment can help predict potential breakdowns and maintenance needs before they occur. Models are being developed that can predict when a problem will occur based on historical data and the current state of the equipment. These models are regularly updated to improve the accuracy of predictions. Using algorithms for data analysis and machine learning, mining companies can optimize maintenance schedules and reduce downtime.
- **Resource planning:** Resource management software can help with efficient inventory management, workforce planning and maintenance scheduling. This type of software enables optimization of work processes and cost reduction. The integration of the Internet of Things (IoT) and smart sensors enables real-time monitoring of equipment conditions, which will facilitate overhaul planning and reduce downtime.
- **Simulations and Modeling:** Computers are used to simulate various maintenance scenarios and model processes to identify best practices and strategies. **Prioritization:** Based on data analysis and predictions, it can be determined which equipment needs immediate attention, thereby optimizing the allocation of resources and reducing costs. This allows companies to better understand the consequences of their decisions and improve processes. Using digital twins and simulations can help predict problems and optimize the overhaul process before physical work begins.
- **Training and Education:** Computers and software are also used to train personnel in mining operations. Simulations and virtual trainings allow employees to acquire practical skills without the risk of real accidents.
- **Documentation and records:** Computers help maintain maintenance records, including service history, part replacements, and inspections. This information is crucial for analyzing maintenance costs and effectiveness.
- **Process automation:** In the mining industry, computers are increasingly being used to automate certain processes, which can reduce human error and improve efficiency. The use of robots and automated systems will become standard in mines. This will reduce the risk of injury to workers and enable repairs to be carried out in hard-to-reach places.
- **Integration with systems:** Predictive maintenance is often integrated with other IT systems in a mining operation, such as ERP (enterprise resource management system) and SCM (supply chain management system), enabling better decision making.
- **Cost reduction:** Predictive maintenance reduces costs associated with unplanned downtime and repairs, thereby increasing the overall efficiency and profitability of mining operations.

- Greater efficiency and sustainability: Focus on using more energy-efficient machines and techniques, as well as material recycling, will become a key part of the overhaul, in order to reduce the negative impact on the environment.
- Safety and compliance: In addition to operational benefits, predictive maintenance can improve workplace safety by identifying potentially hazardous situations before they cause accidents.

Computer-aided maintenance (CAMt) and expert systems are key tools in modern mines that improve efficiency, safety and reduce costs. CAMt refers to the use of computer systems and applications for planning, monitoring and managing the maintenance of equipment in mines. Expert systems use artificial intelligence to provide recommendations or decisions in specific situations. In the context of mining, they can:

- Diagnose problems: Based on data from the system, the causes of equipment failures or process problems can be identified.
- Optimize operations: By analyzing different scenarios, expert systems can recommend the most efficient methods of exploitation or maintenance
- Provide staff support: Can be used as a training tool for employees, giving them access to expert knowledge in the form of software applications.

Integration of CAMt and expert systems can further improve mine performance:

- ❖ Proactive maintenance: By combining data analysis with expert systems, mines can move from reactive to proactive maintenance.
- ❖ Data-driven decisions: Expert systems can use data from CAMt to make informed decisions, thereby increasing the efficiency of operations

Computer-aided maintenance and expert systems represent a significant advance in the way mining operations are maintained. Using these technologies can improve efficiency, reduce costs and increase safety in mines. With the further development of technology, it is expected that their capabilities and applications will grow. In short, mine overhaul will become increasingly technologically advanced in the future, with a focus on safety and sustainability, which will contribute to more efficient resource management and cost reduction.

7. CONCLUSION

Maintenance of technical systems in mines is a key factor for ensuring production continuity and worker safety. The importance of maintenance cannot be emphasized enough, as properly maintained systems reduce the risk of breakdowns and extend the life of equipment.

A good organization of the maintenance service is essential. An efficient organization enables quick reaction to problems and preventive action, which reduces downtime and increases productivity. Regular overhauls of technical systems are necessary to ensure their reliability and functionality. Planning and carrying out overhaul activities requires a careful examination of the condition of the equipment and precise determination of the necessary interventions.

Integrating computer systems into maintenance activities brings numerous benefits, including better record keeping and monitoring of equipment condition, as well as optimization of resources. The application of modern technologies, such as sensors and IoT devices, enables the improvement of maintenance service results through timely detection of potential problems and more effective planning of interventions.

In conclusion, maintenance of technical systems in mines requires a comprehensive approach that includes good organization, regular overhauls, activity planning and application of modern technologies. Only in this way is it possible to ensure the long-term reliability and efficiency of mining operations.

8. REFERENCE

- [1] Adamović, Ž., Ilić, B. (2013), *Science of maintenance of technical systems*, Serbian academic center, Novi Sad.
- [2] Karić, M., Jašarević, S., Marić, B. (2014), *Indicators of maintenance success as a basis for investments in maintenance in ZD RMU "ABID LOLIĆ" Bila-Travnik*, Third Conference MAINTENANCE 2014, Zenica
- [3] Brdarević, S., Halep, A. (2013), *Maintenance*, Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Zenica, 2013.
- [4] Bulatović, M. (2008), *Maintenance and effectiveness of technical systems*, Faculty of Mechanical Engineering Podgorica.
- [5] Bulatović M. (1991), *Readiness and productivity as a function of system structure and maintenance*, University Word, Nikšić.
- [6] Perović M., Arsovski Z., Arsovski Z. (1996), *Production systems*, CIM center, Faculty of Mechanical Engineering, Kragujevac.
- [7] Sredojević, J. (2016), „*Mining and construction machines for unearthing rock masses*“, Zenica.
- [8] Jovančić, P. (2014), „*Maintenance of mining machines*“; Faculty of Mining and Geology, Belgrade.
- [9] Todorović J. (2006), *Inženjerstvo održavanja tehničkih sistema- Maintainability Engineering*, Belgrade, Institute for research and design in the economy.

ODREĐIVANJE POUZDANOSTI NA MAŠINI REZNI CENTAR PERTICI SCARABEO SC 65

DETERMINING THE RELIABILITY OF THE MACHINECUTTING CENTRE PERTICI SCARABEO SC 65

Faris Hazić, mag.maš.
Mettalon Plast d.o.o Zenica
Kralja Tvrtka I bb, Zenica

Sabahudin Jašarević, prof.dr.sc.
Politehnički fakultet
Fakultetska 1, Zenica

REZIME

U ovom radu su definisani osnovni pojmovi vezani za pouzdanost tehničkih sistema. Prikazan je dio proračuna koji se odnosi na određivanje raspodjele za opis pouzdanosti tehničkog sistema rezni centar Pertici Scarabeo SC 65. U konkretnom slučaju izabrana je raspodjela neprekidnog karaktera, dvoparametarska Weibulova raspodjela pomoću koje je na osnovu vremenskih podataka datih u radu određena pouzdanost tehničkog sistema za svaku vrijednost promjenljive veličine vremena t . Na kraju rada su data i zaključna razmatranja na ovu temu.

Ključne riječi: pouzdanost, tehnički sistem, raspodjela

ABSTRACT

In this paper, the basic terms related to the reliability of technical systems are defined. The part of the calculation related to the determination of the distribution for the description of the reliability of the technical system of the cutting center Pertici Scarabeo SC 65 is presented. In the specific case, a distribution of a continuous nature, a two-parameter Weibull distribution, was chosen, which, based on the time data given in this paper, determined the reliability of the technical of the system for each value of the variable quantity of time t . At the end of the paper, concluding considerations on this topic are given.

Keywords: reliability, technical system, distribution

1. POUZDANOST TEHNIČKIH SISTEMA

Pouzdanost tehničkog sistema jest vjerojatnoća da će tehnički sistem obaviti svoju funkciju u propisanim uvjetima rada u određenom vremenu. Za proračun pouzdanosti treba analizirati unutarnje i vanjske faktore koji imaju utjecaj na tehnički sistem. Unutarnje faktore određuju projektanti i proizvođači tehničkog sistema, dok su vanjski faktori oni koji djeluju na tehnički sistem tijekom eksploatacije (režimi rada, načini održavanja itd.). Kupnjom tehničkog sistema, kupljena je i određena razina njegove pouzdanosti. Stručnjaci održavanja mogu snimanjem i obradom podataka o zastojima izračunati veličinu eksploatacijske pouzdanosti, te svojim pravodobnim odlukama povećati ukupnu pouzdanost tehničkog sistema.

Na osnovu zakonitosti, odnosno raspodjele kvarova, koja je obično Weibullova, eksponencijalna ili logaritamska, može se izračunati pouzdanost. Za ove statističke raspodjele

moгуće je definisati:

1. funkciju pouzdanosti $R(t)$,
2. funkciju gustoće kvarova $f(t)$ i
3. funkciju učestalosti kvarova $\lambda(t)$.

2. OPIS POSMATRANOG TEHNIČKOG SISTEMA

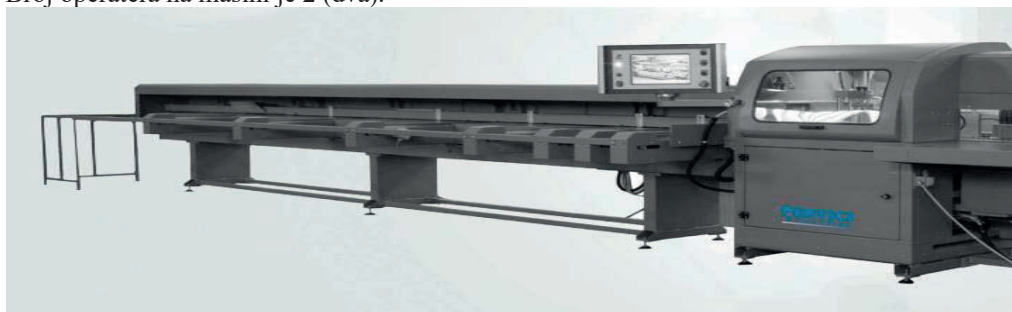
Rezni centar Pertici Scarabeo SC 65 je dvoosna CNC mašina čija je funkcija kriterijuma rezanje PVC profila na tehnološki determinisane mjere. Gabariti reznog centra su 12300x2300x3000 (mm). Neto masa mašine je 2,3 t. Maksimalna dužina šipke profila za rezanje je 6500 mm. Mašina je smještena na samom početku proizvodnje u posmatranoj kompaniji za proizvodnju PVC građevinske stolarije i ne postoji ista ili slična zamjenska mašina u posmatranoj kompaniji koja može obavljati njenu funkciju. Mašina je sklopljena iz tri cjeline:

- 1) Automatizirana jedinica za nalaganje materijala sa instaliranim roller sistemom kretanja materijala maksimalnog dopuštenog pritiska 12 bara
- 2) Rezna jedinica sa reznom pločom sa tri stepena rezanja $45^\circ - 90^\circ - 135^\circ$
- 3) Automatizirana jedinica za odlaganje izrezanog materijala sa instaliranim roller sistemom kretanja materijala

Organizacija proizvodnje zahtjeva dvosmjenski rad na ovoj mašini, tokom 6 dana u sedmici. Planirani radni broj sati bez zastoja na ovoj mašini tokom jedne radne godine je 4500 h. Tokom praćenja rada na mašini zabilježene su dvije vrste zastoja:

- a) Zastoji usljed mehaničkih kvarova na reznoj jedinici i jedinici za nalaganje materijala (reznna ploča, ploča po kojoj kliže materijal/vodilica)
- b) Zastoji usljed otkaza elektro komponenti ili softverskih grešaka na mašini

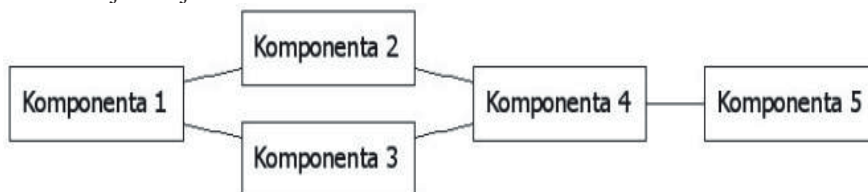
Broj operatera na mašini je 2 (dva).



Slika 1. Mašina Pertici SC65

2.1. Struktura sistema

Blok-dijagram pouzdanosti nije fizička reprezentacija sistema. Pokazuje kako su međusobno povezane komponente i njihov utjecaj na rad sistema [1]. Ako komponenta mora raditi da bi sistem radio, tada je komponenta spojena serijski, a ako jedna od više komponenti mora raditi da bi sistem radio, te komponente su spojene paralelno (komponente su redundantne). Primjer je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 2. Blok dijagram pouzdanosti [2]

U primjeru sa slike komponenta 2 i komponenta 3 su u paraleli, i njihov blok je u seriji s komponentama 1, 4 i 5. Pojednostavljeno, sistem radi ako postoji barem jedan put krenuvši od početka do kraja gdje sve komponente rade. U primjeru to mogu biti komponente 1, 2, 4, 5 ili 1, 3, 4, 5.

Za dati sistem, koji je predmet ovog dijela rada, radi se o rednoj vezi elemenata. Cijeli sistem je podijeljen u četiri funkcionalne jedinice. Otkaz bilo koje od njih četiri uzrokuje otkaz cijelog sistema. Na sljedećoj slici je šematski prikazan blok-dijagram posmatranog sistema.



Slika 3. Blok-dijagram pouzdanosti za mašinu Pertici SC 65

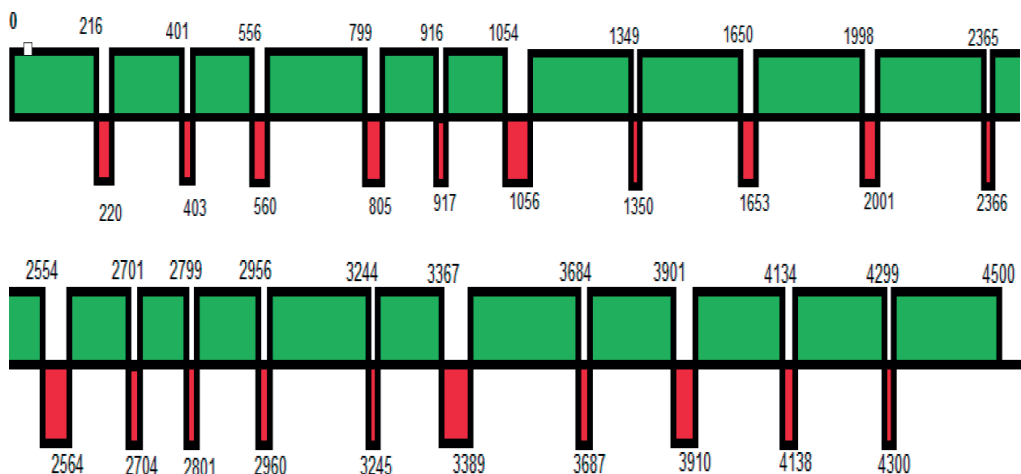
2.2. Vrijeme u radu i vrijeme u otkazu

Rad datog tehničkog sistema posmatran je tokom jednogodišnjeg rada kroz 2022. godinu. Napravljen je plan od strane menadžmenta kompanije u kojoj se nalazi ovaj tehnički sistem krajem 2021. godine da mašina treba da radi 4500 h u dvosmjenskom režimu rada, 6 dana u sedmici tokom 2022. godine kako bi se ispunili zadati poslovni ciljevi. Praćenjem dnevnika zastoja u radu, napravljena je tabela o vremenima nastanka otkaza.

Tabela 1. Vremena nastanka otkaza

216	401	556	799	916	1054	1349	1650	1998	2365
2554	2701	2799	2956	3244	3367	3684	3901	4134	4299

U nastavku ćemo na vremenskoj koordinati prikazati šematski vremena u radu (zelena polja) i vremena u otkazu (crvena polja) koja će nam dati potrebne podatke za dalji proračun.



Slika 4. Raspored intervala vremena u radu i vremena u otkazu

2.3. Opisi otkaza posmatranog sistema

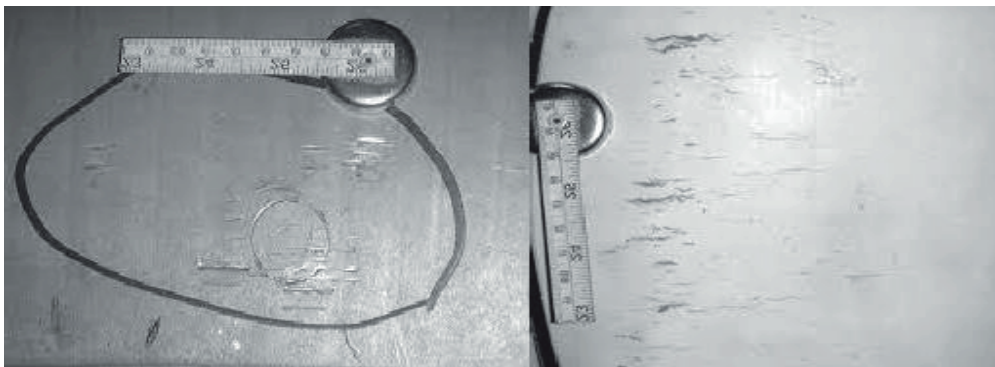
Kao što je već u uvodnom dijelu rečeno praćenjem rada mašine Pertici SC 65 primjećene su zastoji zbog otkaza na dva podsistema ove mašine i to:

- a) Zastoji usljed mehaničkih kvarova na reznoj jedinici i jedinici za nalaganje materijala (reзна ploča, ploča po kojoj kliže materijal)
- b) Zastoji usljed otkaza elektro komponenti ili softverskih grešaka na mašini

Više ćemo se u ovom dijelu zadržati na ove prve otkaze iz čisto mehaničkih razloga, jer otkazi pod b) spadaju u domenu elektro održavanja mašine, ali ćemo i njih uzeti u razmatranje tokom proračuna pouzdanosti.

Zbog eksploatacijskih uslova i uslova u kojoj mašina radi (PVC profili se režu nakon što se uvoze profili sa vanjskog skladišta) najčešći mehanički otkazi su bili pucanje rezne ploče i degradacija aluminijske ploče odnosno vodilice po kojoj kliže PVC profil.

Na sljedeće dvije slike prikazani su otkazi aluminijske vodilice. Na slici 5., ispod, se jasno vidi mehaničko oštećenje vodilice na kojoj se površinski dio po kojem kližu profili značajno istrošio. Inače ovakva vrsta otkaza zaustavlja kompletan proces rezanja na period sve dok se ne zamjeni oštećena vodilica i ne postavi nova.



Slika 5. Pohabana vodilica

Na sljedećoj slici je prikazana druga vrsta otkaza ove vodilice i to njena oksidacija. Ovaj otkaz vodilice je jako teško na vrijeme primijetiti, pa se često dešava da se na mašini napravi značajan broj škarta usljed dimenzione neusklađenosti koju stvara ovakva oštećena vodilica. Tek nakon što izrezani profili dođu do procesa sklapanja krajnjeg proizvoda otkrije se da su oni kraći ili duži za 2 do 5 mm, što predstavlja dimenziono odstupanje koje je van tolerantnog područja.



Slika 6. Oksidacija vodilice

Rezna ploča koja se koristi za rezanje PVC profila je HSS cirkularna rezna ploča debljine 2 mm i sa 132 zupca, Slika 7. Oštećenja rezne ploče su uglavnom zbog gubitka reznih svojstava odnosno istupljenosti oštrice. Katalozi proizvođača reznih ploča svakako preporučuju zamjenu svakih 3-12 mjeseci u zavisnosti od tempa eksploatacije, vrste materijala koji se reže, kao i ambijentalne temperature radne sredine [3].



Slika 7. Istupljena rezna ploča

Veliki broj sati zastoja dešavao se u posmatranom periodu i zbog softverskih grešaka na mašini, koje je rješavao direktno proizvođač mašine, pa su i ti zastoji uračunati u vremenskoj slici, ali njih nećemo detaljnije opisivati i svrstat ćemo ih u granu elektro-održavanja.

3. VEJBULOVA RASPODJELA

Vejbulova raspodjela se bez svake sumnje daleko najviše koristi u svim analizama efektivnosti tehničkih sistema, a posebno u području pouzdanosti [4]. Ovo neposredno proističe iz njenog parametarskog karaktera i širokih mogućnosti da se izborom odgovarajućih vrijednosti ovih parametara interpretiraju veoma različiti zakoni slučajno promjenljivih veličina. Vejbulova raspodjela se izražava u dva oblika: sa dva ili sa tri parametra [1].

U ovom radu ćemo obraditi samo dvoparametarsku raspodjelu iz razloga što u troparametarskoj Vejbulovoj raspodjeli se koristi dodatni parametar γ koji označava parametar položaja. Ovaj parametar označava minimalnu vrijednost slučajno promjenljive koja može da se ostvari. On je u našem slučaju jednak nuli, pa ćemo iz tog razloga koristiti dvoparametarsku metodu. Parametar β je parametar oblika, a η je parametar razmjere.

Osnovne funkcije Vejbulove raspodjele su:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots (1) - \text{funkcija učestalosti pojave otkaza}$$

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots (2) - \text{Pouzdanost/nepouzdanost sistema}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \dots\dots\dots (3) - \text{Intenzitet otkaza}$$

3.1. Praktična primjena Weibulove raspodjele

U našem konkretnom slučaju, na mašini Pertici SC 65 na osnovu podataka o vremenu u otkazu i radu koje smo dali ranije u tekstu izračunat ćemo parametre Weibulove raspodjele η i β koristeći funkcije softvera MS Excel. Kada izračunamo ove parametre prikazat ćemo i osnovne funkcije Weibulove raspodjele.

Da bi se odredili traženi parametri prvo ćemo u MS Excelu odrediti funkciju nepouzdanosti sistema na osnovu akumuliranih vrijednosti vremena i broja otkaza. Cjelokupan dalji postupak predstavlja testiranje hipoteze da se posmatrane funkcija slučajne promjenljive t pokoravaju Weibulovom zakonu raspodjele. Testiranje hipoteze će se uraditi grafoanalitičkim putem u nastavku rada.

Na osnovu formule (2) imamo:

$$F(t) = 1 - R(t)$$

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

$$\frac{1}{1-F(t)} = e^{\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

$$\ln \frac{1}{1-F(t)} = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$$

$$\ln\left(\ln \frac{1}{1-F(t)}\right) = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(\eta)$$

Time dobijamo jednačinu oblika:

$$y = mx + c$$

gdje je:

$$y = \ln\left(\ln \frac{1}{1-F(t)}\right)$$

$$m = \beta$$

$$x = \ln(t)$$

$$c = -\beta \cdot \ln(\eta)$$

Nakon ovoga, prebacujemo podatke o vremenima koje smo dali u ovom radu u Excel tabelu. Tabela je prikazana ispod. Tabela se sastoji od 5 kolona. U prvoj koloni su dati brojevi otkaza od 1 do 20 koliko ih je zabilježeno. U drugoj koloni su dati kumulativni sati zastoja usljed otkaza. U trećoj koloni je izračunata nepouzdanost sistema, odnosno medijalni rang (MR) koji smo izračunali pomoću Bernardove aproksimacije koja glasi:

$$\underline{MR}_i = \frac{i-0,3}{n+0,4} \dots\dots\dots (4) \text{ Bernardova aproksimacija}$$

Pri čemu je:

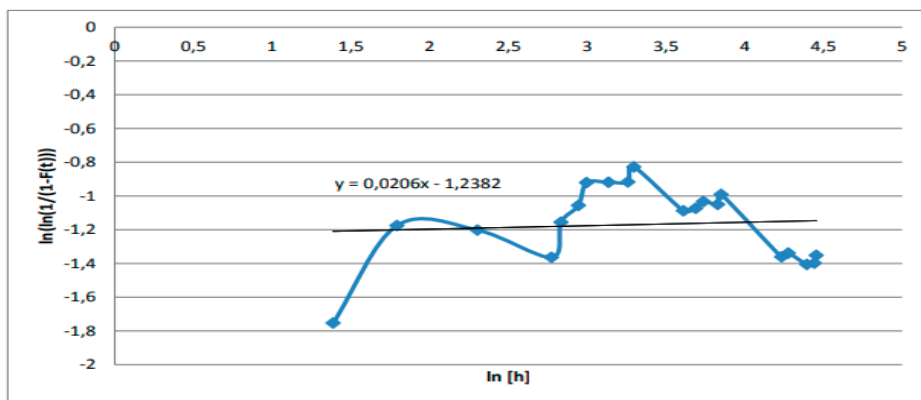
i – redni broj otkaza (kolona 1),

n – veličina uzorka (kolona 2)

Tabela 2. Potrebni podaci za prikaz funkcije

Otkaz	Kumulativni sati	F(t) - medijalni rang	ln [h]	ln(ln(1/(1-F(t))))
1	4	0,159090909	1,386294	-1,752894273
2	6	0,265625	1,791759	-1,175270415
3	10	0,259615385	2,302585	-1,202023115
4	16	0,225609756	2,772589	-1,363831192
5	17	0,270114943	2,833213	-1,1556011
6	19	0,293814433	2,944439	-1,05590564
7	20	0,328431373	2,995732	-0,920953918
8	23	0,329059829	3,135494	-0,918605133
9	26	0,329545455	3,258097	-0,916792431
10	27	0,354014599	3,295837	-0,827871573
11	37	0,286096257	3,610918	-1,087651165
12	40	0,28960396	3,688879	-1,073141455
13	42	0,299528302	3,73767	-1,03282085
14	46	0,295258621	3,828641	-1,050038201
15	47	0,310126582	3,850148	-0,990887264
16	69	0,226224784	4,234107	-1,360728507
17	72	0,230662983	4,276666	-1,33854797
18	81	0,217444717	4,394449	-1,405718961
19	85	0,218969555	4,442651	-1,397795657
20	86	0,228009259	4,454347	-1,351766477

U četvrtoj koloni smo sate iz druge kolone pretvorili u prirodne koordinate i to nam je vrijednost „x“ iz naše jednačine, a peta kolona je zapravo izraz za vrijednost „y“.
 Nakon što se spoje četvrte i peta kolone dobije se funkcija koja je prikazana na sljedećem prikazu:



Dodamo opciju „Trendline“ kako bi nam softver MS Excel dao podatke o jednačini „y“ i ta jednačina je prikazana na grafiku, kao i njen grafički prikaz u obliku prave linije. Uspjeli smo dobiti koordinatni sistem u kojem su na apcisu nanijete logaritamske vrijednosti slučajno promjenljive t, a na ordinatu dvostruki logaritam recipročne vrijednosti pouzdanosti u kojem je Weibulov zakon raspodjele prava linija:

$$y = 0,0206x - 1,2382 \dots\dots\dots (5)$$

Iz izraza (5) možemo odmah utvrditi vrijednost parametra β :

$$\beta = 0,0206$$

A parametar η ćemo izračunati na sljedeći način:

$$c = -\beta \cdot \ln(\eta) = -1,2382$$

$$\ln(\eta) = \frac{1,2382}{\beta} = \frac{1,2382}{0,0206} = 60,1067961165$$

$$\eta = \ln(60,1067961165)$$

$$\eta = 4,0961$$

Nakon što smo dobili ova dva parametra sada za svako vrijeme t možemo pomoću izraza (1), (2) i (3) izračunati pouzdanost/nepouzdanost sistema, funkciju učestalosti pojave otkaza kao i intenzitet otkaza.

3.2. Proračun funkcije pouzdanosti za $t=10000h$

Za $t = 10000h$ slijedi:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

$$R(10000) = e^{-\left(\frac{10000}{4,0961}\right)^{0,0206}}$$

$$R(10000) = e^{-1,1743165097}$$

$$\underline{R(10000) = 0,30903 = 30,90 \%}$$

4. ZAKLJUČAK

U radu je obrađena tema pouzdanosti tehničkog sistema Rezni centar Pertici SC 65. Za navedenu mašinu data su vremena o radu i otkazu tokom jednogodišnjeg praćenja, kao i vrste otkaza i uzroci zbog kojih nastaju. Svaki otkaz je evidentiran, kao i vrijeme zastoja koje je uzrokovao. Planirano radno vrijeme je bilo 4500 radnih sati u dvosmjenskom režimu rada tokom 6 dana u sedmici. Da bi se ispoštovao planirani godišnji kapacitet proizvodnje u toku godine morale su se organizovati dodatnih 16 noćnih smjena zbog navedenih zastoja. Proračunom pouzdanosti ovog tehničkog sistema, odredili smo pomoću Weibulove raspodjele funkciju pouzdanosti/nepouzdanosti za svako vrijeme t . Za vrijeme $t=10000$ h očekuje se da će pouzdanost iznositi 30,90 %. To indikativno znači da se dosta vremena mora u budućnosti uložiti u proces održavanja mašine na stvari koje su ukazane ovim radom. Prije svega, preporučuje se izmjena layouta proizvodnje kako bi se izmijenila i mikrolokacija Reznog centra kako bi se smanjio broj otkaza usljed vanjskih vremenskih uticaja (značajno povišene i značajno niske temperature, uticaj vlage, leda i sl.). Također, formiranje skladišta rezervnih dijelova spram evidencije otkaza kroz analizu historije otkaza i praćenje stanja rezervnih dijelova s obzirom na trendove otkaza. Obavezno izvršiti obuku radnika na postojećoj mašini o preventivnim pregledima (vizualna kontrola oštećenosti radnih dijelova mašine i sistema za nalaganje i odlaganje materijala).

5. LITERATURA

- [1] Imamović, M.: *Teorija pouzdanosti*, IPI Institut Zenica, Zenica 2010.
- [2] Popović, P.; Ivanović, G.: *Projektovanje pouzdanosti mašinskih sistema*, Institut za nuklearne nauke „Vinča“ Beograd 2015.
- [3] <https://www.cmtorangetools.com/na-en/>, (pristup, 09.02.2024.).
- [4] <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-the-Weibull-distribution-is-used-in-reliability-engineering>, (pristup 09.02.2024.).

SEKCIJA 3
SESSION 3

THE EFFECT OF SOILING ON ENERGY PERFORMANCE IN PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS: A CASE STUDY FOR THE CLEANING PROCESS OF HARRAN UNIVERSITY SOLAR POWER PLANT

Mehmet Azmi AKTACİR, Prof. Dr.
Harran University, GAPYENEV Renewable Energy and Energy Efficiency Centre
Osmanbey Campus, Şanlıurfa, Türkiye

Mehmet Akif İLKHAN, Lecturer
Harran University, GAPYENEV Renewable Energy and Energy Efficiency Centre
Osmanbey Campus, Şanlıurfa, Türkiye

ABSTRACT

As the world shifts toward renewable energy sources to combat climate change, the adoption of photovoltaic (PV) systems has surged. According to 2023 data from the International Renewable Energy Agency (IRENA), the global installed capacity of PV power plants has reached 1411.14 GW, marking a significant increase of 346.86 GW from the previous year.

A crucial factor for the future growth of PV systems is reducing the Levelized Cost of Electricity (LCoE). This can be achieved by enhancing PV system performance and optimizing monitoring, operation, and maintenance (O&M) strategies. Effective O&M is essential for ensuring reliable operation, minimizing downtime, and improving overall system efficiency. Studies have shown that optimized O&M strategies can recover an average of 5.27% of energy for PV power plants.

One common issue affecting PV system performance is the accumulation of dust, and dirt on panel surfaces. These contaminants can significantly reduce energy output, making regular cleaning essential. A study conducted on a 5 MWp PV system at Harran University analysed the impact of cleaning on panel performance from 2021 to 2023. The study aimed to quantify how pollution affects energy performance and the benefits of regular cleaning.

Keywords: Photovoltaic system, soil effect, electric energy output, Solar Power Plant

1. INTRODUCTION

In the fight against climate change, renewable energy sources are being increasingly used instead of fossil fuels. This shift, known as the green energy transformation, has seen a significant rise in the use of photovoltaic (PV) systems that produce electricity directly from solar energy. According to 2023 data from the International Renewable Energy Agency (IRENA), the global installed capacity of photovoltaic power plants has reached 1,411.14 GW, representing an increase of 346.86 GW compared to the previous year [1]. To meet the 2050 carbon neutrality target, the use of other renewable energy sources, alongside solar energy in electricity generation, must also increase. Specifically, the aim is to triple global renewable energy capacity by 2030, reaching 11.2 GW. Achieving this goal requires renewable energy

technologies that can serve as alternatives to traditional energy sources, offering affordable and environmentally friendly energy production processes [2]. Photovoltaic solar energy technologies show significant potential.

One of the most important factors for the future adoption and development of PV power systems, which are increasingly being deployed in the fight against climate change, is the reduction of the cost of electricity, measured as the Levelized Cost of Energy (LCoE). A keyway to achieve this is by improving the performance of PV systems and optimizing monitoring, operation, and maintenance (O&M) [3]. The energy performance of a solar power plant depends on the weather and geographical conditions of the installation site, the system's design parameters, and operational processes. Errors made during the design phase of photovoltaic systems are one of the most critical factors affecting system performance.

Photovoltaic systems consist of panels where energy is produced, inverters where energy conversion takes place, and battery groups for systems that store energy. The electrical energy produced by the PV system is delivered to the required load. For this process to be efficient, the capacities of the PV system components (Panel-Inverter) must be compatible. If the DC energy produced by the panels exceeds the inverter's capacity (AC), it will lead to interruptions and energy losses. On the other hand, selecting an inverter that is too large results in an uneconomical system design and increases energy production costs. Therefore, it is essential to correctly determine the AC-DC ratio in photovoltaic systems. Additionally, to minimize shading losses, the distance between panel rows should be optimized, and PV panels should be oriented southward and positioned at the optimum tilt angle to maximize sunlight exposure.

Other important factors affecting the energy performance of PV systems include the region's sunshine duration, solar radiation levels, and climate data such as ambient temperature, humidity, and wind speed. The performance of PV panels is directly dependent on the intensity of solar radiation and the length of sunshine hours—higher values positively affect performance. While high outdoor temperatures can negatively impact PV panel efficiency, wind can improve performance by cooling the panel surfaces. The PV panel technology selected for the system should also be appropriate for the local climate conditions. In very hot regions, panels with low temperature-power coefficients will perform better.

Maintenance and operation (O&M) strategies must be applied to ensure PV plants operate reliably and effectively, maintain uninterrupted system operation, and minimize downtime [4]. A study from the literature indicated that optimized O&M strategies can recover an average of 5.27% more energy from a PV power plant [3]. PV panel surfaces must remain clean during operation, as dust carried by the air, soot, and dirt in industrial areas, as well as localized debris like bird droppings and plant waste, can significantly reduce panel energy performance. Panels that accumulate dirt during operation should be cleaned periodically.

In this study, the cleaning processes of a 5 MWp photovoltaic power system at Harran University were examined. The performance values of the PV panels before and after cleaning were measured, considering the cleaning periods between 2020 and 2022. This allowed for an assessment of the impact of pollution on energy performance in PV power systems.

2. HARRAN UNIVERSITY SOLAR POWER PLANT AND ENERGY PERFORMANCE CALCULATION

Harran University is in Sanliurfa province, in southeastern Turkey. Sanliurfa experiences hot and dry summers, along with mild and rainy winters. The province has the highest solar energy potential in Turkey. The 5.314 MWp DC photovoltaic (PV) power plant installed at Harran University meets the energy needs of the University Hospital [5]. External field images of the power plant are shown in Figure 1. The system uses 16,104 LG - monocrystalline panels, each

with a capacity of 370W. Additionally, 5 units ABB - inverters, each with a capacity of 1MW, are employed in the system. The technical specifications of the panels and inverters used are provided in Table 1. Each array consists of 40 PV panels.

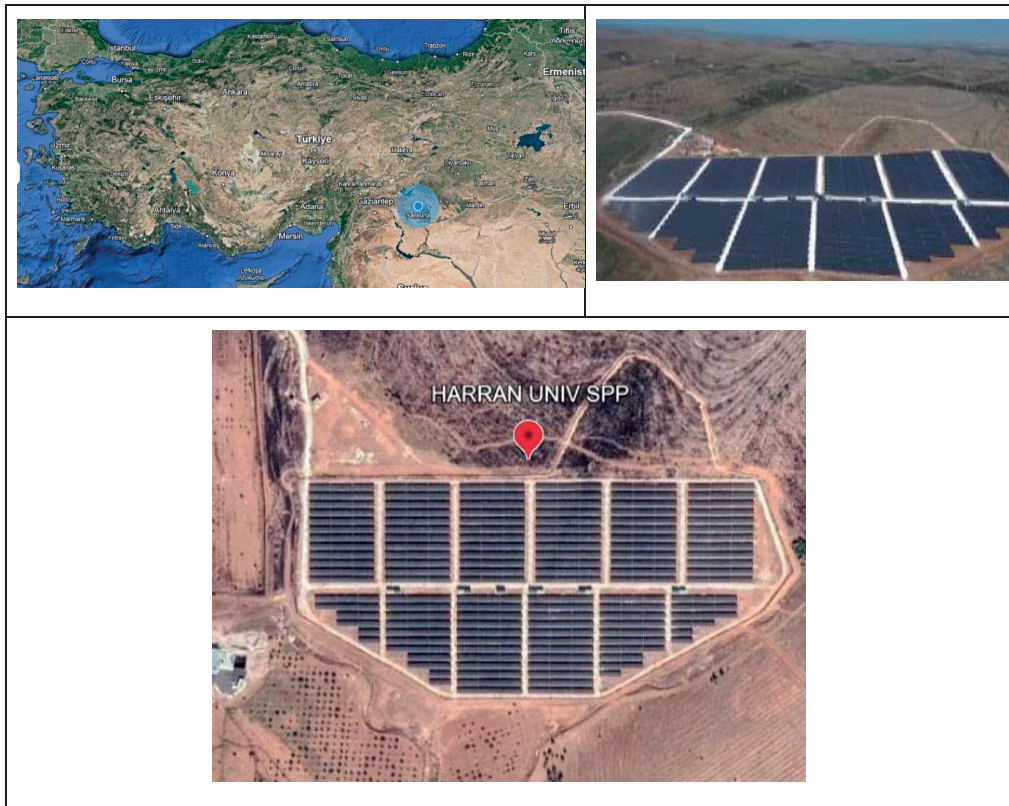


Figure 1. Harran University solar power plant exterior views

Table 1. PV Module and Inverter Technical Specifications

LG330N1C-A5			PVS800-57-1000kW-C		
Electrical Parameters	Values	Symbol	Electrical Parameters	Values	Symbol
Maximum voltage (V)	33.7	V_{mp}	<i>Input (DC)</i>		
Temperature coefficient of I_{sc} (%/°C)	0.03	k_{sc}	Maximum DC voltage (V)	1100 V	$V_{in,dc}$
Short-circuit current (A)	8.41	I_{sc}	Maximum DC power (W)	1000 W	$P_{m,dc}$
Maximum current (A)	9.8	I_{mp}	<i>Output (AC)</i>		
Open-circuit voltage (V)	40.9	V_{oc}	Maximum output power (kW)	1200	$P_{m,ac}$
Temperature coefficient of V_{oc} (%/°C)	-0.27	k_{oc}	Nominal AC current (A)	1445	$V_{in,ac}$
Maximum power (W)	330	P_{mp}	Efficiency		
			Maximum efficiency (%)	98.8	%
			Euro-eta (%)	98.6	%

In the PV system connected to the grid, photovoltaic panels produce DC electrical energy with solar radiation. Protection against overvoltage is provided by a DC circuit breaker, an inverter that converts DC to AC, and an AC circuit breaker. The energy produced is prioritized with a production meter and a bidirectional electricity meter, and the excess is returned to the grid. When energy is insufficient, the grid is activated.

The PV plant has a remote monitoring system. Here, the energy produced by the PV panel, the energy given to the hospital, the total energy value consumed by the hospital, the power data

in the inverter, and meteorological data are recorded. The panel temperature value is determined by the module cell.

The performance of a PV system depends on local climate conditions and can be analysed with the parameters defined in the IEC 61724 standard [6]. In this study, the Performance Ratio (PR) will be calculated in the evaluation of the energy performance of the PV plant. In this study, the method defined by the International Energy Agency and standardized by the International Electrotechnical Commission (IEC) 61724 standard was used to calculate the performance ratio from the collected data [7-8].

The reference efficiency (Y_r) is calculated as the ratio of the total radiation from the Sun (G_t) to the reference degree radiation (G_{ref}) falling on the surface of the PV panels: (STC (Standard Test Condition): Irradiance 1000 W/m², Module Temperature 25 °C, AM 1.5).

$$Y_r = \frac{G_t}{G_{ref}} \quad (1)$$

The final system efficiency (Y_f) is calculated as the ratio of the total AC energy supplied by the PV system to the nominal installed power:

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_n} \quad (2)$$

The performance ratio (PR) of a PV system shows the effect of losses on energy output. This ratio is calculated by comparing the system's performance in real conditions to its ideal performance and is determined as follows:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (3)$$

In this study, the effect of the cleaning process on the energy performance of the power plant was determined by using the power data measured before and after the cleaning process was completed in 2020 and 2022.

3. RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION

3.1. Physical Examination results and Washing process

At the Harran University solar power plant, dust carried by the wind accumulates on the surfaces of the panels over time, causing them to become dirty. Figure 1 shows panels with dust-covered surfaces. As seen in the figure, the accumulated dust covers the entire surface of the panels, reducing the amount of solar radiation reaching the solar cells and negatively impacting electricity production. Therefore, the panels need to be cleaned periodically. Rainfall during the rainy seasons helps to clean the dust off the panels' surfaces. However, during the summer, due to the lack of rain, dust accumulation on the panels increases. This makes cleaning especially necessary in the summer. When deciding to clean the panels, factors such as panel surface pollution, the production values of the panels, and meteorological data are taken into consideration.

Since the Harran University solar power plant was commissioned, the panels have been cleaned at least once a year. Water-based cleaning machines are used to clean the panels. Photographs of the panel-washing process are shown in Figure 2. In the cleaning process, a water-washing

system attached to a tractor, as seen in Figure 2, is used. The washing process is carried out with pure water. The tractor moves between the rows of panels and washes the panels in each row in one pass. The length of the panels, which are placed horizontally in four rows, matches the brush length of the washing machine. The entire field takes approximately 10 days to clean, and the cost of the washing process is 25,000 TL.



Figure 1. Dirty PV panel images from the field



Figure 2. Washing dirty panels with a wet washing machine from the field

3.2. Evaluation of the Energy Production Performance of the Power Plant

In this study, the cleaning operations carried out at the Harran University solar power plant in 2020 and 2022 were considered. In 2020, all panels of the power plant were washed between September 19, 2020, and October 09, 2020, and in 2022, between February 06, 2022 and

February 11, 2022. To determine the effect of the washing process on the energy production performance of the power plant, performance calculations were made before and after washing, especially considering the days when solar radiation was close to each other.

The graph in Figure 2 was obtained by taking the data of September 18 before the washing process carried out in 2020 and October 10 after the washing. On the days when the energy production values of the power plant were compared, the total daily electrical energy value was 25502 kWh before washing, while the production value of the power plant increased to 26663 kWh after washing. Accordingly, the energy production performance of the power plant increased by 5% after cleaning. The sunshine duration on the days compared is approximately 13 hours. While the daily average solar radiation was 464W/m² on September 18, it was 429W/m² on October 10. As can be seen from the figure, the solar radiation values were equal between 6:40-11:40 on the days compared, while they were lower on clear days during the other hours. In the analysis, the production performance of the plant was 12% higher during the time when the solar radiation values were equal.

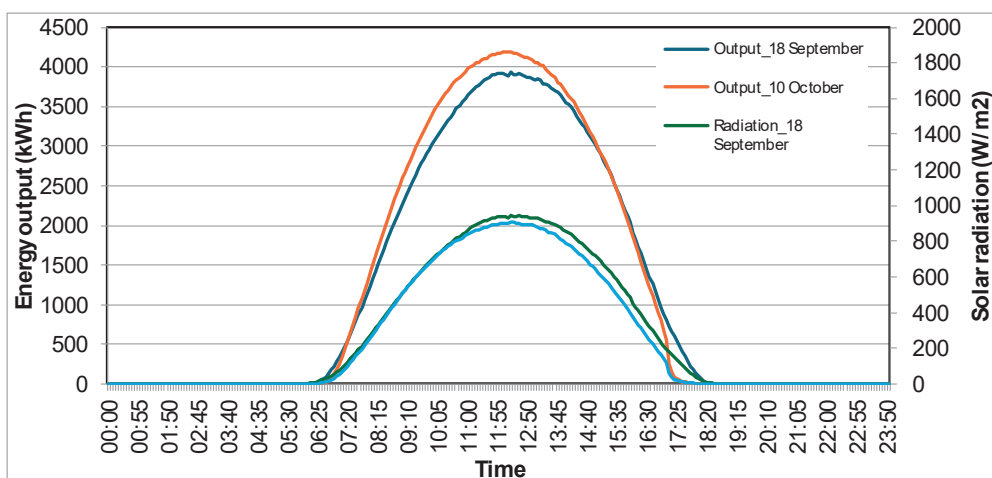


Figure 3. Performance evaluation before and after cleaning in 2020

The performance evaluation was performed by taking the data of February 5 before the washing process carried out in 2022 and February 12 after the washing process, and the graph in Figure 2 was obtained. As can be seen from the figure, on the days when the energy production values of the plant were compared, the total daily value of the electricity produced before washing was 30257 kWh, while the production value of the plant after washing increased to 32041 kWh. Accordingly, the energy production performance of the plant increased by 6%. While the daily average solar radiation on the days compared was 518W/m² on February 5, it was 566W/m² on February 12. The high solar radiation after cleaning was another factor that increased the plant performance.

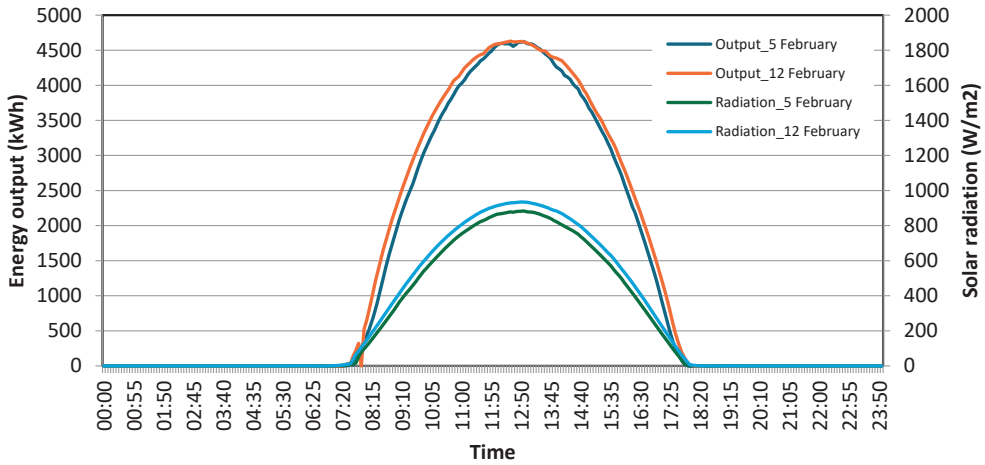


Figure 4. Performance evaluation before and after cleaning in 2022

Pollutants accumulated on the surface of panels in solar power plants can negatively affect energy production efficiency and lead to significant decreases in production capacity. In this context, to evaluate the effect of cleaning, it is necessary to analyse the difference in production before and after cleaning and its economic consequences. Based on the available data, this effect is examined as follows.

3.2.1. Production Increase

In the analyses conducted to determine the effect of the panel cleaning process on performance in this study, it was determined that the power plant's electricity production performance increased after the cleaning process.

For example, the daily production amount of the plant before cleaning was recorded as 30257 kWh, and after cleaning it was recorded as 32041 kWh. These results show that there was a 6% increase in energy production after cleaning:

$$\text{Production increase (\%)} = \left(\frac{\text{Total Production after cleaning} - \text{Total Production before cleaning}}{\text{Total Production before cleaning}} \right) * 100 \quad (4)$$

$$\text{Production increase (\%)} = \left(\frac{32041 - 30257}{30257} \right) * 100 = \%6$$

This increase clearly demonstrates the negative impact of pollution on energy production and the potential of regular cleaning to increase energy production.

3.2.2. Economic Gain

The economic equivalent of this increase in energy production can be calculated. Considering that the unit price of electricity is 3.6 TL/kWh and the additional production obtained after cleaning is 1784 kWh, the gain can be calculated as follows:

$$\text{Production income (TL)} = \text{increase in production} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{day}} \right) * \text{Elektricity unit price} \left(\frac{\text{TL}}{\text{kWh}} \right) \quad (5)$$

$$\text{Production income (TL)} = 1784 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{day}} \right) * 3,6 \left(\frac{\text{TL}}{\text{kWh}} \right) = 6421,35 \left(\frac{\text{TL}}{\text{day}} \right)$$

This daily additional income obtained after cleaning will provide a significant income increase if regular cleaning is done throughout the year.

3.2.3. Payback Time for Washing Cost

The cost of the cleaning process carried out in 2020 is given as 25,000 TL. The payback period of this cost can be calculated with the daily additional income obtained:

$$\begin{aligned} \text{the payback period for Washing cost (days)} &= \frac{\text{Washing Cost}}{\text{Daily Production Gain}} \\ \text{the payback period for Washing cost} &= \frac{25000 \text{ TL}}{6421,35 \frac{\text{TL}}{\text{day}}} = 3,89 \text{ days} \end{aligned} \quad (6)$$

This result shows that the cleaning cost can be covered in approximately 4 days. In other words, despite the cleaning cost, the increase in energy production can compensate for this expense in a short time and the additional production provided in the following days is returned as direct profit.

4. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

Pollution in photovoltaic (PV) panels has a significant negative impact on energy efficiency. Pollutants, especially dust, bird droppings, leaves, pollen and pollutants originating from industrial emissions, accumulate on the surface of the panels and reduce the absorption of sunlight. This can significantly reduce the energy production capacity of the panel.

The effects of pollution can be summarized as follows:

- 1. Decreased light absorption:** Pollution prevents sunlight from reaching the PV cells. This causes the cells to receive less light and therefore produce less energy. In case of heavy pollution, a decrease in production of up to 20% can be seen.
- 2. Heterogeneous pollution:** Pollution spread unevenly on the surface of the panels causes some cells to work less efficiently. This can create an imbalance in the entire system that reduces the energy production efficiency.
- 3. Increased temperature:** Pollution can increase the temperature due to the dirt layer accumulated on the surface of the panel. An increase in temperature is a factor that reduces the efficiency of photovoltaic cells.
- 4. Maintenance costs:** Panels need to be cleaned regularly. If dirt is not prevented or regular cleaning is not done, system performance will be damaged more in the long term, along with energy loss.

For these reasons, regular cleaning of dirt accumulated on the surface of solar panels is critical to optimize energy production efficiency, especially in dusty and industrial areas or in areas with high pollution such as arid climates.

The calculations above clearly show the positive effect of the 6% increase in energy production after cleaning on system performance.

From an operational perspective, cleaning is a critical maintenance strategy, especially for the economic optimization of photovoltaic power plants. In solar power plants, the levelized cost of energy (LCoE), that is, the levelized cost of energy, also includes maintenance and operating costs. As seen in this analysis, regular cleaning operations amortize themselves in a short time and provide a significant increase in production. Even when cleaning costs are considered, the increase in income obtained in the long term directly increases the profitability of the plant.

In this context, if regular cleaning operations are not done, decreases in production capacity may cause higher financial losses in the long term. As a result, regular cleaning of photovoltaic power plants is economically necessary and can be considered as a critical maintenance activity to maintain sustainable power plant performance.

5. REFERENCES

- [1]. IRENA, Renewable energy statistics 2024, <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>, erişim tarihi 06.08.2024
- [2]. Ibrahim Dincer, *Renewable energy and sustainable development: a crucial review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 4, Issue 2, 2000, Pages 157-175, [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00011-8).
- [3]. Livera, M. Theristis, L. Micheli, E. F. Fernández, J. S. Stein and G. E. Georghiou, "Operation and Maintenance Decision Support System for Photovoltaic Systems," in IEEE Access, vol. 10, pp. 42481-42496, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3168140.
- [4]. Hind Abdulla, Andrei Sleptchenko, Ammar Nayfeh, *Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 195, 2024, 114342, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114342>.
- [5]. Alamoudi R, Taylan O, Aktacir MA, Herrera-Viedma E, 2022, *Designing a solar photovoltaic system for generating renewable energy of a hospital: Performance analysis and adjustment based on RSM and ANFIS approaches*, Mathematics 9 (22), 2929.
- [6]. Manish Kumar, S.S. Chandel, Arun Kumar, *Performance analysis of a 10 MWp utility scale grid-connected canal-top photovoltaic power plant under Indian climatic conditions*, Energy, Volume 204, 2020, 117903, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117903>.
- [7]. IEC) 61724 standard, ISBN number 9782832250884.
- [8]. Enrique Fuster-Palop, Carlos Vargas-Salgado, Juan Carlos Ferri-Revert, Jorge Payá, *Performance analysis and modelling of a 50MW grid-connected photovoltaic plant in Spain after 12 years of operation*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 170, 2022, 112968, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112968>.

MAINTENANCE AND OPTIMIZATION OF BIOGAS PRODUCTION: ENSURING MATERIAL QUALITY

Zaga T. Trišović
The Academy of Applied Studies Polytechnic
Katarine Ambrozić 3, Belgrade, Serbia

ABSTRACT

Effective biogas production hinges on the efficient removal of contaminants like plastics, glass, metals, and oversized particles from the organic substrate. The presence of these impurities not only affects the quality of the final digestate or compost but can also lead to operational inefficiencies and increased maintenance costs. Implementing advanced separation technologies—whether before, during, or after the digestion process—is critical for maintaining consistent biogas yields and preventing damage to digestion equipment. The quality of input materials becomes especially crucial when the end product is intended for agricultural or horticultural applications, where even trace contaminants can impact soil health and crop productivity. By optimizing the preparation of raw materials and incorporating both dry and wet impurity removal systems, biogas facilities can improve operational stability and reduce downtime. Furthermore, such optimizations facilitate more sustainable waste management by ensuring a stable, high-quality biogas output and a digestate rich in nutrients and free from harmful contaminants.

Keywords: Biogas production, Contaminant removal, Digestate quality, Raw material preparation, Waste management

1. INTRODUCTION

As the global focus on renewable energy intensifies, biogas production has emerged as a viable solution for sustainable energy generation and waste management. This process not only provides an alternative to fossil fuels but also addresses the urgent need to recycle organic waste, thereby contributing to a circular economy. However, the effectiveness of biogas production systems depends heavily on maintaining high standards of input material quality, as contaminants like plastics, glass, and metals can significantly reduce operational efficiency and compromise product quality. In the context of biogas production, effective maintenance and optimization strategies are essential. These strategies ensure that biogas plants operate with minimal downtime and that equipment longevity is preserved. Implementing advanced technologies to separate impurities—whether before, during, or after digestion—plays a key role in both preventing equipment wear and enhancing biogas yields. This is particularly critical when the end products, such as digestate or compost, are intended for agricultural use, as even minor impurities can affect soil health and crop performance. This paper, presented at the Conference on Maintenance, explores the importance of rigorous

maintenance practices and technological optimizations in biogas facilities. It delves into strategies for efficient impurity removal, the impact of feedstock quality on maintenance cycles, and the broader implications for sustainable waste management and renewable energy production. By focusing on these aspects, this work aims to contribute to the ongoing conversation on enhancing biogas production's operational stability and environmental sustainability.

According to recent studies, the efficiency of biogas production is significantly hindered by the presence of non-organic contaminants in the feedstock. Research highlights that materials such as plastics, glass, and metals not only reduce the quality of the digestate but also lead to frequent mechanical issues and increased maintenance costs (Smith & Jones, 2022). Research indicates that when digestate from biogas production is intended for agricultural application, maintaining high purity levels of the input materials is essential. Trace contaminants have been shown to negatively affect soil properties and plant growth, thus stressing the need for reliable impurity removal systems in biogas plants (Liu et al., 2021). Technological advancements have made it possible to efficiently separate impurities from organic waste both before and after digestion. Studies show that facilities implementing both dry and wet impurity removal systems benefit from improved biogas yields and reduced downtime, enhancing overall operational sustainability (Garcia & Lopez, 2023). Effective maintenance in biogas plants, supported by regular impurity separation, has been shown to reduce the likelihood of equipment failure, leading to more consistent gas output and lower operational costs. This is especially relevant as the industry shifts towards optimizing renewable energy sources (Thomas et al., 2020).

2. BIOGAS PRODUCTION

The production of biogas through anaerobic digestion represents a crucial innovation in renewable energy, addressing both energy needs and waste management challenges. The effectiveness of this process heavily relies on the quality of substrates used and their proper preparation. Substrates must be conditioned to achieve a fluid consistency that allows for efficient pumping into the digester. This conditioning is typically performed in a pre-digester pit or specialized containers immediately before the substrates enter the digestion process. To achieve this moisture-rich consistency, various liquids can be utilized for wetting the substrates. Liquid manure, liquid digestate derived from pressing, process water, or in some cases, fresh water, are common choices. Notably, employing liquid digestate can reduce the consumption of fresh water, which is a significant benefit in terms of resource conservation. Furthermore, this approach has the added advantage of inoculating the substrate with microbial cultures from the ongoing digestion process, thus enhancing the overall microbial activity and accelerating the degradation process. A critical aspect of substrate preparation is hygienization, especially for materials that are potentially problematic from both epidemiological and phytosanitary perspectives. Hygienization typically involves heating the substrate to a temperature of 70°C for a minimum of one hour to eliminate harmful pathogens. Although autoclaving serves as an alternative method, it is less frequently employed than hygienization at 70°C. Implementing hygienization prior to introducing problematic substrates into the digester is a strategic approach that ensures compliance with safety regulations while simultaneously promoting efficient digestion. This pre-treatment can be performed in metal containers that can be hermetically sealed and heated, often using equipment designed for animal feed processing (figure 1).

Maintaining substrate homogeneity is vital for process stability. Substantial fluctuations in substrate composition necessitate microbial adaptation to varying conditions, which can lead to diminished gas yields. Therefore, pre-mixing in the pit using mixers is standard practice before the substrates are pumped into the digester. Moreover, homogenization may occur within the digester itself, particularly when diverse substrates are introduced either directly or through the addition of solid materials. This integration of various substrates should be carefully managed to ensure optimal conditions for microbial activity.



Figure 1. Container for sanitizing with cooling.



Figure 2. Pumps in the biogas plant.

Efficient transport and feed-in of substrates are equally important for maintaining a stable digestion process. Although a continuous flow of substrate through the biogas plant is ideal, achieving this in practice is often challenging, leading to a quasi-continuous feeding strategy where substrates are added multiple times throughout the day. The selection of transportation and feeding technology depends largely on the substrate's characteristics, such as its homogeneity and temperature. Significant temperature differences between the substrate and the digester can negatively impact microbial activity and, consequently, gas production.

Additionally, the use of heat exchangers and preheating units before the digester can mitigate these issues, ensuring that the substrate temperature aligns more closely with optimal digestion conditions.

2.1 Transport and Feed-In

From the perspective of the biological process, a continuous flow of substrate through the biogas plant is ideal for stable digestion. This is practically impossible to achieve in practice, so a quasi-continuous feed-in of substrates into the digester is the norm. Substrates are added multiple times throughout the day. Consequently, all equipment necessary for transporting the substrates does not operate continuously. This is extremely important in terms of design.

The choice of transport and feed-in technology primarily depends on the uniformity of the substrates. It is necessary to differentiate between technologies for pumpable substrates and those for stackable substrates. The substrate temperature must be considered concerning the feed-in. Significant differences between the material temperature and the digester temperature (which can occur during post-hygienization or when the digester is filled during winter) have a serious impact on the biology of the process, which can, in turn, lead to

reduced gas yields. Heat exchangers and heated pre-feeding units before the digester are two technical solutions that are applied from time to time to address these issues.

2.2 Transport of Liquid Substrates

Electric motor-driven pumps are most commonly used for pumping substrates in biogas plants. They can be controlled by timers or computers that manage the processes. This way, the entire process can be fully or partially automated. In many cases, substrate transportation within the biogas plant is carried out entirely by one or two pumps centrally located in a pumping station or control cabin. Pipelines are designed so that all operational processes (e.g., filling, complete tank emptying, rupturing, etc.) can be controlled by easily accessible or automatic valves. Figure 2 shows an example of pump and pipeline arrangement in a biogas plant. It is important to ensure that pumps are easily accessible and that there is sufficient working space around them. Even with precautionary measures and proper substrate preparation, pumps can still become clogged, necessitating quick cleaning. Another thing to keep in mind is that the moving parts of the pumps are consumables. Depending on the harsh conditions in biogas plants, they must be replaced from time to time without shutting down the plant. Therefore, shut-off valves must be installed so that pumps can be isolated from the pipeline system for servicing. Almost exclusively, centrifugal or positive displacement pumps are used, which are also applied in the handling of liquid manure. The selection of appropriate pumps concerning power and transport characteristics largely depends on the substrates used and their degree of preparation, i.e., dry matter content. To protect the pumps directly in front of them, cutting and shredding devices can be installed, as well as separators for undesirable materials, or pumps can be used whose transport elements are equipped with shredding devices.

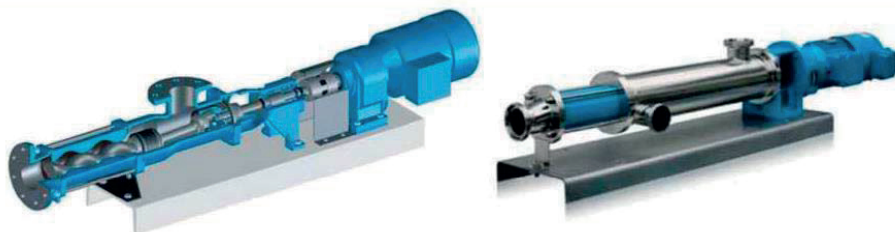


Figure 3. Eccentric one-way screw pump.

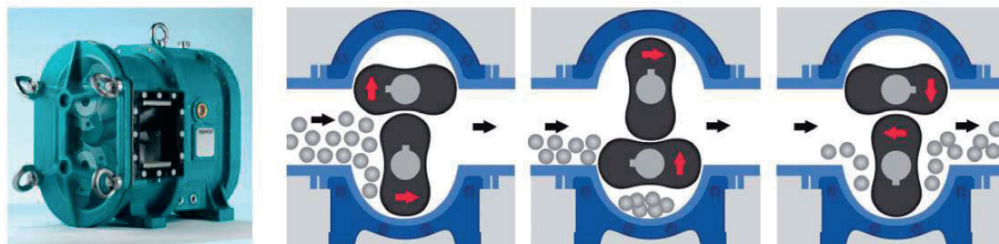


Figure 4. Rotary piston pump (left), working principle of a rotary piston pump (right).

Centrifugal pumps are widely used in the field of liquid manure handling. They are primarily suitable for thin substrates. Inside the centrifugal pumps, a working wheel rotates within a fixed housing. The transported medium is accelerated by the working wheel, resulting in an increase in speed in the discharge hose of the centrifugal pump, thereby achieving a certain

transport height or discharge pressure. Depending on the requirements, the working wheel can have various sizes and shapes. A special design is the chopping rotor pump, whose working wheel has reinforced blades for shredding the substrate.

Positive displacement pumps are used for transporting thick substrates with a high dry matter content. In positive displacement pumps, the quantity of the transported medium can be determined by the number of revolutions. This allows for better pump regulation combined with more precise dosing of the substrate. They are self-priming and more pressure-resistant than centrifugal pumps, meaning that the transport quantity depends much less on the transport height. Positive displacement pumps are relatively sensitive to unwanted materials, so it is advisable to use pumps with shredding devices and separators for undesirable materials to protect against large and fibrous components.

In practice, primarily rotary piston pumps and pumps with eccentric screws are used. Eccentric screw pumps feature a spiral-shaped rotor that moves within a stator made of elastic material. As the rotor turns, a moving chamber is created from which the substrate is transported. An example of such a pump is shown in Figure 3. Rotary piston pumps have two counter-rotating two- to six-wing pistons in an oval housing. Both pistons rotate in opposite directions via a roller bearing with a slow axial and radial stroke, without touching the housing or each other, designed so that in every position, the suction part of the chamber is separated from the discharge part. The voids created in the suction part of the chamber fill with the transported medium and transfer to the discharge part. The principle of operation of rotary piston pumps is illustrated in Figure 4.

2.3 Transport of Solid Substrates

Solid substrates in wet fermentation must be transported to the feed-in point or dilution area. Most of the transportation is done using a standard loader. For automatic filling, scraper floors, hanging push rods, and transport screws are used. Scraper floors and hanging movable rods can transport almost all solid substrates horizontally or on a slight incline. However, they cannot be used for dosing. They allow the application of very large storage tanks. Transport screws can move solid substrates in almost all directions. The only prerequisite here is the removal of large stones and shredding of the substrate, so that the screw can grasp it and can fit into the screw turns. Automatic filling systems for solid substrates in biogas plants often represent a unique unit together with the feed-in aggregates. In well-known dry fermentation plants, solid substrates are transported exclusively using wheeled loaders or directly filled using trailers with a push-bottom or similar, according to the garage principle. The design configurations of fermenters are closely linked to the fermentation process. Various methods can be employed for substrate fermentation, including complete mixing processes, plug flow processes, and specialized techniques. In the realm of biogas production within agriculture, cylindrical, vertically-oriented reactors with complete mixing are predominantly used. As of 2009, they accounted for approximately 90% of all existing facilities. Fermenters consist of a single tank with a concrete base and walls made of steel or reinforced concrete. The tank may be entirely or partially buried underground, or it may be constructed entirely above ground. A gas-tight cover is installed on the tank, which can be designed in various ways depending on specific requirements and structural considerations. The most commonly used types of covers are membrane roofs and concrete roofs. Complete mixing is achieved through the use of mixers located within or on top of the reactor.



Figure 5. Pipelines and fittings in the pumping station, shut-off valve.



Figure 6. Working platforms between tanks with pipelines and pressure adjustment devices (left); gas compressor (right).

There are primarily horizontal and vertical fermenters that utilize plug flow. In agriculture, horizontal fermenters are almost exclusively used. Vertical fermenters employing the plug flow process are currently used only in specific cases and are not the focus of this discussion.

2.4 Fermentation

The schematic design, based on examples of wet and dry fermentation, is illustrated in Figures 5 to 7. Fermenters, which are predominantly constructed as horizontal steel tanks, are prefabricated and then delivered. However, the necessary transportation of fermenters to the site of use is limited to a certain size of the tanks. They can serve as the main fermenter for smaller facilities or as pre-fermenters for larger installations with main fermenters featuring complete mixing (cylindrical tanks). Horizontal fermenters can also operate in parallel to achieve a higher flow rate. The potential for unwanted discharge of unfermented substrate from the fermenter is reduced in the plug flow principle, ensuring a more reliable retention time for the entire material.



Figure 7. Fermentor with reciprocating flow; examples from practice, cylindrical (left) and rectangular (right).

2.5 Batch Process

Batch processes are designed as mobile container plants or stationary box fermenters. Over the past few years, these processes have reached a commercial level and established a presence in the market. Reinforced concrete box fermenters are primarily used for fermenting bulk substrates such as corn and grass silage. In batch processes, fermenters are filled with biomass, hermetically sealed, and reopened only after gas extraction. Loading and unloading are typically performed using wheel loaders. To adequately supply anaerobic bacteria and reduce acid production, the fermentation mass is mixed with at least 40% fermented substrate in a ratio of 40% to 60% (fresh mass to inoculation material). During the retention time of 3 to 6 weeks, the substrate is sprayed with percolate through nozzles mounted on the roof. The percolate, which is the excess liquid extracted from the substrate, is collected at the bottom and pumped into a storage tank. Biogas is collected in pipelines connected to the fermenter and directed to energy utilization points. Cascade fermenters with 2 to 8 units—mainly 4—have proven effective, enabling semi-continuous gas production. When applying batch processes, operational requirements for low emissions must be considered.

2.6 Special Processes

In addition to the widely used wet and dry fermentation methods, there are other processes that cannot be clearly classified into these categories. New solutions are being developed whose future significance is still uncertain. In Germany, two-chamber mixing processes for wet fermentation have become prevalent, utilizing automatic pressure increases from gas production for substrate mixing, eliminating the need for electrical energy. Over 50 facilities based on this technology, with fermenter volumes between 400 and 6,000 m³, have been constructed, primarily for fermenting liquid manure with a low share of renewable raw materials and sewage sludge. Various specialized forms of batch processes have also emerged in dry fermentation, with all processes sharing a common enclosed space for bulk substrates. For example, fermentation in tubular film, a simple solution derived from silage technology, uses gas-tight tubular film up to 100 m long on a heated concrete slab for filling with fermentation material. Biogas is collected via an integrated pipeline and directed to a cogeneration plant. The sequential batch reactor process involves top-side filling, where substrate moistening is limited to periodic percolation until the fermentation material is submerged in liquid. A novel two-phase process with box fermenters featuring complete mixing involves material homogenization using screw conveyors embedded in the fermenters. Fermenters generally consist of a thermally insulated fermentation tank, a heating

system, mixing equipment, and a sediment and fermented substrate extraction system. Fermenters can be constructed from steel, stainless steel, or reinforced concrete (figure 8 and 9). Reinforced concrete, when saturated with water, becomes sufficiently gas-tight. Fermenters can be poured on-site or assembled from prefabricated elements. Concrete tanks may be fully or partially buried in the ground, depending on soil characteristics. The tank's roof can be concrete, accessible for vehicles, with biogas stored in an external gas tank. If the fermenter also serves as a gas tank, gas-tight membrane roofs are used. Steel and stainless steel tanks are mounted on concrete foundations and connected to them. Rolled sheet metal strips and welded or threaded steel plates are used, with threaded joints sealed afterward. Steel fermenters are always installed above ground, with the roof structure typically serving as a gas tank, utilizing a gas-tight membrane. Effective mixing of the fermenter contents is essential for several reasons: inoculation of fresh substrate through contact with biologically active liquid in the fermenter, even distribution of heat and nutrients, prevention and breakdown of sediment and floating layers, and efficient gas extraction from the fermentation substrate. Minimal mixing occurs through the introduction of fresh substrate, thermal convection, and rising gas bubbles. However, this passive mixing is insufficient, necessitating active support for the mixing process.



Figure 8. Construction of a concrete fermenter

By implementing these comprehensive strategies—effective moistening, thorough hygienization, careful homogenization, and optimal transport—biogas facilities can enhance their operational efficiency. This not only contributes to improved biogas production but also promotes more sustainable waste management practices, thereby addressing critical environmental and energy challenges. Ultimately, these integrated approaches represent a significant step towards maximizing the potential of biogas as a viable renewable energy source.



Figure 9. Stainless steel fermenter under construction.

2.7 Maintenance

Maintenance in the biogas production process is vital for ensuring optimal performance and sustainability of the system. Regular inspections and servicing of fermenters, mixing equipment, and piping infrastructure are essential to prevent malfunctions and maintain the efficiency of the fermentation process. For instance, in two-chamber mixing processes, the effective use of automatic pressure increases for substrate mixing necessitates careful monitoring to ensure that the systems are functioning correctly and energy consumption is minimized. The materials used in construction, such as reinforced concrete and stainless steel, require periodic checks for integrity and gas tightness, especially if the fermenters are partially buried or constructed above ground. Furthermore, maintaining optimal mixing conditions is crucial to enhance substrate inoculation and nutrient distribution, which directly influences biogas yield. By prioritizing maintenance practices, facilities can not only enhance their operational efficiency but also significantly contribute to the sustainable management of organic waste and the advancement of renewable energy solutions.

3. ACKNOWLEDGMENT

This article/publication is based upon work from COST Action CA21112 - Offshore freshened groundwater: An unconventional water resource in coastal regions? (OFF-SOURCE), supported by COST (European Cooperation in Science and Technology).

4. CONCLUSION

Biogas production is a complex process that requires careful planning and maintenance to ensure the efficiency and sustainability of the system. Throughout the entire process, from selecting the fermenter to applying specialized methods, regular maintenance of equipment and systems is crucial. The quality of fermentation directly depends on the proper substrate mixture, optimal temperature, and anaerobic conditions, which further emphasizes the need for monitoring and timely interventions. Maintaining equipment, including fermenters, mixing systems, and biogas transport, not only improves operational performance but also reduces the risk of failure and efficiency loss. The use of modern technologies for monitoring and managing processes allows for the timely detection of issues and optimization of working

conditions. In this sense, maintenance is not just about meeting technical standards; it is also a key factor in achieving high biogas yields and minimizing negative environmental impacts.

In light of increasing demands for renewable energy sources, adequate maintenance of biogas production systems becomes increasingly important. Only through a continuous commitment to maintenance and the improvement of production processes can the full potential of biogas as a sustainable and environmentally friendly energy source be realized.

5. REFERENCES

- [1] Smith, J., & Jones, R. (2022). Impact of Non-Organic Contaminants on Biogas Production Efficiency. *Journal of Environmental Engineering*, 58(3), 215-224.
- [2] Liu, Y., Zhang, X., & Wang, L. (2021). Effects of Digestate Contaminants on Soil Health and Crop Productivity: Implications for Biogas Facilities. *Agricultural Sciences Journal*, 47(2), 145-155.
- [3] Garcia, M., & Lopez, R. (2023). Advancements in Impurity Separation Technologies in Biogas Production. *Renewable Energy Systems*, 29(1), 89-98.
- [4] Thomas, D., Patel, S., & Henderson, K. (2020). Maintenance Strategies for Optimal Operational Stability in Biogas Plants. *International Journal of Sustainable Energy*, 36(5), 492-503.
- [5] Trišović, T. Z., (2019), Master thesis, Faculty of Mechanical engineering, University of Belgrade, Belgrade

UTICAJ PRIMJENE HIBRIDNOG SISTEMA SA TOPLOTNOM PUMPOM U SISTEM DALJINSKOG GRIJANJA U VOGOŠĆI

IMPACT OF THE APPLICATION OF A HYBRID SYSTEM WITH A HEAT PUMP IN THE DISTRICT HEATING SYSTEM OF VOGOSCA

V. prof. dr. Nusret Imamović, dipl. ing. maš.
R. prof.dr. Azrudin Husika, dipl. ing. maš.
Azra Bećirbašić, dipl. inž. maš.

REZIME

Toplotne pumpe se sve više primjenjuju za grijanje zbog svog visokog stepena efikasnosti i povoljnog uticaja na smanjenje emisija ugljen dioksida. U radu je analizirana mogućnost primjene toplotne pumpe na sistem daljinskog grijanja u Vogošći, gdje su do sad za grijanje općine služili parni kotlovi na mazut. Na osnovu krive trajanja toplotnog opterećenja, izvršen je odabir toplotne pumpe koja kao niskotemperaturni izvor koristi pitku vodu sa Peračkog vrela koja je dovedena u kotlovnicu, uz kotao na gas kao dodatni izvor toplotne energije koji pokriva vršno opterećenje. Izvršena je tehno-ekonomska analiza primjene toplotne pumpe u sistemu daljinskog grijanja u Vogošći. Izračunati su troškovi novog sistema sa i bez obnove sistema distribucije i izvršena je usporedba s troškovima postojećeg sistema. Uz obnovu sistema distribucije, potrebna proizvedena toplotna energija je smanjena sa 16.070 MWh na 10.570 MWh godišnje. Ukupni troškovi za gorivo za pokrivanje potreba za energijom korisnika daljinskog grijanja su smanjeni za 2.263.552 KM godišnje. Izvršeno je i poređenje emisija ugljen dioksida postojećeg sistema i novog sistema s toplotnom pumpom. Ukupne emisije ugljen dioksida su smanjene sa 5.448 tona na 2.605 tona godišnje.

Cljučne riječi: toplotna pumpa, gasni kotao, sistem daljinskog grijanja

SUMMARY

Heat pumps are increasingly being utilized for heating due to their high level of efficiency and favorable impact on reducing carbon dioxide emissions. This study analyzed the possibility of applying a heat pump to the district heating system in Vogošća, where steam boilers fueled by fuel oil have been used for heating the municipality until now. Based on the heat load duration curve, a heat pump was selected that utilizes drinkable water from Peračko Vrelo as a low-temperature heat source brought into the boiler room, with a gas boiler as an additional source of thermal energy covering peak loads. A techno-economic analysis of applying a heat pump in the municipality of Vogošća was conducted. The costs of the new system with and without distribution system renovation were calculated, and a comparison was made with the costs of the existing system. With the renovation of the distribution system, the required produced thermal energy decreased from 16,070 MWh annually to 10,570 MWh annually. The total fuel costs for meeting the energy needs of the district heating users were reduced by 2,263,552 KM annually. A comparison of carbon dioxide emissions between the existing system and the new system with a heat pump was also conducted. Total carbon dioxide emissions decreased from 5,448 tons annually to 2,605 tons annually.

Keywords: heat pump, natural gas boiler, district heating system

1. UVOD

Preko 50% ukupne potrošnje energije u Bosni i Hercegovini (BiH) se odnosi na stambeni sektor [1]. Najveći udio (58%) odnosi se na stambeni sektor. U stambenom sektoru, najveći udio potrošnje energije odnosi se na grijanje (57%). Ovi podaci ukazuju na veliki potencijal za uštede energije primjenom mjera za poboljšanje energetske efikasnosti zgrada [2]. U BiH je svega 12% domaćinstava priključeno na daljinsko grijanje, a prema podacima iz 2017. godine samo 8% potreba za grijanjem u zgradarstvu se pokriva iz daljinskih grijanja [3]. Kotlovnica sistema daljinskog grijanja (SDG) razmatranog ovim radom se nalazi u Vogošći, u sklopu kompleksa „Stara industrijska zona”. Primarna namjena kompanije je proizvodnja i distribucija toplotne energije kojom snabdijeva potrošače na području općine Vogošća. Preduzeće također obnaša funkciju distributera vode za piće eksploatacijom pitke vode sa izvorišta „Peračko vrelo“ industrijskoj zoni i JKP „Vodovod i kanalizacija“ [4]. „Bags-Energotehnika” d.d. Vogošća upravlja infrastrukturom za daljinsko grijanje koja je stara 40 godina, ali funkcionalna. Starost i dotrajalost kotlova, distribucijska mreža i toplotne podstanice, te nedostatak moderne opreme za upravljanje i nadzor cjelokupnog sistema izaziva značajne gubitke u preduzeću. Budući da uslovi za razvoj daljinskog grijanja po gradovima nisu jednaki, za sisteme daljinskog grijanja u BiH se traže partikularna rješenja. Kreatori politike u potpunosti moraju razumjeti prepreke koje se nađu na putu ulaganja u isplativu energijsku efikasnost u njihovom industrijskom sektoru. Trebaju dizajnirati i provoditi politike i programe koji pomažu preduzećima da prevladaju kako prepreke unutar preduzeća, tako i vanjske prepreke [5]. U Federaciji BiH većina preduzeća daljinskog grijanja kao toplotni agregat nema vlastita kotlovska postrojenja, već su oslonjena na lokalna termoenergetska postrojenja - termoelektrane. Razlog tome je predratni razvoj kada su se za izgradnju teške industrije koristila bogata nalazišta domaćih energenata mrkog uglja i lignita, te je višak toplotnih kapaciteta bio povoljan za izgradnju i širenje mreža područnog grijanja. Postotak naplate usluga koji se danas ostvaruje je u porastu, no i dalje uglavnom dolazi do gubitaka koji su glavna prepreka tržišnom poslovanju i investiranju u kvalitetan razvoj. Tamo gdje je otežana naplata usluga od fizičkih osoba, javni i privredni subjekti su glavni oslonac ekonomskoj održivosti preduzeća daljinskog grijanja. Sistemi grijanja u RS-u su oslonjeni na vlastita kotlovska postrojenja. Mazut i ugalj su temeljna goriva. Poslovanje i mogućnosti ulaganja u rekonstrukciju i razvoj i ovdje zavise od postotka naplate usluga, koji je varijabilan. Djelovanje sistema daljinskog grijanja u BiH uslovljeno je i raspoloživim gorivom [6]. Toplotne pumpe su rješenje kako u okolinskom tako i u finansijskom smislu. Primjenom hibridnih sistema, to jeste kombinovanjem različitih tehnologija obnovljivih izvora, pa čak i tradicionalnih načina proizvodnje energije, može se podići pouzdanost sistema reducirajući otisak ugljen dioksida. Izraz “hibridni sistem” za toplotne pumpe je često povezan sa prisustvom različitih izvora toplote, ciljajući na smanjenje disbalansa između proizvedene i iskorištene toplotne energije tokom godine [7]. Cilj ovog rada je utvrđivanje opravdanosti korištenja toplotne pumpe, koja bi koristila vodu kao niskotemperaturni izvor u sistemu daljinskog grijanja, u kombinaciji sa gasnim kotlom.

2. TRENUTNO STANJE SISTEMA DALJINSKOG GRIJANJA U VOGOŠĆI

Broj domaćinstava povezanih na centralno grijanje u Vogošći je 575 (što je 8,5% od ukupnog broja domaćinstava 6.782 na području cijele općine). Površina naseljenog područja koje se grije na centralno grijanje je 33.128 m². Na slici 1. je geografski prikaz analiziranog sistema, ogranci distribucije, toplotne podstanice i grijani objekti. Sa slike se može primijetiti veliki potencijal za proširenje sekundarne distributivne mreže.



Slika 1. Distributivna mreža, toplotne podstanice i grijani objekti u Vogošći

Unutar kotlovnice nalazi se pet kotlova. Ukupni instalirani kapacitet postrojenja je 92.44 MW. Dva parna kotla sa instaliranim kapacitetom od 23 MW su trenutno u funkciji, od kojih jedan služi kao rezerva. Zbog velikih gubitaka u sistemu, ukupna količina proizvedene toplote u svakoj od posmatranih godina je dva do tri puta veća od iskorištene toplote, što se može vidjeti u tabeli 1. Tabela pokazuje disbalans između količine proizvedene i preuzete toplotne energije, te pokazuje predimenzionisanost kotlova i distributivne mreže u odnosu na potrošnju koju pokrivaju, te gubitke u distributivnoj mreži koja je potpuno zastarjela i porozna [4].

Tabela 1 . Pregled proizvedene i iskorištene toplotne energije tokom perioda 2017.-2020. u MWh [4]

Kategorija potrošača	2017		2018		2019		2020	
	Proizvedeno	Preuzeto	Proizvedeno	Preuzeto	Proizvedeno	Preuzeto	Proizvedeno	Preuzeto
Domaćinstva	-	1.360,5	6.154,5	1.409,7	6.938,6	2.657	8.040	2.586
Privredni subjekti	-	2.443,5	5.920,6	5.104	4.056,1	3.900	5.360,1	4.661
Institucije	-	964,6	2.737,4	627	3.019,4	1.044,4	2.302,2	944,4
UKUPNO	12.086	4.768,5	14.812,5	7.140,7	14.014,1	7.601,4	15.702,3	8.191,4
Gubici (MWh)	7.317		7.671,8		6.413		7.511	
Postotak gubitaka u odnosu na proizvedenu toplotu	60,5%		51,8%		45,8%		47,8%	

Siromašan odnos između proizvedene i iskorištene toplote je posljedica inertnog proizvodnog sistema bez ikakve automatizacije, to jeste proizvodnja se mora odvijati bez obzira na količinu potrebne toplotne energije, posebice kada se radi o domaćinstvima i institucijama gdje su najveći gubici uzrokovani dužinom rute distribucije i gubitaka u distribucionom sistemu. U tabeli 2. se vidi veza između prihoda od prodaje toplotne energije i troškova kompanije.

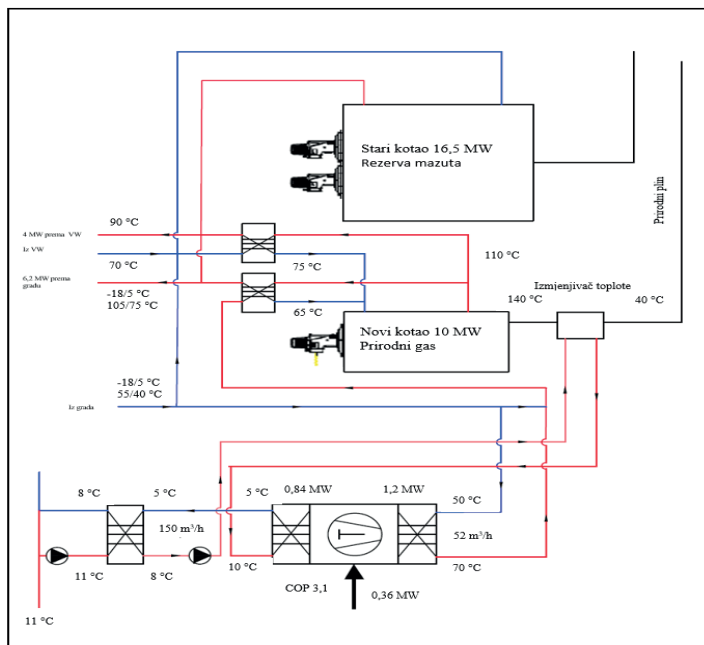
Tabela 2. Poređenje troškova za gorivo, cijena goriva i prihoda tokom godina [4]

	Parametar	2017	2018	2019	2020
1.	Cijena goriva (KM/kg)	1,48	1,73	1,67	1,67
2.	Ukupni troškovi za gorivo (KM)	2.318.016	2.783.416	2.666.537	3.049.147
3.	Prihod od prodaje toplotne energije (KM)	1.223.968	1.756.104	1.697.250	1.908.605
4.	Razlika: 2 - 3 (KM)	1.094.048	1.027.312	969.287	1.140.542
5.	Odnos 3/2	0,53	0,63	0,64	0,63
6.	Prihodi - pomoć iz budžeta Kantona Sarajevo	1.149.135	1.899.183	4.052.164	2.925.000

Veza između prihoda od prodaje toplotne energije i troškova kompanije “BAGS Energotehnika” za kupovinu mazuta je jako nepovoljna. Red 4. u tabeli pokazuje koliko je velika razlika između ova dva parametra, to jeste koliko su troškovi za kupovinu mazuta u svakoj godini veći nego prihodi kompanije od prodaje toplotne energije. Red 5. u tabeli pokazuje nepovoljan odnos između ukupnih prihoda od grijanja i troškova za gorivo koji u 2020. iznosi 0,63. Trebao bi biti dosta iznad 1 tako da kompanija može pokriti i ostale troškove proizvodnje od svojih prihoda. Da bi se nadoknadio ovaj očit problem u poslovanju, Vlada Kantona Sarajevo izdvaja značajna sredstva iz budžeta svake godine (red 6) i omogućuje kompaniji da nabavi neophodne količine goriva. Trenutni troškovi goriva (mazuta) za pokrivanje toplotnih potreba za grijanjem dobijeni su uzimajući u obzir cijenu mazuta koja iznosi 1,86 KM/kg, to jeste 1.860 KM/t s PDV-om [4] i dostupne godišnje potrošnje goriva za 2021. godinu jer se smatra da se potrošnja goriva nije značajno promijenila i oni iznose 3.201.060 KM godišnje i taj iznos je viši u odnosu na prethodnu godinu zbog viših cijena goriva i povećanja toplotnih potreba. Pored navedenih troškova za mazut, postojeći sistem proizvodnje energije također ima troškove za električnu energiju kao jedan od operativnih troškova. Procijenjeno je da oni predstavljaju oko 7-8% ukupnih troškova, dok troškovi za mazut predstavljaju oko 92-93% [4]. Ako je procjena tačna, onda troškovi za električnu energiju u postojećem sistemu proizvodnje iznose oko 278.320 KM u godini. Dakle, ukupni godišnji troškovi za pokrivanje potreba za energijom u postojećem sistemu iznose 3.479.380 KM godišnje. Također, značajna količina vode je izgubljena zbog veoma lošeg stanja postojećih cijevi za dovod vode iz Peračkog vrela. Iskorišteno je otprilike samo oko 40% vode [4]. Analizirane su i trenutne emisije ugljen dioksida. Direktno emisije ugljen dioksida koje nastaju na lokaciji neposrednog korištenja energije, kao posljedica sagorijevanja fosilnih goriva u stacionarnim energijskim postrojenjima za ovaj slučaj iznose 4.930 tona godišnje. Usljed korištenja električne energije iz javne mreže, indirektno emisije ugljen dioksida direktno zavise o koeficijentu emisije mreže i iznose 518 tona godišnje. Ukupne emisije bi iznosile 5.448 tona godišnje.

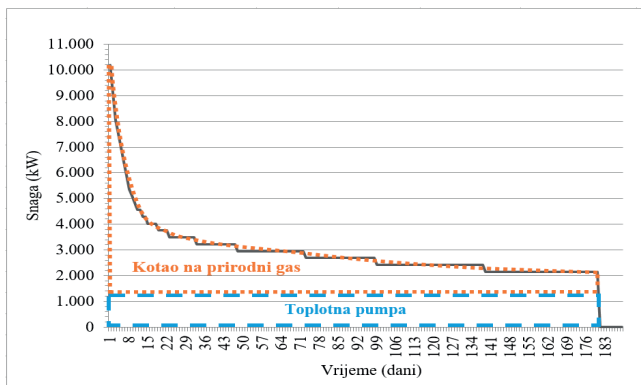
3. PRIMJENA TOPLOTNE PUMPE U SISTEMU DALJINSKOG GRIJANJA U VOGOŠĆI

Koncept koji se predlaže u ovom slučaju je ugradnja toplotne pumpe koja će biti direktno povezana na sistem daljinskog grijanja. Izabrana je toplotna pumpa voda-voda jer će u ovom slučaju iskorištavati toplotu od pitke vode koja prolazi kroz već postojeći sistem distribucije od podzemnog izvora-Peračko vrelo. Protok kroz toplotnu pumpu bi bio oko 52 m³/h za temperaturni režim 70/50 °C [4] prema toplotnim podstanicama, to jeste prema krajnjim potrošačima, pa bi snaga toplotne pumpe iznosila 1,2 MW. Predloženi koncept s ugradnjom toplote pumpe prikazan je na slici 2.



Slika 2. Shema novog sistema sa toplotnom pumpom [4]

Za namjenu zaštite toplotne pumpe od mogućih oštećenja usljed korištenja toplotnog izvora, predviđeno je da novo postrojenje s toplotnom pumpom bude razdvojeno izmjenjivačima toplote s obje strane, sa strane izvora i ponora. Srednji ciklus bi se sastojao od mješavine vode i netoksičnog fluida koji ne leđi da bi se osiguralo da ne dođe do zaleđivanja cijevi u bilo kojem trenutku. Nakon prenosa toplote proizvedene iz toplotne pumpe do toplotnih podstanica u Vogošći, ohlađena voda bi se vraćala u sistem vodosnadbijevanja. Planirana je realizacija hibridnog sistema sa toplotnom pumpom u kombinaciji sa gasnim kotlom. Na osnovu dobijenih snaga za grijanje, za sezonu grijanja u trajanju od 180 dana, formirana je kriva trajanja ukupnog toplotnog opterećenja, s podacima poredanim od najvećeg ka najmanjem i prikazana je na slici 3.



Slika 3. Prikaz udjela toplotne pumpe i kotla na gas na krivoj trajanja

Ustanovljeno je da kada bi projekat bio realizovan u punom kapacitetu, omogućio bi kompaniji BAGS Energotehnika da eliminiše mazut iz procesa proizvodnje, s uštedama do 5.500 MWh toplotne energije, što znači kada bi novi sistem počeo raditi imao bi efikasnost koja bi omogućila proizvodnju ne više od 10.570 MWh i isporučenu toplotnu energiju potrošačima oko 8.300 MWh [4]. Planirana količina proizvedene toplote (10.570 MWh) će biti proizvedena u kombinaciji toplotne pumpe i kotla na gas (slika 3.). Potrebno je naglasiti da zbog promjene potreba za energijom može biti ugrađeno više gasnih kotlova. Uzevši u obzir snagu toplotne pumpe od 1,2 MW, na osnovu krive trajanja dobijena je količina toplote koja se proizvodi iz toplotne pumpe na godišnjem nivou i iznosi 4.800 MWh godišnje. Ostali dio potrebne toplotne energije bi se proizvedio iz gasnog kotla snage 9 MW. Budući da je planirala proizvedena količina toplote 10.570 MWh, gasni kotao bi proizvedio 5.770 MWh godišnje. Bazirano na analizama distributivne mreže i toplotnih podstanica [4], procijenjeno je da mjere energetske efikasnosti (zamjena i optimizacija cijevi, automatizacija i daljinski nadzor podstanica, itd.) mogu sačuvati najmanje 5.500 MWh toplotne energije (u svrhu poređenja-ukupna isporučena toplotna energija određena mjerenjem u toplotnoj podstanici u Vogošći u 2019. godini je bila oko 4.200 MWh).

4. REZULTATI ANALIZA

U svrhu poređenja postojećeg i novog sistema u tabeli 3. predstavljeni su relevantni podaci za poređenje. U troškove električne energije ubrojani su samo oni troškovi koji se koriste kao „gorivo“ za pogon toplotne pumpe.

Tabela 3. Podaci relevantni za poređenje postojećeg i novog sistema za pokrivanje potreba za energijom općine Vogošća

Sistem	Troškovi goriva (KM/a) (1)	Troškovi električne energije (KM/a) (2)	Ukupni troškovi energije za pokrivanje potreba za energijom (1)+(2)=(3)	Direktne emisije ugljen dioksida (t/a) (4)	Indirektne emisije ugljen dioksida (t/a) (5)	Ukupne emisije ugljen dioksida (t/a) (4)+(5)=(6)	Potrebna proizvedena toplotna energija (MWh/a) (7)
Postojeći sistem	3.201.060	0*	3.201.060	4.930	518	5.448	16.070
Novi sistem bez obnove	1.357.337	242.580**	1.599.917	2.265	1.317	3.582	16.070
Novi sistem s obnovom	694.928	242.580	937.508	1.288	1.317	2.605	10.570

*Zanemareni troškovi za električnu energiju kao jedan od operativnih troškova.

**Bez uračunatih troškova za održavanje

Iz table 3. se vidi koliko obnova distributivnog sistema, podstanica i ostalih komponenata sistema utiče na same troškove za gorivo, jer bi za ovakav sistem potrebna proizvodnja toplotne energije bila 10.570 MWh, umjesto sadašnjih potreba od 16.070 MWh, jer bi gubici u distribuciji bili svedeni na minimum. Godišnje uštede u troškovima za gorivo u vrijednosti od 1.601.143 KM

godišnje su značajne i bez obnove kompletnog sistema, dok su znatno značajnije sa obnovom i iznose 2.263.552 KM godišnje. Samim time što bi se nakon kompletne obnove sistema proizvodilo manje toplotne energije, bile bi smanjene i emisije ugljen dioksida. Značajno bi bile smanjene direktne emisije ugljen dioksida prelaskom na prirodni gas sa 4.930 tona godišnje na 2.265 tona godišnje, odnosno 1.288 tona godišnje s obnovom distributivnog sistema. Samim time značajno su smanjene i ukupne emisije ugljen dioksida. Indirektne emisije su veće za novi sistem (1.317 tona godišnje) jer se električna energija koristi za rad toplotne pumpe. Urađena je i finansijska analiza projekta na neke od osnovnih uticajnih parametara. Važna odrednica za pokretanje projekta je period povrata investicije (PP), budući da duži periodi povrata investicije nisu poželjni za investicijske pozicije. Period povrata investicije je vrijeme koje je kompaniji potrebno za povrat troškova prvobitnog ulaganja u projekt, kada je neto novčani tok jednak nuli. Period povrata investicije za ovaj projekat dobijen je iz sljedećeg izraza:

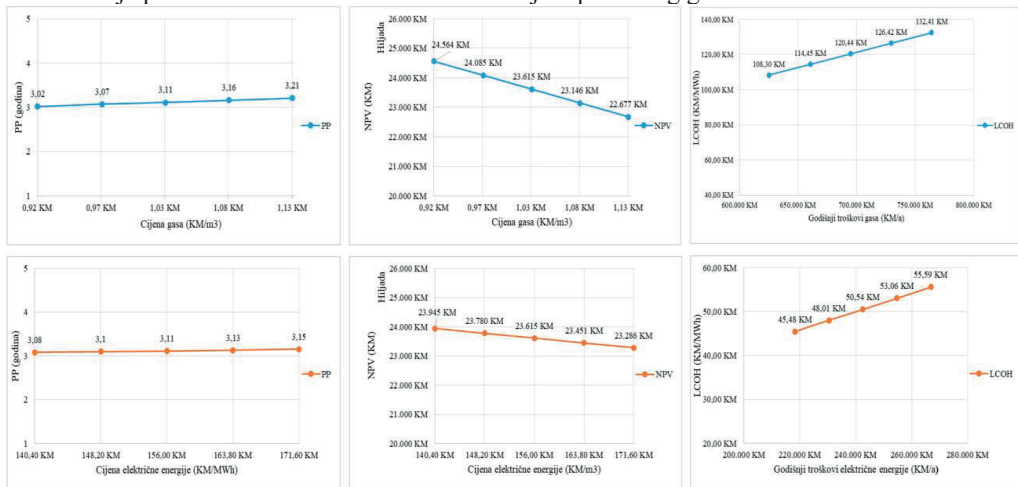
$$PP = \frac{\text{Investicija}}{\text{Godišnje uštede}} = \frac{7.014.423 \text{ KM}}{2.253.802 \frac{\text{KM}}{\text{a}}} = 3,11 \text{ godina} \quad \dots(1)$$

Neto sadašnja vrijednost projekta (NPV) je razlika između sadašnje vrijednosti neto novčanog prihoda i sadašnje vrijednosti investicije i ona je bolji pokazatelj isplativosti ulaganja u projekat u odnosu na jednostavni period povrata jer uzima u obzir vremensku vrijednost novca. Što je neto sadašnja vrijednost projekta veća to je projekat isplativiji i primamljiviji za investitore. Neto sadašnja vrijednost investicije je pozitivna i prihvatljiva za istu investiciju i uštede, te ekonomski vijek trajanja od 20 godina i diskontnu stopu 4% i iznosi:

$$NPV = B \cdot \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} - I = 2.253.802 \frac{\text{KM}}{\text{a}} \cdot \frac{1 - (1 + 0,04)^{-20}}{0,04} - 7.014.423 \text{ KM} \quad \dots(2)$$

$$NPV = 23.615.482 \text{ KM}$$

Na slici 4. je prikazana ovisnost PP-a i NPV-a o cijeni prirodnog gasa.



Slika 4. Analiza uticaja promjene cijene električne energije i prirodnog gasa na PP, NPV i LCOH

S dijagrama na slici 4. se vidi da bi najprihvatljiviji slučaj za investiranje bio onaj s najnižom cijenom gasa i električne energije. U slučaju i poskupljenja, PP i NPV su prihvatljivi. Nivelirani trošak proizvodnje toplotne energije (LCOH) jednak je omjeru ukupnih troškova i ukupne proizvedene toplotne energije tijekom životnog vijeka postrojenja i označava prosječnu vrijednost

troška proizvodnje toplotne energije svedenu na životni vijek postrojenja. U proračunu u obzir su uzeti samo troškovi za gorivo, zbog nedostatka ostalih podataka o godišnjim troškovima rada i održavanja. Na osnovu troškova za mazut i proizvedene toplotne energije LCOH za postojeći sistem iznosi 199,2 KM/MWh, dok je za obnovljeni sistem ukupni LCOH 88,7 KM/MWh uzimajući u obzir troškove za prirodni gas i električnu energiju i proizvedenu toplotnu energiju. Promjena cijene električne energije i prirodnog gasa direktno utiče na LCOH.

5. ZAKLJUČAK

Toplotna energija iz sistema daljinskog grijanja dobijena iz fosilnih goriva, zajedno s niskim nivoima energetske efikasnosti, rezultuje visokim nivoom zagađenja vazduha. Također, dodatni problem je rast cijena goriva i prijetnje zatvaranjem slavina za naftu ili gas. Dobro rješenje za SDG je upotreba obnovljivih izvora energije. S obzirom da ne bi bilo isplativo dimenzionisati toplotnu pumpu koja pokriva sve potrebe za toplotnom energijom općine Vogošća, jer bi veći dio godine sistem bio predimenzionisan, uz toplotnu pumpu snage 1,2 MW izvršen je izbor kotla na gas snage 9 MW kako bi se zadovoljile vršne toplotne potrebe. Pokazano je da su uštede za gorivo u vrijednosti od 1.591.393 KM godišnje značajne čak i bez obnove distributivnog sistema, a dosta značajnije uštede u gorivu u vrijednosti od 2.253.802 KM godišnje govore o značaju obnove distributivnog sistema u svrhu smanjenja gubitaka toplote. Budući da toplotne podstanice nisu automatizovane, bitno je u sklopu obnove uložiti u ugradnju frekventnih regulatora kako pumpe ne bi bespotrebno uvijek radile punom brzinom. Buduća investicija u ovakav sistem bi mogla biti i zamjena gasa sa vodikom ili biogorivom. U novom sistemu grijanja značajne su i uštede u ukupnim emisijama ugljen dioksida u vrijednosti od 1.866 tona godišnje bez obnove, odnosno 2.843 tona godišnje sa obnovom. Prije svih investicija potrebno je analizirati stanje grijanih objekata (izolaciju) i sanirati sve gubitke toplote na objektima, to jeste poboljšati energetske efikasnosti objekata. Također, budući da u Vogošći postoji veliki broj domaćinstava koja nisu priključena na sistem daljinskog grijanja, fokus bi trebao biti na proširivanju mreže daljinskog grijanja u cilju smanjenja korištenja uglja od strane individualnih korisnika. Mjera poboljšanja koja bi trebala biti uzeta u razmatranje je lokalno mjerenje potrošnje na kojem bi se temeljila buduća naplata isporučene toplotne energije prema stvarnoj potrošnji. Uzimajući u obzir sve navedeno, opravdano je ulaganje u novi sistem koji je analiziran u ovom radu

6. REFERENCE

- [1] Priručnik za upravljanje energijom u gradovima, kantonima i općinama, Morvaj Z., Čačić G., Lugarić L., BiH, 2011.
- [2] Tipologija stambenih zgrada Bosne i Hercegovine, Arnautović-Aksić D., Burazor M., Delalić N., Gajić D. i drugi, Sarajevo, 2016.
- [3] "Energetska i klimatska politika Bosne i Hercegovine do 2030" Knežević A., Tatić K., Husika A., Stipović M., Suljić V., REIC 2019. strana 9.
- [4] EBRD Western Balkans (ReDEWeB) Programme: Sarajevo Canton Feasibility Study - KJKP Toplane-Sarajevo, Final report, 2022.
- [5] Najbolje prakse i studije slučaja za poboljšanje energetske efikasnosti u industriji, uvodne smjernice za kreatora politika, Institut za privredni inženjering Zenica, Imamović N., Mujičić S., Zenica, 2023.
- [6] Nacrt konačnog izvještaja - Studija energetskog sektora u Bosni i Hercegovini, Modul 9 - daljinsko grijanje, Krstulović V., Petrić M., Maljković D., Jandrilović N., 2008.
- [7] Lira, L., (2008), Hybrid heating and cooling system optimisation with TRNSYS, University of Strathclyde Engineering, Department of mechanical engineering, Pages 1-3.

ANALIZA AMBIJENTALNIH KONCENTRACIJA BENZENA I TOLUENA U ZRAKU ZENIČKE KOTLINE

ANALYSIS OF AMBIENT BENZENE AND TOLUENE CONCENTRATIONS IN THE AIR OF ZENICA VALLEY

Dr. sc. Vehid Birdahić
Mr. sc. Halim Prcanović
Mr. sc. Mirnes Duraković
Mr. sc. Sanela Beganović

Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet, Institut "Kemal Kapetanović", Zenica

REZIME

U radu su prikazani rezultati i data analiza koncentracija benzena-C₆H₆ i toluena-C₇H₈ kao vrlo otrovnih (kancerogenih) polutanata, u ambijentalnom zraku zeničke kotline u zimskom periodu (novembar 2022.g.- januar 2023.g). Nakon kalibracije analizatora za uzorkovanje, izvršeno je mjerenje na dvije različite lokacije, i to: automatske mjerne stanice (AMS) Tetovo 3 i Radakovo 2. Izmjerene su maksimalne ambijentalne koncentracije C₆H₆ (44,1 µg/m³, 7,8 µg/m³) i C₇H₈ (13,0 i 10,4 µg/m³), koje višestruko prelaze prosječnu godišnju graničnu vrijednost (GV) koncentracije od 5 µg/m³. Jasno i nedvosmisleno je utvrđeno da je na AMS Tetovo 3 (industrijsko područje), koncentracija C₆H₆ i C₇H₈ značajno veća u odnosu na mikrolokaciju gdje ne postoji stalan izvor ovih emisija na AMS Radakovo 2 (urbano područje). Izmjerene vrijednosti pokazuju srednju koncentraciju C₆H₆ na AMS "Tetovo3" od 3,6 a C₇H₈ od 4,2 µg/m³, na AMS "Radakovo2" koncentracija C₆H₆ je iznosila 1,3 a C₇H₈ 3,2 µg/m³. Poboljšanje postojećeg stanja moguće je redovnom kontrolom izvora emisija koje proizvode C₆H₆ i C₇H₈, te uspostavljanjem kontinuiranog monitoringa na svim preostalim mjernim stanicama u zeničkoj kotlini.

Ključne riječi: benzen, toluen, zagađujuće materije u zrak.

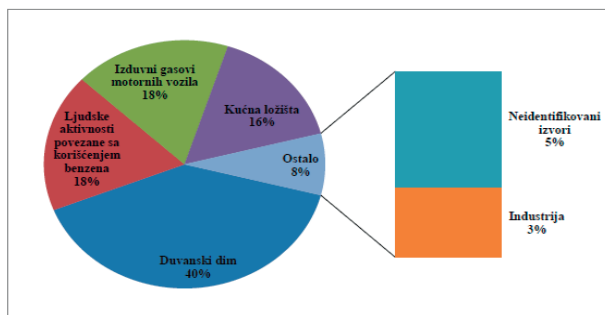
SUMMARY

The paper presents the results and analysis of the concentrations of benzene-C₆H₆ and toluene-C₇H₈ as highly toxic (carcinogenic) pollutants in the ambient air of the Zenica basin in the winter period (November 2022 - January 2023). After calibration of the sampling analyzer, measurements were made at two different locations, namely: automatic measuring stations (AMS) Tetovo 3 and Radakovo 2. The maximum ambient concentrations of C₆H₆ (44.1 µg/m³, 7.8 µg/m³) were measured. and C₇H₈ (13.0 and 10.4 µg/m³), which many times exceed the average annual concentration limit value (GV) of 5 µg/m³. It was clearly and unequivocally established that at AMS Tetovo 3 (industrial area), the concentration of C₆H₆ and C₇H₈ is significantly higher compared to the microlocation where there is no permanent source of these emissions at AMS Radakovo 2 (urban area). The measured values show a mean concentration of C₆H₆ at AMS "Tetovo3" of 3.6 and C₇H₈ of 4.2 µg/m³, at AMS Radakovo2 the concentration of C₆H₆ was 1.3 and C₇H₈ 3.2 µg/m³. Improvement of the current situation is possible by regular control of sources of emissions that produce C₆H₆ and C₇H₈, and by establishing continuous monitoring at all remaining measuring stations in the Zenica basin.

Key words: benzene, toluene, air pollutants.

1. UVOD

Određivanje ambijentalne koncentracije benzena i toluena u zeničkoj kotlini od posebnog je značenja, jer se na području grada uz individualna kućna ložišta, saobraćaj nalazi i veliki broj industrijskih izvora emisija. Grad Zenica se nalazi u kotlini okruženoj brdima i do 1000 m visine, pa su unutar kotline slaba zračna strujanja. Prisutnost štetnih organskih materija na području grada Zenice je povremeno mjereno bez obzira na potencijalne izvore emisija iz industrijskih postrojenja gdje su zabilježene visoke vrijednosti policikličkih aromatskih ugljikovodika u uzorcima lebdećih čestica [1]. Industrijska proizvodnja je glavni izvor ovih polutanata u okolišu, a njegovi nivoi mogu se povećati putem ispušnih plinova motornih vozila i isparavanjem iz rezervoara na benzinskim pumpama [2]. Mjerenjima je pokazano da je u Evropi srednja godišnja vrijednost koncentracije benzena najniža u urbanim djelovima Kopenhaga (oko $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dok u urbanim djelovima Atine srednja godišnja koncentracije benzena iznosi $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [3]. Važan faktor je i prosječna godišnja proizvodnja o kojoj ovise količine emitiranih zagađujućih materija u okoliš što je direktno povezano s količinom i vrstom zagađujuće materije koja može dospjeti u okoliš, a jednako tako su važni i klimatski uslovi lokacije koji utječu na zagađenost štetnim materijama iz zraka u neposrednoj blizini izvora ili pak njihov transport zračnim strujama na manju ili veću udaljenost od izvora [4]. Značajan izvor ekspozicije benzena predstavljaju kućna ložišta, odnosno korištenje peći na uglj i drva u individualnim domaćinstvima [5]. Za benzen je utvrđeno da predstavlja značajnu komponentu sagorijevanja drveta (10-20% ukupnih nemetanskih ugljovodika) [5].



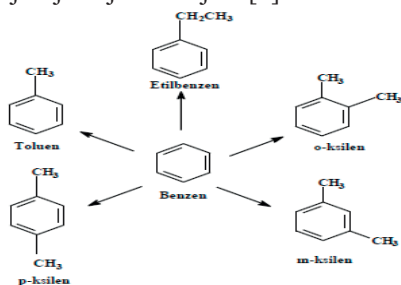
Slika 1. Učešće izvora emisije i izloženost opće populacije benzenu u SAD [5].

Na slici 1. prikazana je komparacija emisije i izloženost benzenu. Osnovni razlog što tako mali izvor emisije ostvaruje tako veliki efekat predstavlja direktan tip izloženosti. Prema Volasu jedna cigareta emituje količinu od $55 \mu\text{g}$ benzena sa blizu 100% uticaja na pušača, dok je benzen iz industrijskih i mobilnih izvora dispergovan u atmosferi [5]. Zbog toga je važan pristup uzorkovanju i procjeni doprinosa različitih izvora emisija koji su odgovorni za pojavu visokih koncentracija benzena i toluena u zraku zeničke kotline.

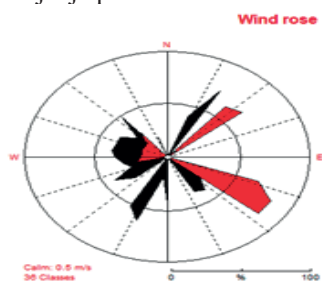
2. TOKSIČNOST BENZENA I TOLUENA PREMA METEOROLOŠKIM UVJETIMA

Skupini hlapljivih organskih spojeva pripadaju aromatski ugljikovodici: benzen, toluen, etilbenzen i izomeri ksilena (o-, m-, p-), a njihova skraćenica je BTEX. U okolišu su glavni izvor izloženosti BTEX-u ispušni plinovi automobila i duhanski dim. Pri sobnoj temperaturi i atmosferskom pritisku BTEX su tekućine bez boje, karakterističnog mirisa te imaju nisko vrelište i visok pritisak para. Zbog specifičnih fizičko-hemijskih svojstava primjenu su pronašli kao organska otapala [6]. Benzen- C_6H_6 , je najjednostavnije aromatično jedinjenje i predstavlja šestočlani prsten sa tri konjugovane dvostruke veze s pragom mirisa od 1,5 ppm [7]. Najveću opasnost za ljudski organizam ima aromatski spoj-benzen, čija povećana

koncentracija u urbanim područjima uzrokuje porast oboljelih od leukemije (prema Svjetskoj zdravstvenoj organizaciji cjeloživotna izloženost koncentraciji benzena od 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ uzrokuje leukemiju kod 6 od milion ljudi). Benzen može uzrokovati akutne i hronične učinke. Kod akutnog trovanja dolazi do pospanosti, vrtoglavice, glavobolje, zamagljenog vida, poremećaja rada srca, oštećenja jetre i bubrega te mučnine. Prije pojave prvih simptoma dolazi do razdoblja veselog raspoloženja. Udisanje para koncentracije 2 % u razdoblju 5-10 minuta izaziva smrt, a pare i tekućina benzena nadražuju oči. Učestalim izlaganjem malim količinama C_6H_6 javljaju se simptomi kao što su glavobolja, gubitak apetita, umor, pospanost, psihološke smetnje te bolesti krvnog sistema (oštećenje koštane srži, anemija i dr.). Benzen u doticaju s kožom može izazvati sušenje, upalu, dermatitis, a postoji i mogućnost pojave plikova na koži. Povećane koncentracije benzena imaju kancerogeni učinak i genotoksični utjecaj na ljudsko tijelo [8]. Strukturne formule BTEX jedinjenja prikazane su na slici 2.



Slika 2. Strukturne formule BTEX jedinjenja [6]



Slika 3. Ovisnost nivoa koncentracije benzena o smjeru vjetra za period mjerenja

Industrijska postrojenja koja se nalaze u južnom dijelu zeničke kotline su metalurška postrojenja i stambena naselja koja gravitiraju oko industrijske zone. Južni dio zeničke kotline odnosno položaj južne industrijske zone u odnosu na grad Zenicu, gdje je prosječna brzina vjetra u zeničkoj kotlini, dominiraju vjetrovi iz pravca juga (S) a potom iz jugozapada (SW) [9]. Očigledno je da industrijska zona nije postavljena prema pravilima prostornog planiranja. Za zeničku kotlinu je karakteristična dnevna cirkulacija zraka. Vjetar noću ima smjer iz pravca S-SW i to je vjetar sa južnih obronaka zeničke kotline (slika 3). Tokom dana sunce zagrijava površinu koja postepeno započinje proces vertikalnog mješanja i time uništava noćnu inverziju do podneva i omogućuje vertikalnu disperziju nakupljenih polutanata u prizemnom sloju troposfere [9]. U tabeli 1. dat je pregled prosječnih vrijednosti, te važnijih meteoroloških parametara sa meteorološke stanice Zenica za period mjerenja.

Tabela 1. Pregled vrijednosti važnijih meteoroloških parametara

Period	Novembar							Broj dana sa padav., $\geq 0,1$ mm
	Pritisak zraka, mb	Temp. zraka, $^{\circ}\text{C}$	Relativna vlažnost zraka, %	Max. temp. zraka, $^{\circ}\text{C}$	Min.temp. zraka, $^{\circ}\text{C}$	Kvalifik.dana		
						Normalno	Toplo	
	981,9	2,1	91,4	13,6	-1,1	25	6	9
Period	Decembar							Broj dana sa padav., $\geq 0,1$ mm
	982,5	5,4	90,5	14,9	0	21	10	12

3. MJERNE STANICE, METODE I ANALIZATOR ZA UZORKOVANJE BTEX-A

3.1. Mjerne stanice

U periodu mjerenja koncentracija BTEX-a koja su izvršena od 31.10.2022 - 31.12.2022. godine na dvije automatske mjerne stanice (AMS) i to: AMS "Tetovo"- industrijsko područje (Tetovo3) i AMS "Radakovo"- urbano područje (Radakovo2). Izbor mikrolokacije se izvršio na osnovnu zahtjeva koj su dati u Prilogu I Odjeljak C Pravilnika o načinu vršenja

monitoringa kvaliteta zraka i definiranju vrsta zagađujućih materija, graničnih vrijednosti i drugih standarda kvaliteta zraka („Sl. novine FBiH“ broj 1/12, 50/19 i 3/21). Podaci o mjernim stanicama su dati u tabeli 2, a mikrolokacije mjernih stanica date su na slici 4.

Tabela 2. Podaci o mjernim stanicama za uzorkovanje

Naziv	Kantonalna mreža za kontinuirani monitoring kvaliteta zraka u Ze-do kantonu				
Tip mreže-Institucija	Lokalna -UNZE OJ Institut „Kemal Kapetanović“ u Zenici				
AMS	Ime stanica	Klasif. stanice	Geogr.dužina	Geogr. širina	Nadm.visina
TETOVO	Tetovo3	Industrijska	44° 13' 32"	17° 53' 28"	337 m.n.v
RADAKOVO	Radakovo2	Gradska	44° 11' 43"	17° 55' 55"	340 m.n.v

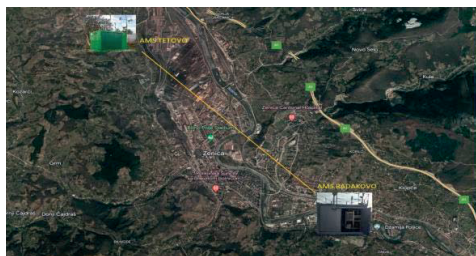
Automatska mjerna stanica „Tetovo” se nalazi u neposrednoj blizini industrijske zone u kojoj se nalaze metalurška postrojenja a AMS "Radakovo" je smještena u urbanoj zoni grada Zenica i namjenjena je za kontinuirani monitoring kvaliteta zraka. Obje AMS opremljene su uređajima za mjerenje koncentracija 11 (jedanaest) polutanata u zraku, sistemom za uzorkovanje ambijentalnog zraka u svrhu njegove hemijske analize i uređajima za mjerenje meteoroloških parametara. Zračna udaljenost između ovih mjernih stanica iznosi 4,66 km.

3.2. Metode mjerenja

Uzorkovanje koncentracija BTEX-a je izvršeno standardnom metodom BAS EN 14662-3:2017 Ambijentalni zrak- Standardna metoda mjerenja koncentracija- Dio 3: Automatsko uzorkovanje pumpom sa "in situ" gasnom hromatografijom, prema Pravilniku o načinu vršenja monitoringa kvaliteta zraka i definiranje vrsta zagađujućih materija, graničnih vrijednosti i drugih standarda kvaliteta zraka („Sl. novine FBiH“, br.01/12, 50/19 i 3/21) odjeljak B, granična i tolerantna vrijednost, te granica tolerancije za zaštitu zdravlja ljudi. Umjeravanje analizatora za uzorkovanje koncentracije benzena je izvršeno sukladno mjeriteljskim normama iz područja mjerenja koncentracija plinova u vanjskom zraku.

3.3. Analizator za uzorkovanje

Automatske mjerne stanice posjeduju analizator za uzorkovanje koncentracija BTEX u ambijentalnom zraku AMA INSTRUMENTS GC-5000, prikazan na slici 5. Navedeni analizatori uzorkuju koncentraciju benzena u $\mu\text{g}/\text{m}^3$ svaku minutu. Izmjereni podaci koncentracije BTEX preračunavaju se u satne prosjeke.



Slika 4. Prikaz mjernih stanica za mjerenje koncentracija benzena u zeničkoj kotlini[10]



Slika 5. Analizator AMA INSTRUMENTS GC-5000 za uzorkovanje koncentracije BTEX

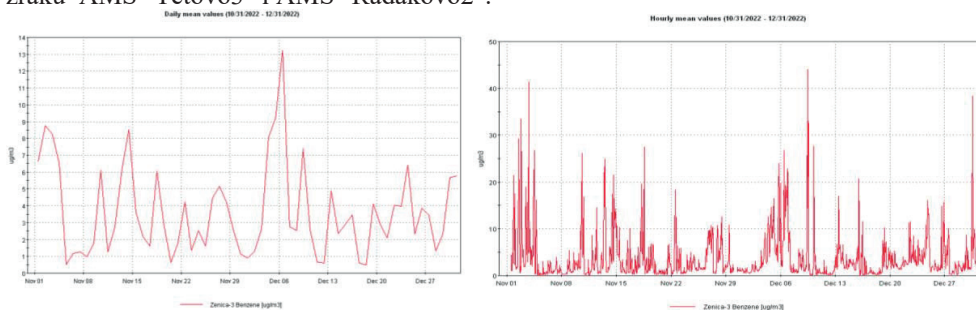
4. REZULTATI IZMJERENIH KONCENTRACIJA BTEX U ZRAKU

Obradeni rezultati izmjerenih koncentracija BTEX-a su prikazani tabelarno u navedenom periodu mjerenja pri čemu su obrađene i ostale koncentracije zagađujućih materija koje su izmjerene na mjernim stanicama. U tabeli 3. su prikazane izmjerene koncentracije zagađujućih materija u zrak sa AMS "Tetovo3" i "Radakovo2".

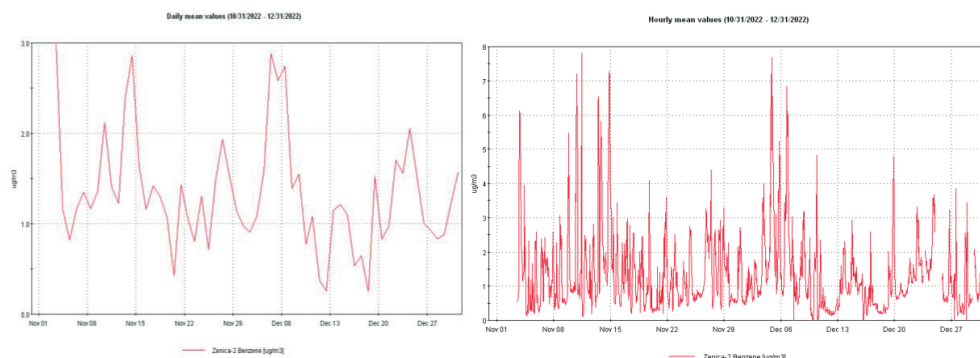
Tabela 3. Zbirni podaci koncentracija zagađujućih materija u zraku na automatskim mjernim stanicama „Tetovo3“ i "Radakovo2"

AMS	TETOVO		RADAKOVO	
Zagađujuća materija $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Benzen	Toluen	Benzen	Toluen
Minimalna satna koncentrac.	0,064	3,43	0,096	2,14
Maksimalna satna koncentrac.	44,1	13,0	7,8	10,4
Srednja vrijednost sat konc.	3,6	4,4	1,3	3,2
Maksimalna dnevna koncent.	13,2	6,3	3,0	4,9
Broj prekoračenja satne GV	306	276	26	49
Broj prekorač. dnevne GV	16	10	0	0

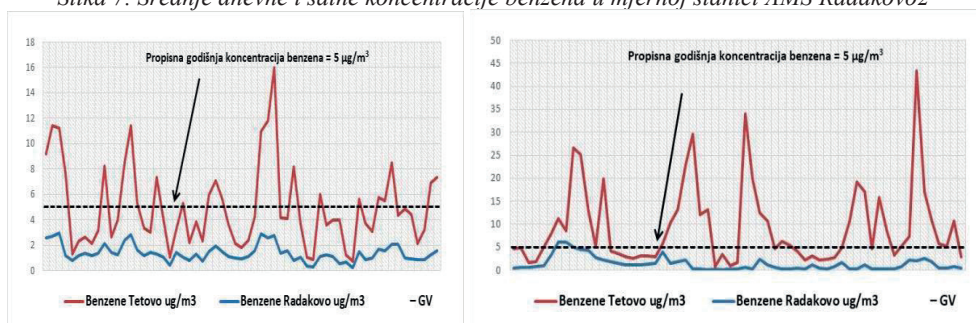
Na slikama 6. i 7. prikazane se srednje dnevne i satne vrijednosti benzena u ambijentalnom zraku AMS "Tetovo3" i AMS "Radakovo2".



Slika 6. Srednje dnevne i satne koncentracije benzena u mjernoj stanici AMS Tetovo3

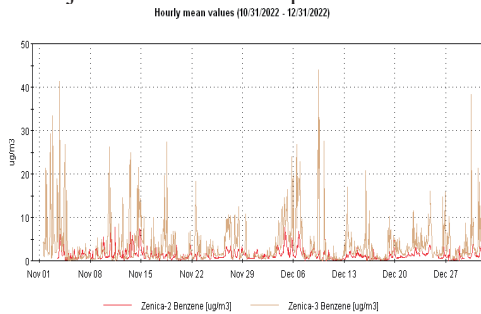


Slika 7. Srednje dnevne i satne koncentracije benzena u mjernoj stanici AMS Radakovo2

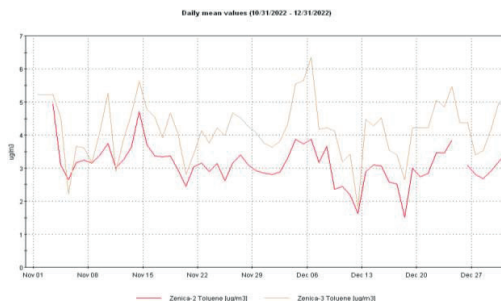


Slika 8. Zavisnost izmjerenih koncentracija benzena na dvije analizirane mjerne stanice

Na slici 8. vidljiva je međusobna zavisnost izmjerenih koncentracija benzena na istraživane dvije automatske mjerne stanice. Zavisnosti satnih i dnevnih koncentracija benzena i toluena na mjernim stanicama su prikazane na slikama 9 i 10.



Slika 9. Zavisnost satnih koncentracije benzena i toluena na mjernim stanicama



Slika 10. Zavisnost dnevne koncentracije benzena i toluena na mjernim stanicama

5. ZAKLJUČAK

Prema rezultatima istraživanja i analizi prikupljenih podataka može se zaključiti sljedeće:

- Vrijednosti meteoroloških parametara pokazuju da u periodu mjerenja benzena i toluena nije bilo temperaturnih inverzija.
- Prosječna dnevna koncentracija benzena na AMS "Tetovo3" je 3,6 a toluena 4,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, na AMS "Radakovo2" koncentracija benzena je iznosila 1,3 i toluena 3,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Maksimalna satna koncentracija benzena na AMS Tetovo je 44,1 i toluena je 13,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a na AMS Radakovo benzena 7,8 i toluena 10,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, koje značajno prelaze srednje godišnje GV (5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Analizom učestalosti satnih koncentracija benzena može se uočiti da se maksimalne satne koncentracije benzena (44,1; 41,3 i 38,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pojavljuju u noćnim satima od 20.00 do 24.00 h i ujutro oko 9.00 do 11.00 sati, što ukazuje na odvijanje industrijskih aktivnosti ali i individualna loženje u noćnim satima (eksplicitno jer stambeni objekti najčešće kao gorivo koriste ugalj i drvo a nalaze se u blizini AMS "Tetovo3").
- Zbog utvrđenih maksimalnih koncentracija benzena i toluena u svrhu sprječavanja kancerogenog učinka na ljude, predlaže se hitno uspostavljanje kontinuiranog monitoringa BTEX na svim AMS u gradu Zenica.
- S ciljem smanjenja utvrđenih maksimalnih satnih i prosječnih dnevnih koncentracija benzena i toluena u ambijentalnom zraku zeničke kotline, potrebno je redovno kontrolirati izvore emisije posebno u industrijskom području i pravovremeno izvještavati više nivoe.

6. LITERATURA

- [1] Mjerenje policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH) u uzorcima lebdećih čestica iz Zenice, Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb, 1989.
- [2] Maja B.: Sezonske varijacije koncentracije benzena u parku prirode Kopački Rit, Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2017.
- [3] Dragan M. Ugrinov, Aleksander M. Stojanov: Merenje zagađenja vazduha benzenom u gradu Pančevu, Zavod za javno zdravlje Pančevo, Hem. Ind. 65 (2) 211–217 (2011).
- [4] T. Sofilić: Ekotoksikologija, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2014.
- [5] D. Adamović: Model detekcije benzena, toluena, etilbenzena i ksilena u izduvnim gasovima motornih vozila primenom gasne hromatografije u funkciji procene zagađenja ambijentalnog vazduha, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 2014.
- [6] I. Kegalj: Procjena utjecaja lučkih procesa na okoliš formiranjem okolišnog indeksa, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet u Rijeci, 2015.
- [7] A. Sekar, G. K. Varghese and M.K. Ravi Varma: Analysis of benzene air quality standards, monitoring methods and concentrations in indoor and outdoor environment, Heliyon 5 (2019).
- [8] D. Poplašen: Aromatski ugljikovodici–izloženost i utjecaj na zdravlje sigurnost 57 (1) 65–67 (2015)
- [9] Akcioni plan zaštite kvaliteta zraka za područje Zeničko-dobojskog kantona, UNZE OJ Institut

“Kemal Kapetanović” u Zenici, 2020.

[10] Pravilnik o načinu vršenja monitoringa kvaliteta zraka i definiranju vrsta zagađujućih materija, graničnih vrijednosti i drugih standarda kvaliteta zraka („Sl. novine FBiH“ broj 1/12, 50/19 i 3/21).

[11] Godišnji izvještaj o kvalitetu zraka u Federaciji BiH za 2022. godinu, FHMZ.

THE IMPACT OF CBAM ON THE ENERGY SECTOR AND INDUSTRIAL DECARBONIZATION

Emina Pašić, bach.mech.
Nusret Imamović, prof.dr.sc.
University of Zenica, Faculty of Mechanical Engineering
Fakultetska 1, Zenica, Bosnia and Herzegovina

ABSTRACT

The implementation of the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) is a pivotal measure in the EU's climate policy, aimed at reducing CO₂ emissions and addressing "carbon leakage," which refers to the relocation of industries to countries with lower environmental standards. CBAM seeks to protect the competitiveness of European manufacturers while promoting a global transition towards more sustainable technologies. This paper examines CBAM's impact on the energy sector, including the pressures on fossil fuel usage and the shift towards renewable energy sources. It also explores the challenges faced by energy-intensive industries, such as steel and cement, in their transition to low-carbon technologies.

Keywords: CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), CO₂ emissions, energy sector, decarbonization)

1. INTRODUCTION

The Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) is an environmental policy tool designed to impose equivalent carbon costs on imported goods, ensuring that they face the same financial pressures as those produced within the European Union (EU). By applying this mechanism, the EU seeks to prevent "carbon leakage," a phenomenon where companies relocate production to countries with less strict climate regulations, undermining global decarbonization efforts [1]. CBAM is proposed, amongst various policy measures, to support a newly defined emissions reduction target of 55% from 1990's level by 2030 and reach carbon neutrality by 2050. Achieving this new climate ambition needs a substantial and rapid reduction in the current emissions quota [2]. CBAM has several key objectives, including reducing global CO₂ emissions, curbing carbon leakage, and encouraging industries outside the EU to adopt clean technologies and renewable energy sources. At present, the products covered under CBAM include cement, iron and steel, aluminum, fertilizers, electricity, hydrogen, and certain derivatives of these goods. The taxation of embedded emissions in iron, steel, aluminum, and hydrogen will focus solely on direct emissions, while other products will be taxed based on both direct and indirect emissions. These indirect emissions refer to emissions originating from the production of electricity used in the manufacturing of goods covered by this Regulation. Including indirect emissions would further enhance the environmental efficiency of CBAM and its ambition to contribute to the fight against climate change [3]. A study by the AFD Group in 2022 highlighted that smaller European trading partners, such as Bosnia and Herzegovina, could be particularly vulnerable due to their reliance on exporting CBAM-regulated products to the EU [4]. CBAM's introduction aligns

with the broader global push towards an energy transition—a shift from fossil fuels to cleaner, renewable energy sources. Both CBAM and the energy transition share a common objective: addressing climate change through decarbonization. The mechanism not only serves to protect European industries from unfair competition but also incentivizes foreign producers to shift toward more sustainable energy practices. By linking carbon costs with trade, CBAM creates an economic push for industries globally to adopt energy-efficient technologies, reduce fossil fuel dependence, and accelerate their transition towards renewable energy. This intersection of policy and energy reform illustrates how CBAM plays a crucial role in shaping the energy transition on both a regional and global scale.

This research paper will delve into the specific impact of CBAM on the energy sector and industrial decarbonization. It will examine how the introduction of CBAM pressures industries to adopt low-carbon technologies and assess its broader implications for energy markets, particularly the shift from fossil fuels to renewable energy sources, as well as challenges energy-intensive industries are facing in their transition to low-carbon technologies.

2. IMPACTS AND CHALLENGES OF CBAM ON ENERGY SECTOR

By encouraging the adoption of cleaner technologies and renewable energy sources, CBAM plays a pivotal role in driving the global energy transition. The mechanism forces industries across the globe to rethink their energy consumption strategies, accelerate the shift to low-carbon alternatives, and align with the EU's ambitious climate goals. The following section explores the various ways CBAM influences energy use, pressures fossil fuel-dependent industries, and drives innovation, while also addressing the challenges it presents for both developed and developing economies.

2.1. Impacts of CBAM on energy sector

Some of the impacts CBAM have on energy sector are:

- **Encouraging Low-Carbon Energy Use** - CBAM plays a crucial role in encouraging the global transition towards low-carbon energy sources by applying a carbon price on imports from countries with less stringent environmental regulations. This pricing mechanism acts as a strong incentive for foreign producers to adopt cleaner and more efficient energy technologies to maintain their competitiveness in the European Union market. As the EU aims to meet its ambitious climate targets, CBAM supports the promotion of renewable energy sources like wind, solar, and hydropower, which are vital for reducing greenhouse gas emissions globally. By aligning economic incentives with environmental objectives, CBAM fosters a global shift towards low-carbon energy use, influencing producers both within and outside the EU to transition away from fossil fuels and embrace sustainable practices. This approach not only reduces the carbon footprint of imports but also catalyzes innovation in green technologies, encouraging industries worldwide to invest in renewable energy infrastructure in order to reduce carbon emission by 55% compared to the 1990 levels by 2030 [5].
- **Pressuring Fossil Fuel-Dependent Sectors** - CBAM exerts considerable pressure on sectors heavily reliant on fossil fuels, such as cement, steel, and aluminum production. These industries, which are traditionally significant emitters of CO₂ due to their energy-intensive processes, will face additional costs if they continue to operate using conventional carbon-intensive technologies. The imposition of a carbon price under CBAM raises the economic stakes for these industries, making it increasingly costly to rely on fossil fuels. For instance, steel manufacturers may shift to electric arc furnaces, which offer a lower-carbon alternative to traditional blast furnaces [6].

Consequently, companies in these sectors are likely to accelerate their adoption of cleaner, more energy-efficient technologies. The shift towards alternative fuels, such as hydrogen and bioenergy, becomes a strategic necessity to mitigate the financial burden imposed by CBAM. This pressure to innovate and reduce emissions not only contributes to the broader decarbonization goals but also promotes industrial competitiveness by rewarding companies that embrace sustainable energy practices [7].

- **Driving Innovation in Renewable Energy** -The financial penalties imposed by CBAM on carbon-intensive production methods create strong market signals for increased investment in research and development (R&D) of renewable energy and energy-efficient technologies. Companies are driven to prioritize R&D that reduces their carbon footprint, particularly in renewable energy technologies like solar, wind, and hydropower. As the demand for cleaner energy increases, R&D efforts in these areas intensify, fostering breakthroughs in energy storage, grid integration, and efficiency improvements [8]. Furthermore, CBAM not only affects private companies but also prompts public sector initiatives that support R&D, creating a collaborative framework for developing green technologies. Public-private partnerships become essential for scaling innovations that reduce energy consumption in industrial processes, for example, by improving the efficiency of industrial machinery or developing materials that require less energy to produce. The push for renewable energy innovations driven by CBAM extends beyond Europe, as global companies compete to maintain market access and profitability. This fosters a worldwide technological shift toward decarbonization, accelerating the transition from fossil fuels to sustainable energy systems, which, in turn, can help meet the objectives of the Paris Agreement [9].
- **Harmonizing Global Climate Efforts** -A key aspect of CBAM is its ability to harmonize global climate action by leveling the playing field between EU and non-EU producers. By ensuring that European companies are not disadvantaged by the EU's stricter environmental regulations, CBAM addresses the issue of carbon leakage, where production shifts to countries with laxer emission policies. Moreover, CBAM serves as a policy tool to push non-EU countries towards adopting similar decarbonization measures. It encourages them to align their environmental regulations with Europe's climate goals, thus promoting the broader adoption of low-carbon energy solutions worldwide. In this way, CBAM acts as a catalyst for international climate cooperation, driving global momentum toward reducing emissions and adopting sustainable energy practices across borders.
- **Impacts on Energy-Intensive Industries** - CBAM places energy-intensive industries, particularly those in sectors like steel, cement, and aluminium, under considerable pressure to reduce their carbon emissions. The direct financial costs imposed on carbon-intensive production create a strong incentive for companies to adopt low-carbon technologies and integrate renewable energy into their operations. For example, the cement industry may adopt carbon capture and storage (CCS) technologies or explore alternative materials that reduce the carbon intensity of production. These changes not only reduce emissions but also enhance the long-term sustainability of companies in the global market. Furthermore, CBAM encourages industries to explore more innovative ways to reduce energy consumption, including optimizing production processes and incorporating more energy-efficient machinery. The ripple effect extends across the energy sector, pushing energy producers to adapt to the demands of industries transitioning toward a low-carbon economy, thereby accelerating the shift toward renewable energy sources [10].

2.2. Challenges of implementing CBAM on energy sector

While CBAM has the potential to accelerate the decarbonization of the energy sector, its implementation presents several challenges that could limit its effectiveness. These challenges span technical, political, legal, economic, and social dimensions, which will be explored in detail:

- **Technical challenges** - One of the primary challenges facing the energy sector under CBAM is the accurate measurements and verification of carbon emissions associated with imported goods, especially those stemming from complex production processes. Measuring emissions along the entire supply chain can be highly complex and prone to inaccuracies [10]. Furthermore, there is no globally standardized methodology for calculating carbon footprints, as different countries and industries employ varying methods of carbon accounting. The absence of uniform standards complicated the implementation of CBAM, and a lack of transparency in some countries adds further complexity. Additionally, energy-intensive industries face the challenge of upgrading existing technologies to meet the new decarbonization standards. While transitioning to renewable energy or low-carbon technologies may reduce emissions and costs in the long run, technical barriers such as limited access to innovative technologies or inadequate infrastructure can slow this process. For example, transitioning to hydrogen or bioenergy requires significant investment in new technologies and workforce retraining.
- **Political and legal challenges** - CBAM is politically contentious, particularly in international relations between the EU and its trading partners. Many countries, particularly developing ones, perceive CBAM as a protectionist measure that could harm their export sectors. Non-EU countries that lack the capacity or resources to quickly transition to low-carbon technologies see CBAM as a barrier to trade. This political resistance could lead to tensions on the global stage, particularly within the World Trade Organization (WTO), where debates may arise over CBAM's compatibility with free trade rules [10]. In addition, there are internal political challenges within the EU itself, as CBAM could cause friction among member states with different energy profiles and interests. Countries that rely more heavily on fossil fuels, such as Bosnia and Herzegovina, may resist stricter climate policies, fearing that they will negatively impact their competitiveness and economic growth.
- **Economic challenges** - CBAM could lead to significant economic impacts on the energy sector, particularly in terms of increased production and distribution costs. Energy-intensive industries that rely on fossil fuels will face higher costs due to carbon pricing, which could reduce their competitiveness in the global market. While CBAM aims to protect European industries from "carbon leakage," there is a risk that higher costs may lead to reduced production or job losses in certain sectors. Industries in non-EU countries that export to Europe will also be affected by the increased costs imposed by CBAM. This could have negative effects on global trade, creating additional economic challenges for countries that are unable to rapidly implement clean technologies.
- **Social challenges** - CBAM may also create social challenges, particularly in terms of ensuring a just transition for workers in industries that rely on fossil fuels. In many countries, energy-intensive industries employ a large number of people, and the transition to low-carbon technologies could result in job losses or require significant workforce retraining. Managing the social consequences of this transition is crucial to ensuring a fair transition that does not leave vulnerable workers without adequate support. Furthermore, consumers are likely to experience price increases as a result of

CBAM, as the costs of importing goods from countries with higher carbon emissions will be passed on to end consumers. This could lead to social unrest, particularly in lower-income countries where price increases for essential goods could have significant economic consequences for households.

3. CBAM AND ENERGY - INTENSIVE INDUSTRIES

3.1. CBAM and steel industry

The steel industry is one of the most significant industrial sectors globally, both in terms of economic output and carbon dioxide (CO₂) emissions. Traditional steel production processes, such as the use of blast furnaces, rely heavily on coal, resulting in high greenhouse gas emissions. The steel industry alone is responsible for around 7-9% of global CO₂ emissions, while the most amount of CO₂ emission comes from steel production i.e. 1.3 tonnes of CO₂e per tonne of steel as can be seen in Figure 1 [11]. CBAM introduces a price on the carbon dioxide content of imported products, including steel, which poses a significant challenge for non-EU countries that use traditional production methods. Steel imports from countries that do not comply with European climate goals will face additional costs, forcing them to reconsider their production methods to remain competitive in the European market. This particularly affects producers who use highly carbon-intensive processes based on fossil fuels, such as coal and coke in blast furnaces. To respond to this challenge, the steel industry within the EU and globally is turning to innovations in low-carbon technologies. Electric Arc Furnaces which use electricity from renewable sources and scrap steel as the main raw material, are becoming increasingly popular as an alternative to traditional blast furnaces. EAF technology allows for a significant reduction in CO₂ emissions by using renewable energy for the steel melting process. Modern EAFs are also equipped with advanced technologies, such as waste heat recovery systems, which can capture and reuse energy that would otherwise be lost [12]. CBAM increases the economic incentives for adopting this technology, reducing dependence on fossil fuels and increasing the use of steel from renewable sources

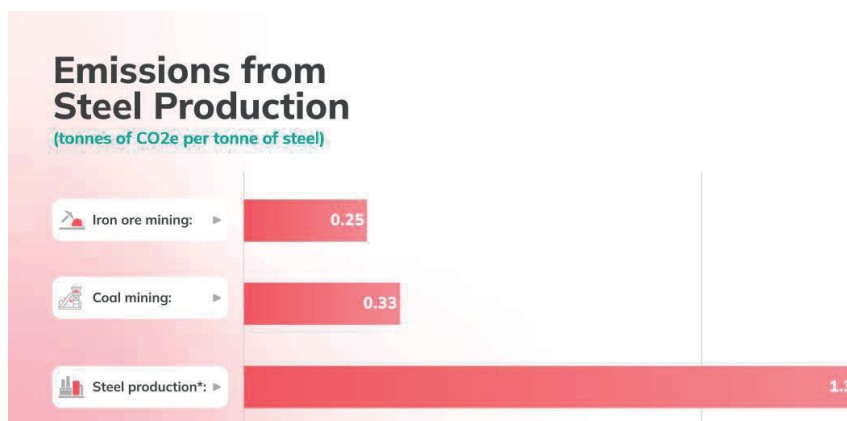


Figure 1. Global average emissions from steel production [11]

Another key pathway for decarbonizing the steel industry is hydrogen-based direct reduction (HDR) technology. This technology uses green hydrogen, produced by electrolysis using renewable energy, eliminating the need for coal and significantly reducing CO₂ emissions [13]. In the traditional blast furnace process, iron ore is reduced to metallic iron using coke. The chemical reaction between carbon and iron ore produces molten iron and releases CO₂ as by-product. In contrast, HDR uses hydrogen instead of carbon monoxide as the reducing

agent. In this process, instead of CO₂, water vapor is produced as a by-product thus making HDR a much cleaner alternative. Since the process produces water vapor instead of carbon dioxide, HDR can potentially eliminate up to 95% of CO₂ emissions associated with traditional steelmaking processes when green hydrogen is used [12]. Although HDR technology is not yet fully commercialized on a large scale, CBAM creates an economic incentive for further research and development, enabling an accelerated transition to a low-carbon future for the steel industry. In 2016, a project named hydrogen breakthrough ironmaking technology (HYBRIT) was initiated in Sweden. This project aimed at using H₂, which produces electrolyzing water with fossil-free electricity in the steelmaking process, rather than the conventionally used coking coal. The HYBRIT route was established based on the current shaft furnace DR processes, but the main reducing agent is H₂ rather than a mixture of CO and H₂; thus, the CO₂ emissions are much lower. Figure 2 compares the traditional steelmaking process and HYBRIT process.

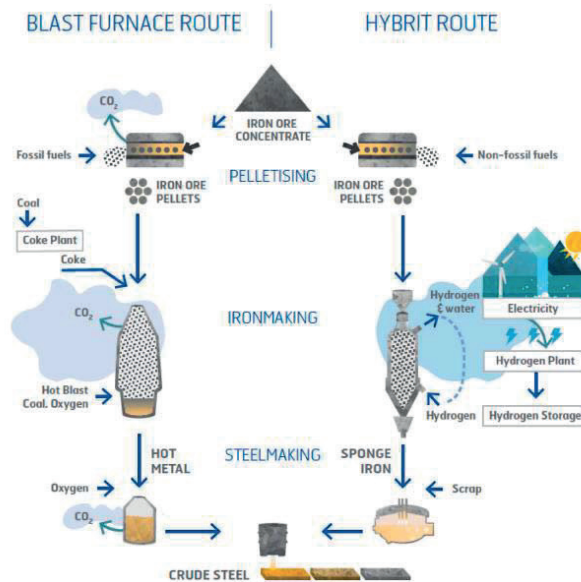


Figure 2. Comparison between traditional blast furnace route and HYBRIT route [14]

One of the main challenges is the availability of renewable energy on a global scale. Electric arc furnaces and hydrogen technologies require a stable supply of large amounts of clean electricity, which is not always available in all regions. Therefore, the development of renewable energy infrastructure becomes a key factor for the successful transition of the steel industry in the CBAM era.

3.2. CBAM and cement industry

The cement industry is a crucial part of the global economy, providing essential materials for construction and infrastructure. However, it is also one of the most carbon-intensive industries, responsible for approximately 8% of global carbon dioxide (CO₂) emissions [15]. The production of cement, particularly through the calcination process in which limestone is heated to produce clinker, results in significant CO₂ emissions. As the European Union aims to reduce greenhouse gas emissions to meet its climate targets, the CBAM has been introduced to place a price on the carbon content of imported goods, including cement. The

cement industry faces significant technological barriers in reducing its carbon footprint. While some progress has been made in improving energy efficiency and reducing the use of fossil fuels, the fundamental process of clinker production still generates large amounts of CO₂. For the industry to meet decarbonization targets, more advanced technologies will need to be developed and adopted, many of which are still in the early stages of research and development (R&D). One of the most promising technologies for decarbonizing the cement industry is Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS). CCUS involves capturing CO₂ emissions from industrial processes and either storing it underground or using it in other industrial applications [16]. The cement industry is a prime candidate for CCUS because a large portion of its emissions comes from the calcination process, which is difficult to eliminate. Several pilot projects are already underway to test the feasibility of CCUS in cement plants, and the economic incentives provided by CBAM could accelerate its adoption. CCUS technologies typically function in three stages, as shown in Figure 3:

- **Capture:** CO₂ is captured at the point of emission in the cement plant, often through chemical absorption or separation technologies. This is especially critical for capturing process emissions from calcination, which account for approximately 60-65% of total emissions in cement production.
- **Utilization:** Once captured, CO₂ can be used in various industrial processes, including the production of synthetic fuels, plastics, and building materials. In some cases, CO₂ is utilized in curing concrete, which can increase the strength of the material while trapping CO₂ in a solid form, reducing overall emissions from the production process.
- **Storage:** If utilization options are not viable, the captured CO₂ can be compressed and transported for permanent storage in deep geological formations such as saline aquifers or depleted oil and gas fields. This method ensures that CO₂ is not released back into the atmosphere, contributing to long-term climate goals.

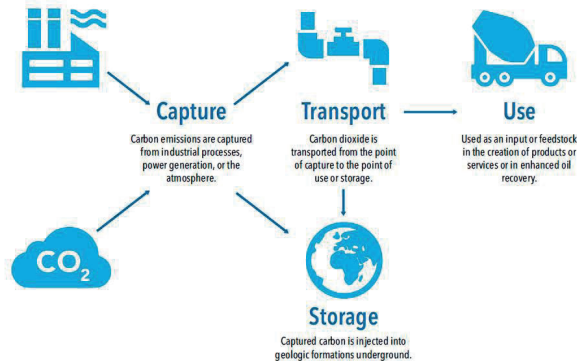


Figure 3. Carbon capture, utilization and storage [17]

Several pilot projects around the world are testing the feasibility of CCUS in cement plants. These projects aim to reduce the high levels of CO₂ emissions produced by the sector while demonstrating the viability of CCUS as a key decarbonization tool:

- **Norcem Brevik CCS Project (Norway):** As part of Norway's Longship CCS initiative, this project aims to capture up to 400,000 tonnes of CO₂ annually from Norcem's cement plant in Brevik. This is one of the first large-scale CCS projects in the cement industry and is expected to begin full-scale operation in 2024. The captured CO₂ will be transported and stored under the North Sea in a geological formation, demonstrating a full-chain CCS system for cement production. [18]
- **LEILAC (Low Emissions Intensity Lime and Cement) Project (Europe):** This project focuses on capturing CO₂ emissions from the calcination process in cement and lime

plants. LEILAC's innovative technology uses a direct separation technique that isolates CO₂ during the calcination phase, making it easier to capture. The LEILAC 2 project is expanding this technology to commercial scale, targeting a 95% reduction in emissions from calcination. [19]

- Cemex and Carbon Clean (UK): Cemex, a global leader in cement production, partnered with Carbon Clean to implement a modular carbon capture unit at its cement plant in the UK. This pilot project aims to capture around 100,000 tonnes of CO₂ annually. The captured CO₂ will be used for industrial applications or stored permanently, helping Cemex meet its net-zero carbon emissions targets. [20]
- Carbon2Product Austria (C2PAT): This project, involving LafargeHolcim, OMV, and Verbund, is part of Austria's efforts to reduce CO₂ emissions in industrial processes. C2PAT focuses on capturing CO₂ emissions from a LafargeHolcim cement plant and converting it into synthetic fuels and other products. This project integrates both CCUS and CO₂ utilization technologies, showcasing the potential for circular carbon economies. [21]

In addition to CCUS, the adoption of blended cements has gained momentum as a way to further reduce emissions and innovation in clinker substitutes. Blended cements incorporate supplementary cementitious materials (SCMs) such as fly ash (a byproduct of coal-fired power plants), slag (a byproduct of steel production), or pozzolans (naturally occurring or artificial materials with cement-like properties) into the mix. These SCMs can partially replace clinker, the most CO₂-intensive component in cement, thereby reducing the overall carbon footprint of the final product. Since clinker production is responsible for the majority of CO₂ emissions in the cement-making process, lowering its proportion by using SCMs results in a significant reduction in emissions. For example, fly ash can replace up to 30% of clinker in certain types of blended cement without compromising strength, while reducing emissions from clinker production. As well, ground granulated blast furnace slag (GGBFS) is used extensively in blended cements, with the potential to replace up to 50% of clinker in some formulations, providing a more sustainable alternative. Blended cements not only reduce CO₂ emissions but also enhance the durability and longevity of concrete structures. These innovations align with the global push towards more sustainable building practices, as the construction industry seeks to minimize its environmental impact. Developing alternative materials that reduce the dependence on clinker in cement production is another important pathway for decarbonization. Researchers are exploring new types of low-clinker cements and geopolymers that could serve as sustainable alternatives to traditional Portland cement. These innovations could significantly reduce emissions, as they require less energy and raw materials to produce. Low-clinker cements aim to reduce the proportion of clinker by replacing it with supplementary cementitious materials, which not only lowers emissions but also improves the material properties of the cement. Examples of SCMs include fly ash, slag, silica fume, and natural pozzolans. These materials can partially or entirely replace clinker, depending on the formulation and application requirements. As research and development in alternative cement materials continue to advance, innovations in low-clinker cements and geopolymers are expected to play a central role in the transition to a low-carbon cement industry. By reducing reliance on clinker and introducing more sustainable alternatives, the cement industry can significantly cut its emissions while contributing to global climate goals [22,23].

4. CONCLUSION

The Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) represents a critical policy tool in the European Union's broader strategy to achieve its ambitious climate goals, including a 55% reduction in emissions by 2030 and carbon neutrality by 2050. CBAM not only aims to mitigate carbon leakage but also incentivizes industries, both within and outside the EU, to adopt cleaner technologies and renewable energy sources. The energy sector, which is heavily reliant on fossil fuels, faces significant transformation under CBAM, as industries are pushed to embrace low-carbon alternatives, such as hydrogen, biomass, and renewable energy infrastructure.

The steel and cement industries, as two of the largest contributors to global CO₂ emissions, are particularly affected by CBAM. The introduction of carbon pricing on steel and cement imports places immense pressure on these industries to innovate and adopt decarbonization strategies. For the steel industry, technologies such as Electric Arc Furnaces and Hydrogen-Based Direct Reduction offer promising alternatives to traditional blast furnaces. These technologies significantly reduce carbon emissions by utilizing renewable energy and green hydrogen. Projects like HYBRIT demonstrate the viability of HDR in reducing up to 95% of emissions associated with steel production, setting a new standard for low-carbon steel manufacturing.

Similarly, the cement industry faces a critical juncture in its decarbonization efforts. Technologies such as CCUS provide viable solutions for reducing the emissions generated during the calcination process, which accounts for the majority of CO₂ emissions in cement production. Pilot projects like Norcem Brevik and LEILAC illustrate the potential of CCUS to mitigate emissions while maintaining industrial productivity. Additionally, the development and adoption of blended cements and low-clinker alternatives offer further pathways to reduce emissions by incorporating supplementary cementitious materials such as fly ash, slag, and geopolymers. These innovations not only lower the carbon footprint of cement but also improve the durability and sustainability of construction materials.

However, the successful implementation of CBAM faces several challenges, including technical difficulties in measuring and verifying emissions, political resistance from international trading partners, and economic concerns related to the competitiveness of industries affected by carbon pricing. Moreover, energy-intensive industries will require substantial investments in infrastructure, research and development, and workforce retraining to transition to low-carbon technologies. Addressing these challenges will be essential to ensuring that CBAM achieves its intended objectives without creating disproportionate burdens on vulnerable economies or sectors.

5. REFERENCES

- [1] Carbon Border Adjustment Mechanism; available at: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en (September 2024)
- [2] Munro, J., 2018. Emissions Trading Schemes under International Economic Law. Oxford University Press.
- [3] REGULATION (EU) 2023/956 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL OF 10 May 2023 on the establishment of a carbon border adjustment mechanism (CBAM)
- [4] Agence Française de Développement (AFD). 2022. Impacts Of Cbam On Eu Trade Partners: Consequences For Developing Countries. Research Paper. Available at: <https://www.afd.fr/en/ressources/impacts-cbam-eu-trade-partners-consequences-developing-countries>
- [5] Explaining the new EU Carbon border adjustment mechanism (CBAM), International PtX Hub, available at: https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2023/12/International-PtX-Hub_202312_CBAM-implications-for-PtX-imports-to-the-EU.pdf (September 2024)
- [6] Vogl, V., Åhman, M., & Nilsson, L. J. (2018). "Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking." *Journal of Cleaner Production*.
- [7] Bellona Foundation. (2020). "Decarbonizing European industry: CBAM and green technologies."
- [8] IRENA. (2020). "Innovation outlook: Renewable energy technologies." International Renewable Energy Agency.
- [9] European Roundtable on Climate Change and Sustainable Transition. (2020). "Carbon Border Adjustment Mechanisms: Policy Insights."
- [10] Mehling, M. A., van Asselt, H., Das, K., Droege, S., & Verkuil, C. (2019). "Designing border carbon adjustments for enhanced climate action." *American Journal of International Law*.
- [11] European Commission. (2021). "Fit for 55: delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality." European Commission.
- [12] Muslemani, H., et al. (2021). "Hydrogen-Based Steelmaking: Impact of Energy and Material Efficiency on Sustainability." *Journal of Cleaner Production*.
- [13] R.R. Wang, Y.Q. Zhao, A. Babich, X.Y. Fan. (2021). "Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities" *Journal of Cleaner Production*.
- [14] HYBRIT. (2021). "Fossil-Free Steel: The HYBRIT Project." SSAB, LKAB, Vattenfall Collaboration.
- [15] International Energy Agency (IEA). (2020). "Cement Technology Roadmap." IEA.
- [16] Scrivener, K. (2014). "Options for the Future of Cement." *Cement and Concrete Research*
- [17] Carbon Capture, Utilization, and Storage: An Entrepreneurial Approach to Reducing GHG Emissions, available at: <https://www.iedm.org/carbon-capture-utilization-and-storage-an-entrepreneurial-approach-to-reducing-ghg-emissions/> (October, 2024)
- [18] Norcem. (2021). "Norcem Brevik CCS Project Overview." Norcem Norway.
- [19] LEILAC. (2020). "LEILAC 2: Scaling Direct Separation Technology in Cement and Lime Plants." LEILAC Project.
- [20] Carbon Clean. (2021). "Cemex and Carbon Clean Partnership for Carbon Capture in the Cement Industry." Carbon Clean.
- [21] LafargeHolcim. (2020). "Carbon2Product Austria (C2PAT) Overview." LafargeHolcim
- [22] LafargeHolcim. (2020). "Blended Cements and the Role of SCMs." LafargeHolcim Research and Development. Available at: <https://www.lafargeholcim.com/supplementary-cementitious-materials>
- [23] International Energy Agency (IEA). (2021). "Cement: Tracking Industry 2021." International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/cement>

INVESTIGATION ON CONVERSION OF LIGNOCELLULOSIC WASTE INTO BIO-OIL

*Betül GÖNCÜ,

* Harran University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Türkiye

ABSTRACT

Biomass offers a renewable, environmentally friendly and reliable alternative to fossil fuels for today and future energy demands. Lignocellulosic biomass is a raw material such as forest residues, agricultural wastes and urban solid wastes that are not used for food purposes. The use of these wastes as raw materials also prevents excess environmental waste accumulation. Lignocellulosic raw materials are in an advantageous position in biofuel production because they are abundant, easily accessible and cheap. There is a large amount of lignocellulosic waste potential in our country. Many different methods and technologies are used to convert lignocellulosic biomass into valuable chemical substances, to obtain fuels with high energy value or to use it as a direct energy source. One of these is thermochemical conversion technologies. The conversion of biomass to high enthalpy density products is important in terms of both transportation and obtaining high energy value. The aim of the conversion of biomass is to obtain high enthalpy density commercial fossil fuels or to obtain pure and valuable chemical products. In this study, in addition to investigating the conversion of lignocellulosic biomass into liquid products with higher combustion value, bio-oil production methods from lignocellulosic wastes, their advantages and disadvantages will be investigated.

Keywords: Bio-oil, lignocellulosic waste, biomass

1. Introduction

Today, after oil, natural gas and coal, the most energy is provided by biomass energy [1]. Approximately 13% of the energy used in the world is obtained from biomass [2]. Biomass is one of the easily available carbon sources defined as organic matter masses of biological origin [3]. It is obtained from plant wastes, animal wastes, municipal wastes and industrial wastes [4]. Lignocellulosic biomass is mostly attractive due to its low cost [5].

Biomass has many uses. Solid biofuels obtained from biomass are classified as pellets, liquid biofuels; biodiesel, bioethanol, biomethanol, biodimethyl ether, biooil, biobutanol and gaseous biofuels; biogas, biosynthesis and biohydrogen [6]. Different conversion methods are used to obtain useful products from lignocellulosic biomass [7]. Compared to thermochemical conversion, biochemical conversion methods require longer time [8].

Thermochemical transformation occurs by applying heat to biomass, usually in an oxygen-free environment, with or without a catalyst, in order to disrupt or modify the chemistry of the biomass [9]. Thermochemical methods are combustion, pyrolysis, gasification and liquefaction [10].

2. Thermochemical conversion methods

2.1. Combustion

It is the well-known classical combustion process of biomass. Biomass is generally used in homes as wood or wood pellets for heating purposes via fireplaces, stoves and boilers [6].

2.2. Gasification

In gasification, biomass is burned at high temperatures (>800 °C) [11]. The gases obtained are CO, CO₂, H₂ and CH₄. In addition to gaseous products, liquid (such as tar and oil) and solid (such as coal and ash) products are also obtained [12].

2.3. Pyrolysis

It is method of decomposing biomass at high heating rates and in an oxygen-free environment [13]. Biomass pyrolysis usually occurs at 500-550°C [14]. Liquid product (biooil), solid product (char) and gaseous product are obtained [15]. Biooils obtained as a result of pyrolysis can be converted fuels, sweeteners, fertilizers, resins, various chem.) [16]. Bio-oils obtained from pyrolysis without catalyst are unstable and have low calorific value [17].

Slow pyrolysis is carried out for a relatively long time, 600°C and 50 K/min [18]. Fast pyrolysis is carried out at 300-600 °C and in a short time [19]. Flash pyrolysis is a process with a temperature of more than 1000°C and a duration of less than 0.5 seconds. [20].

2.4. Liquefaction

In the liquefaction method, biomass and products remain in the liquid phase throughout the process. This method requires high pressure or atmospheric pressure in the presence of organic solutions [21]. It occurs between 40 and 2300 KPa [22]. It is carried out at low temperatures such as 200-400°C. Catalysts can also be used in the liquefaction method [23]. In addition, water is also used as a solvent in addition to organic compounds.

Hydrothermal liquefaction is the process of converting organic raw materials into bio-oil using water at high pressure and in a short time [24]. The use of catalysts in the hydrothermal liquefaction process significantly affects the increase in product yield and quality [25]. Bio-oil is obtained by applying the most common flash pyrolysis and hydrothermal liquefaction methods [26].

Table 1. Comparison of methods used in bio-oil production [26].

Flash pyrolysis	Hydrothermal Liquefaction Method
Positive Aspects	
Applied at high temperatures between 450-500 °C.	Applied at lower temperatures between 300-400 °C.
Short reaction time	Reaction retention time (0.2-1 hour) is longer.
Applied at atmospheric pressure.	Applied at high pressure between 5-20 MPa.
Drying is needed	No drying is needed
Oily products are obtained in gas phase.	Complex reactions occur in an aqueous environment.
There is a high oil yield of approximately 80% in dry feeding.	High calorific value, low moisture
Installation cost is low.	
Negative Aspects	
Low fuel quality is obtained with this method.	Low oil yield between 20-60% is obtained.
Flash pyrolysis	High pressure equipment is required for the process.
Positive Aspects	Installation cost is high.

3. Bio-oil

In physical appearance, bio-oil is brown, dense and has a pungent odour [27]. Biooils have different uses in industry such as heating, power plants, production of chemicals and resins, anhydrous sugar production, conversion of organic waste into pellets and wood preservatives. However, since the oxygenated compounds and organic acids in biooil reduce the calorific value and cause corrosion, they prevent biooil from being used as traditional fuels. In this context, one of the most effective methods for improving the quality of biooils is the use of a catalyst that reduces the amount of oxygen in biooil [28,29]. The most abundant chemicals in bio-oil are water, acetic acid, methanol, cyclopentanone, methoxyphenol, acetone, furfural, phenol, formic acid, levoglycosan, guaiacol and their alkylated phenol derivatives [6].

Biooil causes less environmental pollution by not producing CO₂, SO_x and NO_x emissions during combustion. They cannot be used directly as fuel in vehicles, they can be used by adding solvents with petroleum fuels [26].

Biooil contains approximately 30-40% water. However, water increases the oxygen content in biooil, reducing its heating value and increasing the ignition temperature of biooil. Biooil viscosity is also very high [30, 31]. Biooil has the potential to be used in boilers and furnaces, as well as in gas turbines and compression ignition engines, due to its low heating value, water content and acidity [32].

It can be used as a direct fuel additive in boilers, furnaces, turbines and engines, and can be converted into gasoline, diesel and olefins with Fischer-Tropsch after gasification, methanol with Cu/ZnO catalyst systems and liquid hydrocarbons with catalytic methods [33].

Bio-oil has an energy value of approximately 13-18 MJ/kg, a water content ranging from 15-30% and a pH value ranging from 2-3.7, depending on the source from which it is obtained. In addition, unlike petroleum-based fuels, biooil has significantly high oxygen ranging from 45-60%. Although biooil has a significant fuel potential, its calorific value is only 40-50% of hydrocarbon fuels. Therefore, catalytic processes have been used to unlock this potential [41]. Food flavors and essences, pharmaceuticals, resins, various chemicals used in the environmental field, fertilizers and emission control agents are substances that can be produced from biooil [34]. Some chemicals recovered from biooil can be listed as cresols, anisole, acetol, glyocasal, phenol formaldehyde, etc. [35].

The main advantages of bio-oil are:

- its CO₂ balance is clearly positive, since it is a biomass-derived fuel,
- it has the possibility of use in small-scale energy production systems and also in large power plants,
- it is easy to store and transport,
- it has a high energy density compared to gasification fuel,
- it has the potential to be used in existing power plants [36].

The properties of bio-oils obtained from lignocellulosic sources are controlled according to ASTM standard. This standard defines the classes of pyrolysis liquid biofuels produced from biomass designed for use in various types of fuel combustion equipment under various climatic and operating conditions. These types of fuels are not suitable for use in residential heaters, engines or marine applications that are not modified/modified to use [37].

Bio-oil has different compositions and fuel properties due to different raw materials and production conditions. In addition, bio-oil can be used as an alternative fuel either directly or after some general purification and conditioning processes. Some properties of bio-oils may cause some significant problems during their use as fuel in furnaces, boilers, engines and gas turbine equipment used for burning petroleum-derived fuels. This makes full-scale processes more difficult [38].

4. Conclusion

Lignocellulosic biomass presents a promising and sustainable alternative to fossil fuels, offering numerous environmental and economic benefits. The abundance and low cost of lignocellulosic raw materials, such as forest residues, agricultural wastes, and urban solid wastes, make them an attractive option for biofuel production. Thermochemical conversion technologies, including combustion, gasification, pyrolysis, and liquefaction, provide efficient methods to convert biomass into high-energy-value products. Among these, bio-oil production through pyrolysis and hydrothermal liquefaction stands out due to its potential to produce valuable chemical substances and fuels with high energy density.

The utilization of lignocellulosic biomass not only addresses the issue of waste accumulation but also contributes to reducing greenhouse gas emissions and dependence on fossil fuels. By investing in advanced conversion technologies and optimizing production processes, it is possible to enhance the quality and yield of bio-oils, making them a viable alternative to traditional fuels. The development and implementation of these technologies can stimulate economic growth, create job opportunities, and promote environmental sustainability.

Overall, the conversion of lignocellulosic biomass into bio-oil and other valuable products represents a significant step towards a cleaner and more sustainable energy future. Continued research and innovation in this field will be crucial to unlocking the full potential of biomass as a renewable energy source.

REFERENCES

- [1] Bhaskar, T., Bhavya, B., Singh, R., Naik, D., Kumar, A., Goyal, H. (2011). Thermochemical Conversion of Biomass to Biofuels. *Biofuels; Alternative Feedstocks and Conversion Processes*. 51-77.
- [2] Stöcker, M. (2008). Biofuels and biomass-to-liquid fuels in the biorefinery: Catalytic conversion of lignocellulosic biomass using porous materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(48), 9200-9211.
- [3] Cheng, S. (2012). *Bio based phenolic resins and adhesives derived from forestry residues wastes and lignin*.
- [4] Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933.
- [5] Collard, F.-X. and J. Blin (2014). "A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin." *Renewable and sustainable energy reviews* **38**: 594-608.
- [6] Goyal, H. B., Seal, D., Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(2), 504-517.
- [7] Pan, H. (2007). *Wood liquefaction in the presence of phenol with a weak acid catalyst and its potential for novolac type wood adhesives*. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College.
- [8] Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press.
- [9] Overend, R. P. (2004). Thermochemical conversion of biomass. *Renewable Energy Sources Charged with Energy from the Sun and Originated from Earth-Moon Interaction*,

Evald E. Shpilrain ed., in *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, developed under the Auspices of the UNESCO. Eolss Publishers, Oxford.

[10] Neves, D. D. S. F. D. (2013). Evaluation of thermochemical biomass conversion in fluidized bed. *Ph. D. Thesis*.

[11] Antal Jr, M. J., Allen, S. G., Schulman, D., Xu, X., Divilio, R. J. (2000). Biomass gasification in supercritical water. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 39(11), 4040-4053.

[12] Yu, F. (2007). Renewable energy from corn residues by thermochemical conversion. *Ph. D. Thesis*.

[13] Wampler, T. P. (2006). Applied pyrolysis handbook, CRC press.

[14] McKendry, P. (2002). "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass." *Bioresource technology* 83(1): 37-46.

[15] Chen, M. Q., Wang, J., Zhang, M. X., Chen, M. G., Zhu, X. F., Min, F. F., & Tan, Z. C. (2008). Catalytic effects of eight inorganic additives on pyrolysis of pine wood sawdust by microwave heating. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82(1), 145-150.

[16] Dickerson, T., & Soria, J. (2013). Catalytic fast pyrolysis: a review. *Energies*, 6(1), 514-538.

[17] Czernik, S., & Bridgwater, A. V. (2004). Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy & fuels*, 18(2), 590-598.

[18] Lam, S. S., Liew, R. K., Wong, Y. M., Yek, P. N. Y., Ma, N. L., Lee, C. L., & Chase, H. A. (2017). Microwave-assisted pyrolysis with chemical activation, an innovative method to convert orange peel into activated carbon with improved properties as dye adsorbent. *Journal of cleaner production*, 162, 1376-1387.

[19] Lu, H., Ip, E., Scott, J., Foster, P., Vickers, M., Baxter, L. L. (2010). Effects of particle shape and size on devolatilization of biomass particle. *Fuel*, 89(5), 1156-1168.

[20] Kumar, R. and P. Kumar (2017). "Future microbial applications for bioenergy production: a perspective." *Frontiers in microbiology* 8: 450.

[21] Yamada, T., Ono, H. (1999). Rapid liquefaction of lignocellulosic waste by using ethylene carbonate. *Bioresource technology*, 70(1), 61-67.

[22] Cahyanti, M. N., Doddapaneni, T. R. K. C., & Kikas, T. (2020). Biomass torrefaction: An overview on process parameters, economic and environmental aspects and recent advancements. *Bioresource technology*, 301, 122737.

[23] Mun, S. P. (2004). Liquefaction of lignocellulosic biomass with mixtures of ethanol and small amounts of phenol in the presence of methanesulfonic acid catalyst. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 10(5), 722-727.

[24] Toor, S.S., Rosendahl, L., Rudolf, A. (2011). Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water Technologies. *Energy*, 36 (5) 2328-2342.

[25] Cheng, F., Tompsett, G. A., Murphy, C. M., Maag, A. R., Carabillo, N., Bailey, M., Hemingway, J. J., Romo, C. I., Paulsen, A. D., Yelvington, P. E., & Timko, M. T. (2020). Synergistic Effects of Inexpensive Mixed Metal Oxides for Catalytic Hydrothermal Liquefaction of Food Wastes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(17), 6877-6886.

[26] Xiu, S., & Shahbazi, A. (2012). Bio-oil production and upgrading research: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4406-4414.

[27] Effendi, A., Gerhauser, H., Bridgwater, A. V. (2008). Production of renewable phenolic resins by thermochemical conversion of biomass: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(8), 2092-2116.

[28] Nakos, P., Tsiantzi, S., & Athanassiadou, E. (2001, September). Wood adhesives made with pyrolysis oils. In *Proceedings of the 3rd European wood-based panel symposium* (pp. 12-14). Hanover, German: European Panel Federation and Wilhelm Klauwitz Institute.

- [29] Kokten, E. S., Özbay, G., & Ayrilmis, N. (2020). Synthesis of biobased phenolic resins using catalytic pyrolysis oil and its effect on oriented strand board performance. *The Journal of Adhesion*.
- [30] Lu, Q., Yang, X. L., & Zhu, X. F. (2008). Analysis on chemical and physical properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82(2), 191-198.
- [31] Yin, S., Dolan, R., Harris, M., & Tan, Z. (2010). Subcritical hydrothermal liquefaction of cattle manure to bio-oil: Effects of conversion parameters on bio-oil yield and characterization of bio-oil. *Bioresource technology*, 101(10), 3657-3664.
- [32] Lehto, J., Oasmaa, A., Solantausta, Y., Kytö, M., Chiaramonti, D. (2014). Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass. *Applied Energy*, 116, 178-190.
- [33] Bulushev, D. A., & Ross, J. R. (2011). Catalysis for conversion of biomass to fuels via pyrolysis and gasification: a review. *Catalysis today*, 171(1), 1-13.
- [34] Bridgwater, A. ve Peacocke, G. (2000). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4:1-73.
- [35] Bridgwater, A. V., Meier, D. and Radlein, D. (1999). An Overview of Fast Pyrolysis of Biomass. *Organic Geochemistry*, 30 (12), 1479-1493.
- [36] Li, H.Y., Yan, Y.J., Ren, Z.W. (2008). Online upgrading of organic vapors from the fast pyrolysis of biomass. *Journal of Fuel Chemistry and Technology* 36:666-671.
- [37] Bridgwater, A. V. (2012). Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.
- [38] Czernik, S. ve Bridgwater, A. (2004). Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energ. Fuel*, 18:590-598.

COMOROS RENEWABLE ENERGY POTENTIAL

**Mustafa Aslan,
Faisal Ahamada Mmadi,
Harran University, Department of Enviromental Engineering,
Şanlıurfa, 63100, Turkiye**

**Mehmet Azmi Aktacir,
Harran University, Department of Mechanical Engineering,
Şanlıurfa, 63100, Turkiye**

ABSTRACT

Nowadays the renewable energy plays a big role in modern technology and generate electricity. With the growing population, the electrical load is increasing day by day, and rising fuel prices. Therefor it has become necessary to produce electricity by renewable energy such as solar and wind energy. Using renewable energy support the clean environment and decrease the emission CO₂ to protect the environment. Through this paper, I am introducing the renewable energy sources in Comoros Island. The aim of this paper is to research renewable energy sources in Comoros Island and using the renewable energy for generating electricity. Generating electricity by renewable energy such as solar and wind Energy is the best solution to solve the negative environment and the catastrophe of electricity interrupted in Comoros island. Establishment hybrid power station which consists of renewable energy able to reduce the pollution and support the growth of economic. Comoros Island is an Africa country at the northern end of the Mozambique Channel of the Indian Ocean and North Madagascar. It consists of four islands, are NGAZIDJA, NZOUWAN, MAYOT and MOHELI. In 2024 the population is one million. Generating Electricity in Comoros Island 97% depend on diesel generator and the 3% is come from solar energy and hydropower plant. The production of electrical energy through solar and wind energy, could solve the problem of electricity and the negative environment.

Keywords: Renewable energy, Comoros island, solar energy, wind energy

1. INTRODUCTION

Renewable energy system is considered the energy of the future and production of electricity. It is one of the most essential parameters and main in any nation's need for the development and optimization social economy. Solar and wind energy have been utilized to generate electricity. These sources are considered renewable energy sources. Renewable energy sources being more significantly important and crucial for alternative conventional sources. Increasing house gas emissions causes climate change and become a concern with the Environment. (Y. Kassem at al., 2020).

The hybrid system which consisting of solar and wind power always produces enough power electrical to meet the demand load. Decentralized renewable energy-generated electricity,

supports the reduction of the active power losses in the transmission line. The renewable energy always be economically, attractive and reliable in supplying electricity to the consumers and more advantageous than using one source (Bilir et al., 2015).

Nowadays world faces much catastrophes in the world cause of climatic challenges and negative environment. Renewable energy sources, such as photovoltaic PV and Wind energy, are becoming more sustainable, effective solutions to electricity problem. In addition, the countries that depend on fossil fuel for generation electricity, like Africa countries, it will be better to use the solar energy for generating electricity and solves the electricity problem. According to the Homer pro simulation is showed that Comoros Island have enough Solar and Wind energy sources that could depend on them to produce enough power electricity.

Renewable energy sources in Comoros Island.

Comoros Island has excellent location and many sources of renewable Energy. In Comoros Island has a lot of renewable energy sources, such as solar energy, geothermal, hydro power plant energy, tidal energy and wind energy. Therefore, I suggest Comoros government to solve the bad situation of electricity by using renewable energy. Renewable energy sources are free sources and c. The renewable energy sources friendly to the environment.

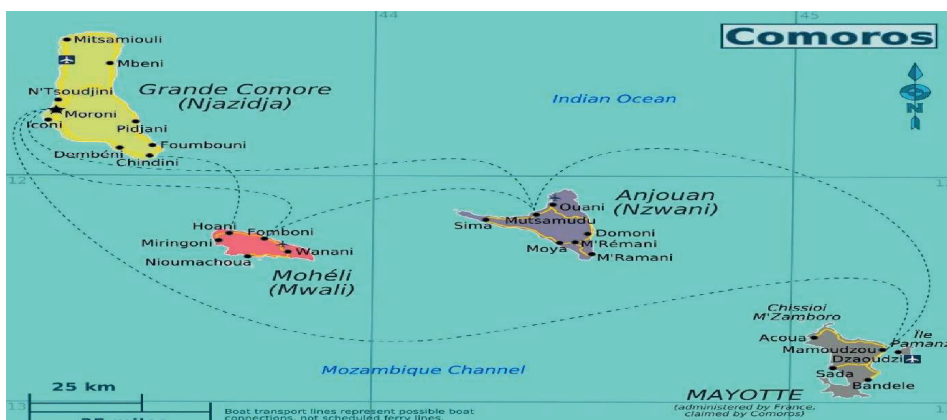


Figure 1. Comoros island geographical location

2. SOLAR ENERGY

Solar energy is light coming from the sun, it is called solar radiation or photovoltaic, that is mean light and electric. Solar energy is among the top renewable energy sources in the world and has approximately 23000 terawatt-hours of energy storage per year. Comoros Island has a high solar irradiation that is enough to produce electricity easy. For example in Wachili province, the average of solar energy is 5,7 KW/m² according to my study by using homer program. In Comoros island always the sun rise at six morning and sets at 5h30mn and from 10h30m morning to 14h30 the sun be shine. This information indicates that the Comoros Island is a country rich in solar energy. They are two solar power station in Comoros Island and one of them is belong French company for investment. The solar station is in NGAZIDJA Island produces 3 MWh and the other is in NZOUWANI Island. Solar energy is the most Significant renewable energy Source and the most effective approach to addressing the challenges of Climate change and energy increase. In the last years, the renewable energy sources were grown at rate 60% growth service of manufacturing cost (IEA, 2021). According to reports, the generation of electricity at a large scale using Solar energy PV potential is a zero net emission scenario.

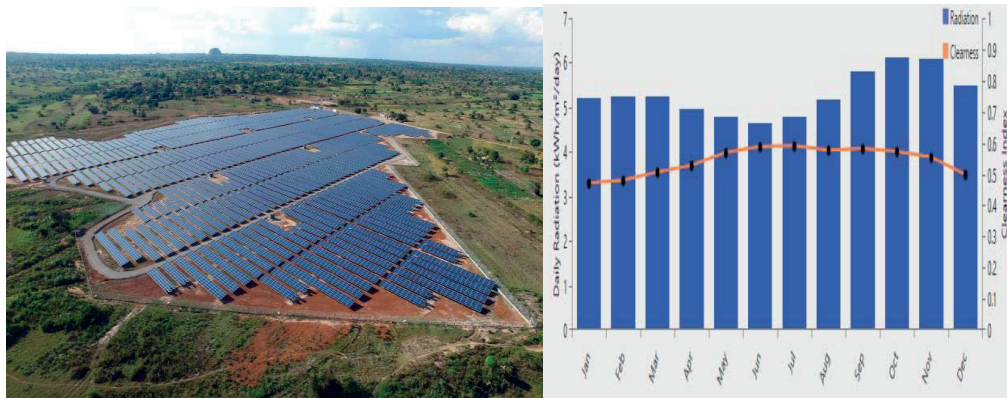


Figure 2. Comoros solar power Station and monthly average solar irradiation

3. CURRENT ELECTRIC POWER SITUATION IN COMOROS ISLAND

Electric power is one of the most problems in Comoros Island, this archipelago island every day has power outage. In Wachili province population suffered more from interrupted electricity. Every day there is electricity outage and sometimes no electricity around 24 hours.

The Comoros power station consists of a substation and each island has a substation, interconnected to the other islands. In Comoros Island 97% of electricity generation is based on the diesel power station. Comoros Island is one of Africa countries that the bill energy is cost so high and 1 KWh is 0.30 \$. The power grid has a much losses, due to the high reactive power (Q). It is expected that the electrical losses is approximated 30% to 35 % according to the office of technical manager of SONELEC. According the technical manager of SONELEC, the Company does not have advanced devices to control the power Grid. Furthermore, all the fossil fuel is imported. This paper reveals the access electricity in the Comoros population around three islands is 8%. The main problem there is no reliable energy statistic. Comoros population is really suffering to electricity. In 2018 SONELEC (Societe National Electricity Comoros) is the responsible for generating, distribution and selling electricity. SONELEC produces 19.4 MWh in NGAZIDJA Island. In the few three islands NGAZIDJA, ZOUWANI, and MOHELI are separated and receives access to power electricity. Due to the lack of investment, and expert electrical engineers in the SONELEC the face much problem of electricity.

3.1. Wind energy

Wind energy is a renewable energy source and is considered one of the fast renewable sources of development. It increased utilization in the Global-wide. Some reports indicated that the wind energy installed in the Global is 760 GW in 2020 (REN21 2012). This advanced technology and development of the wind generator with some significant component of the wind turbine is facility to installed wind energy from varies capacity in nowadays (Li and Chen, 2008). Wind energy is renewable energy and is used of wind turbine to generated electricity. Although the Comoros Island are located in the Indian Ocean the wind energy is limited in Comoros but it is capable of generating electricity in some season.

Month	Average (m/s)
Jan	5.070
Feb	4.920
Mar	3.690
Apr	4.680
May	5.710
Jun	6.250
Jul	6.290
Aug	5.090
Sep	4.260
Oct	4.380
Nov	4.330
Dec	3.860
Annual Average (m/s): 4.88	

Figure 3. Average Wind speed in Wachili province of Comoros

3.2. Geothermal energy

Geothermal, geo means earth and thermal means heat. Geothermal is found under the land and it varies 500 m to 4000 m. Burning molten rock and keep in the rock and vapour in the earth centre. Therefore, it could produce power energy from geothermal.

Comoros Island has an active volcano that can produce electricity. There are many organizations are ready to invest the volcano project in Comoros such as WORLD BANK, PNUD and AFRICA BANK. The Comoros energy estimated that the Comoros volcano could produce 70 MW. Geothermal energy is clean energy and is going to protect the environment from the change climate. Generated electricity from Comoros volcano will support the economy and improving the development. In Ngazidja island has two sources of renewable energy, that will be enough to supply power electricity to all Comoros Island according the SONELEC.



Figure 4. Comoros geothermal source in Kartala

3.3. Hydroelectric power

Hydroelectric power is a renewable energy source and is considered clean and cheap renewable energy. Hydro power plant is the first type of renewable energy that many countries use to produce electricity. Hydroelectric power energy comes from flowing water, when the water is falling with force of gravity it is able to spin turbine of generator and then generate EMF and electrical current to produce electricity. In 1930 French colonization installed hydro power plant in ZOUWAN Island to Generated Electricity. Comoros hydroelectric power plant supply 0.2% of Comoros power grid.

Hydro power plant is considered renewable energy and often more reliable than solar and wind energy. ZOUWANI Island is famous for its many rivers and water flow from the mountains. Here, between 1970 to 1980 many hydro power plants were installed.



Figure 5. hydropower plant in Comoros Zouani Island

4. CONCLUSION

According to this overview study on renewable energy sources in Comoros Island, it is recommended that the Comoros Island government focus on renewable energy for electricity production. One of the ways to solve their electricity problems is to generate electricity from renewable energy sources. Solar energy alone can solve 75% of the electrical problems in Comoros. Generating electricity from renewable energy can improve the economy and be environmentally friendly. Producing electricity from solar energy can also reduce energy bills.

Expanding the use of renewable energy sources, such as solar, wind, and hydroelectric power, can provide a sustainable and reliable solution to the energy crisis in Comoros. Solar energy, in particular, is abundant and can be harnessed effectively to meet a significant portion of the island's electricity needs. By investing in solar power infrastructure, the government can reduce its dependence on imported fossil fuels, which are not only costly but also harmful to the environment.

Moreover, the transition to renewable energy can create job opportunities in the installation, maintenance, and operation of renewable energy systems. This can stimulate local economies and provide new skills and training for the workforce. Additionally, the environmental benefits of renewable energy are substantial, as it reduces greenhouse gas emissions and minimizes the carbon footprint.

In conclusion, focusing on renewable energy sources, especially solar power, is a strategic move for the Comoros Island government. It addresses the pressing issue of electricity shortages, promotes economic growth, and contributes to environmental sustainability. The shift to renewable energy is not just a solution for today but an investment in a cleaner, greener future for Comoros.

5. REFERENCES

- [1] Kassem, Y., Camur, H., Aateg, R. A. F. (2020), *Exploring solar and wind energy as a power generation source for solving the electricity crisis in Libya*, *Energies*, vol. 13, no. 14, p. 370, 2020.
- [2] Bilir, L., Imir, M., Devrim, Y. (2015), *An investigation on wind energy potential and small-scale wind turbine performance at Incek region Ankara, Turkey*. *Energ Convers*, 2015.
- [3] Victoria, M., Haegel, N., Peters, I.M., Sinton, R., Jager-Waldau, A., Del Canizo, C., Breyer, C., Stocks, M., Blakers, A., Kaizuka, I. (2021), *Solar Photovoltaics Is Ready to Power a Sustainable Future*, *Joule* 2021, 5, 1041–1056.
- [4] International Energy Agency (2021), *Analysis and Forecast*, Paris, France; p. 175.
- [5] IEA. (2012), *Measuring progress towards energy for all: power to the people World Energy Outlook* (International Energy Agency), 2012.
- [6] IRENA. (2020), *Renewable Energy Capacity Highlights*; Irena: New York, NY, USA.
- [7] Li, H., Chen, Z. (2008), *Overview of different wind generator systems and their comparisons*, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 2, Issue 2, pp. 123-138, Jun. 2008.

ZAGAĐENOST ZRAKA, KLIMATSKE PROMJENE I AKTIVNOSTI ZA POBOLJŠANJE STANJA

AIR POLLUTION, CLIMATE CHANGES AND ACTIVITIES TO IMPROVE THE CONDITION

M.Sc. Suad Sućeska
SS
Brčanska 7, Sarajevo

REZIME

Smanjenje zagađenosti i temperature zraka su vrlo aktuelne teme. Zagađeni zrak se svakodnevno disanjem unosi u pluća i dalje u organizam. Visok procenat pojedinih otpadnih gasova utiče i na stvaranje efekta staklenika, odnosno povećanje temperature zraka. Povišene temperature zraka utiču na okolinu na razne načine. Sve zajedno utiče na živa bića koja je naseljavaju. Rad obrađuje neprekidno povećavanje zagađenosti zraka kao direktan uzrok mnogih negativnih promjena, ali i kao indirektan uzročnik mnogih promjena okruženja izazvanih klimatskim promjenama. U radu su, takođe, navedene globalne i lokalne aktivnosti koje se poduzimaju za smanjenje porasta zagađenosti i temperature zraka.

Ključne riječi: održavanje, okolina, zagađenost, temperatura zraka.

SUMMARY

Decreasing pollution and temperature of air are very actual topics. Polluted air is taken into the lungs and further into the body by breathing every day. A high percentage of certain waste gases also affects on creation of the greenhouse effect, i.e. increasing the air temperature. Increased air temperatures affect the environment in various ways. Everything together affects the living beings that inhabit it. The article deals with the continuous increase of air pollution as a direct cause of many negative changes, but also as an indirect cause of many environmental changes caused by climate changes. The article also lists global and local activities that have been undertaken to decrease increasing pollution and temperature of air.

Keywords: maintenance, environment, air pollution, air temperature.

1. UVOD

Pojam održavanja se uglavnom vezuje za održavanje raznih mašina, postrojenja, procesa, firmi, reda, računarskih sistema, programa, i drugog. U posljednje vrijeme vrlo aktuelna tema je održavanje okoline. Održavanje mašina i procesa je uvedeno sa ciljem da se određena mašina ili proces održi u radnom stanju. Međutim, zagađenje uzrokovano raznim sekundarnim produktima ljudske djelatnosti je uzrok sve veće zagađenosti naše okoline. Čvrsti i tečni otpad se svuda lako primjećuje. Zagađenost zraka raznim gasovima i česticama koje lebde u zraku je teže primjetiti, ali ih svakodnevno disanjem unosimo u pluća i dalje u

organizam. Osim toga, visok procenat pojedinih otpadnih gasova utiče i na stvaranje efekta staklenika, odnosno povećanje temperature zraka okoline. Povišene temperature zraka okoline utiču na isušivanje riječnih tokova i jezera, približavaju se temperaturi samozapaljenja suhe trave i drugih biljaka, što uzrokuje požare. Oni se šire i na šume, čime se veoma brzo mijenjaju velike površine Zemlje. Povišena temperatura zraka direktno utiče i na čovjeka i razne vrste životinja, insekata i biljaka koji se moraju prilagođavati svim promjenama okoline. Sve veće zagrijavanje okeana utiče na biljke i životinje koje u njima žive, ali i na klimu cijelog planeta,

2. MJERNJE ZAGAĐENOSTI I ODREĐIVANJE KVALITETA ZRAKA

Čovjek nevedeći računa o svom otpadu zagađuje svoju okolinu. Čvrsti i tečni otpad se lako mogu uočiti po gradovima, izletištima, rijekama, jezerima, morima, okeanima, u novije vrijeme i svemiru. Zagađenost zraka je teže uočljiva. Istraživanja su utvrdila da čestice zagađenja iz zraka izazivaju razna oboljenja kod ljudi, životinja i biljaka. U novije vrijeme se zbog prevelikog zagađenja i njegovog direktnog uticaja na zdravlje čovjeka počelo voditi računa o zagađenosti zraka. U tu svrhu napravljeni su razni mjerni instrumenti sa kojima se može odrediti sadržaj nekog gasa i čestica zagađenosti određene veličine u zraku. Rezultati ovih mjerenja u većim gradovima svijeta su postali javno dostupni. Mjerenja zagađenosti zraka se vrše pomoću posebnih mjernih stanica, kao na slici 1.

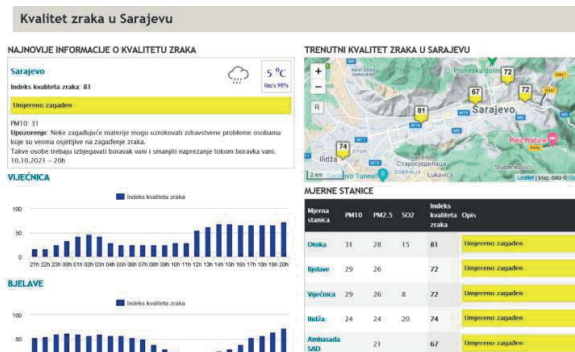


Slika 1: Mjerna stanica za mjerenje zagađenosti zraka

Ove stanice osim opreme za mjerenje raznih zagađenosti zraka sadrže i IKT opremu pomoću koje šalju izmjerene podatke u odgovarajuće baze podataka.

2.1. Aplikacije za prikaz podataka o zagađenosti zraka

Podaci o zagađenosti zraka u gradovima BiH iz gore navedenih baza podataka se mogu pregledati pomoću Web i mobilnih aplikacija. Za veće gradove se čak mogu dobiti i podaci o zagađenosti pojedinih dijelova grada, kako je prikazano na slici 3. Ovim se omogućava široka informiranost o trenutnoj zagađenosti određenih mjesta. Jedna od ovih Web aplikacija je prikazana na slici 2, a nalazi se na Web adresi: <https://zrak.ekoakcija.org/sarajevo> . [15]



Slika 2: Web aplikacija za prikaz kvaliteta zraka u gradovima BiH (Sarajevo)

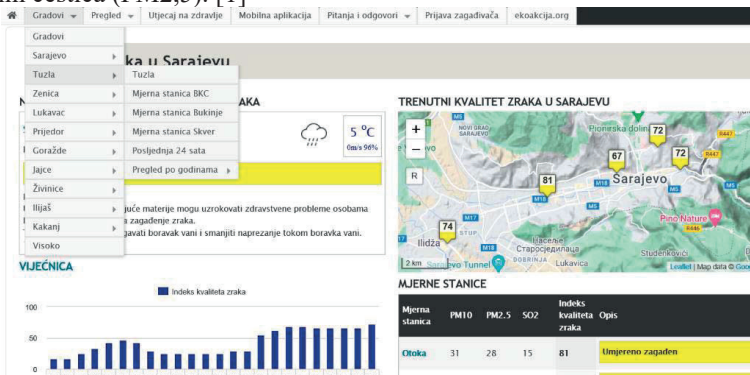
Pristup mjerenim podacima obezbjeđuje precizniju kontrolu zagađenosti. Iz izmjerenih podataka je lako utvrditi da je zagađenost manja za vrijeme padavina i van sezone grijanja. Analiza rađena u okviru IMPAQ je utvrdila da su najveći izvori zagađenosti zraka u Sarajevu loš ugalj koji se u zimskom periodu koristi za grijanje u privatnim domaćinstvima i izduvni gasovi iz vozila sa unutrašnjim sagorjevanjem. [1]

Navedeni sistemi za dobivanje informacija o zagađenosti zraka su dostupni u više gradova BiH. U nekim gradovima mjerenje se vrši i na više lokacija.

Za mjeru kvaliteta zraka u BiH se koristi index kvaliteta zraka (IKZ) kao vrijednost stanja zagađujućih materija izmjerenih na nekom mjernom mjestu. [2] Indeksi kvaliteta zraka se grupiraju u 6 kategorija u zavisnosti od štetnosti na zdravlje čovjeka:

1. dobar: 0-50,
2. umjeren: 51-100,
3. nezdrav za osjetljive grupe: 101-150,
4. nezdrav: 151-200,
5. vrlo nezdrav: 201-300,
6. opasan: >301. [3]

U zraku su, kao zagađivači, zabilježene znatne količine oksida azota (NO_x), oksida sumpora (SO_x), i sitnih čestica ($\text{PM}_{2,5}$). [1]



Slika 3: Web aplikacija za prikaz kvaliteta zraka u gradovima BiH [16]

Samo mjerenje, naravno, ne rješava problem zagađenosti zraka. Za rješavanje problema zagađenosti zraka utvrđenih mjerenjem potrebno je djelovati sa ciljem smanjenja zagađenosti, odnosno eliminisanja (net zero) zagađenosti zraka.

3. MJERENJE TEMPERATURE

Zagađenost zraka štetnim gasovima: CO₂, NO_x, SO_x, CH₄ (metan), ..., dovodi do efekta staklenika (green house). Efekat staklenika dovodi do povećanja temperature zraka. Izmjerene prosječne temperature zraka svake godine bilježe rast. Tako je 06.06.2023. bio najtopliji dan zabilježen na Zemlji kada je prosječna temperatura iznosila 17,08°C. Prosječna temperatura zraka na Zemlji u 06.2023. iznosila je 16,78°C (15,5 + 0,95+0,33). i to je najtoplija prosječna temperatura zraka na Zemlji za 06. mjesec. [3] Međutim, i za 07.2023. je takođe potvrđeno da je bio najtopliji mjesec ikada zabilježen na Zemlji, sa prosječnom temperaturom zraka 16,96°C (16,63 + 0,33). [4] Prosječna temperatura zraka na Zemlji u 08.2023. iznosila je 16,82°C. i to je takođe bila najveća prosječna temperatura zraka na Zemlji za 08. mjesec. [5] I za 09.2023. je zabilježena najveća prosječna temperatura zraka na Zemlji za 09. mjesec, koja je iznosila 16,83°C. [6]

Temperature površine okeana takođe rastu, a prema podacima klimatskog opservatorija Evropske unije 30.06.2023. je zabilježena najveća vrijednost temperature okeana: 20,96°C. [3] Negativan uticaj povišene temperature zraka okoline zahtjeva pažljivije praćenje njenih vrijednosti.

Mjerenje temperature u Sarajevu ima dugu istoriju. Meteorološki zapisi u BiH (u Sarajevu) su prisutni od 1665.. Meteorološke službe za mjerenje temperature na području BiH su nastajale slijedećim hronološkim redom: 1894. Bjelašnica, 1898. Mostar i Tuzla, i 1902. Sarajevo. [7]

Temperatura zraka okoline je važna ne samo za čovjeka, nego i za sve žive organizme. U posljednjih 30-tak godina uočen je nagli porast temperature zraka. Ova pojava se ne odnosi samo na gradove BiH. Ona je globalna, za cijelu Zemljinu kuglu. Povećanja temperature zraka su uzrokovala znatne promjene na nekim dijelovima Zemlje. Zato je potrebno intenzivno pratiti izmjerene vrijednosti temperature.

Podaci o dnevnim temperaturama u periodu od 01.2014. do prethodnog mjeseca tekuće godine u 4 grada BiH (Bihać, Mostar, Sarajevo i Zenica) mogu se pratiti i pomoću Web aplikacije eDijagram i mobilne aplikacije mTemperature. Web aplikacija eDijagram se nalazi na adresi:

<http://www.aplikacije.suads.com.ba/eDijagram>

i slobodna je za upotrebu. Mobilna aplikacija mTemperature se može instalirati sa adrese:

<http://aplikacije.suads.com.ba/mTemperature/mTemperature.apk>

Upotreba ove aplikacije je takođe besplatna.

4. MJERE KOJE SE PODUZIMAJU ZA RJEŠAVANJE NAVEDENIH PROBLEMA

Mjerenje zagađenosti i temperature zraka ne rješavaju probleme koji uzrokuju njihove povišene vrijednosti. Za rješavanje problema stalnog rasta zagađenosti i prosječne temperature zraka utvrđenih mjerenjem potrebno je djelovati sa ciljem sprečavanja rasta njihovih veličina iznad određenih vrijednosti. U svijetu se poduzimaju razne mjere za rješenje problema sa zagađenošću zraka i stalnog rasta njegove prosječne globalne temperature.

Zanačajniji doprinosi vezani za globalne klimatske promjene i porast prosječne temperature započeli su sa Kyoto Protokolom 11.12.1997. na Konferenciji Strana 3 (COP3). Ovaj protokol uvodi u upotrebu okvirnu konvenciju UN o promjeni klime (UNFCCC) kojom se razvijene i zemlje u razvoju pozivaju da ograniče i smanje emisije Greenhouse gasova (GHG) koji uzrokuju efekat staklenika. Na snagu je stupio 16.02.2005. nakon što ga je potpisalo 55 država. Trenutno ga potpisuju 192 države članice. [8]

Dodatak B Kyoto Protokola postavlja ciljeve za smanjenje emisije GHG za 37 industrijaliziranih država i država u razvoju i EU, koji treba da reduciraju emisije GHG za 5% u odnosu na emisiju iz 1990. za 5 godišnji period od 2008. do 2012. – prvi period obaveze.

Praćenjem prosječne globalne temperature utvrđen je njen stalni rast, što je uzrokovalo da se iznosi emisije GHG još više reduciraju i da se određuju rokovi za dostizanje 0% zagađenja sa GHG.

Tako je na konferenciji COP18 održanoj u Dohi 08.12.2012. prihvaćena obaveza da se u periodu od 2013. do 2020. emisije GHG reduciraju za najmanje 18% u odnosu na nivo iz 1990.. [8]

Pojavljuje se i još jedna vrsta rješenja problema stalnog rasta prosječne globalne temperature: fleksibilni tržišni mehanizmi, koji baziraju na trgovini dozvolama emisije GHG. [8]

Rok za dostizanje 0% zagađenja sa GHG postavljen je tek na konferenciji COP21 održanoj od 30.11. do 12.12.2015. u Parizu. Na ovoj konferenciji je 196 država potpisalo Pariški sporazum kao pravno obavezujući međunarodni ugovor o klimatskim promjenama. Države EU su se obavezale da rok za postizanje klimatske neutralnosti privrede i društva bude 2050.. [18] Pariški sporazum je stupio na snagu 04.11.2016.. Korištenje uglja je označeno kao najveći uzročnik zagađenja sa CO₂. Ovo je uzrokovalo da se nakon Pariškog klimatskog sporazuma iz 2015. u svijetu odustalo od građenja 3/4 planiranog broja termoelektrana u 44 države.

Stalni rast globalne temperature zraka dovodi do promjena ugovorene veličine emisije CO₂. Za postizanje klimatske neutralnosti i ciljeva utvrđenih Pariškim klimatskim sporazumom potrebno je još više smanjiti emisiju CO₂. Precizirano je da se u sljedećih deset godina emisije CO₂ moraju smanjiti za 79%, od ukupne emisije do 2019.. [9] EU je krajem 2020. napravila dugoročnu strategiju smanjenja emisija GHG, kojom se obavezuje na smanjenje emisija GHG za najmanje 55 % do 2030.. [10]

Naredne COP konferencije nisu donijele većih izmjena. Slijedi njihov spisak po hronološkom redoslijedu:

- COP27 od 06. do 20.11.2022. u Sharm El-Sheikh-u, Egipat;
- COP28 od 30.11. do 12.12.2023. u Ujedinjenim Arapskim Emiratom,
- COP29 od 11. do 22.11.2024. treba da se održi u Bakuu, Azerbejdžan.

EU okruženje se pokušava zaštititi uvođenjem dodatnih poreza i taksi na trgovinu sa zemljama koje imaju neodgovornu klimatsku politiku. Izvoz iz takvih zemalja u EU bit će praćen uvoznim carinama i drugim preprekama, zbog zaštite vlastite industrije, ali i uticaja na druge zemlje da se odgovorno ponašaju prema klimi.

Za proizvođače cementa, željeza, čelika, đubriva, aluminija i električne energije na Zapadnom Balkanu je pripremljen CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism). CBAM je prekogranična taksa na CO₂, koja se postepeno uvodi od 2023. do 2026., kada počinje njena zvanična primjena. Prekogranična taksa će se primjenjivati na uvoz robe iz zemalja koje nisu članice Evropske unije (EU). [17] CBAM će se plaćati na direktne emisije, ali će se proširiti i na indirektno emisije i na druge proizvode. Prema ovome proizvođači električne energije iz Bosne i Hercegovine i drugih zemalja Zapadnog Balkana koji izvoze u EU, morat će plaćati taksu na CO₂. [11]

Povećanje zagađenosti i temperature zraka se primjećuje i lokalno, kao i aktivnosti za rješavanje ovih problema. Sarajevo je jedan od najzagađenijih gradova u BiH, EU, pa ponekad i u svijetu. Sistemi za mjerenje zagađenosti su postavljeni na više lokacija u gradu. Utvrđeno je da su veliki zagađivači zraka grada mala ložišta privatnih kuća i vozila sa unutrašnjim sagorjevanjem. Zato je kanton zakonom zabranio upotrebu uglja za loženje u privatnim kućama, a zimi se po potrebi uvode i mjere ograničenja upotrebe vozila sa unutarnjim sagorjevanjem. Kanton Sarajevo je sa UNDP ugovorio da se za zamjenu peći i kotlova na uglj domaćinstvima kantona obabzbedi subvencija u iznosu od 5.000 do 7.000 KM. [12] Kompletiran je Akcioni plan strategije ograničenja korištenja čvrstih goriva u

Kantonu Sarajevo za period od 2023. do 2033.. [13] Vlada Kantona Sarajeva je donijela odluku o zabrani posjedovanja i korištenja uglja od 01.11.2021.. [14]

Značajan doprinos smanjenju emisije CO_n, NO_n, SO_n i smanjenju temperature zraka svakako je prelazak na upotrebu vozila sa električnim pogonom umjesto vozila na pogon sa tečnim gorivom.

Veliki zagađivači su i termoelektrane na uglj. Od Pariškog sporazuma nastoje se smanjiti i ukidati ova postrojenja. Sve više električne energije se proizvodi iz obnovljivih izvora energije.

5. ZAKLJUČAK

Čovjek sve više zagađuje svoje okruženje. Zagađenja zraka raznim gasovima i česticama je teže primjetiti od čvrstog i tečnog otpada. Povećanje zagađenosti zraka utiče na zdravlje i povećanje temperature zraka okoline. Nепrekidni porast zagađenosti i temperature zraka su postali globalni problem. Zato se poduzimaju razne aktivnosti da se povećanja zagađenosti i temperature zraka okoline dovedu unutar dozvoljenih veličina. Za najveće zagađivače zraka određeni su procesi sa loženjem uglja i transport sa pogonom sa unutarnjim sagorjevanjem. Države svijeta poduzimaju razne aktivnosti za smanjenje rasta zagađenosti i temperature zraka od kojih su neke: COP konferencije, CBAM, obnovljivi izvori energije, vozila na električni pogon. EU je odredila 2050. kao godinu u kojoj će se na ovom području postići klimatska neutralnost. I u gradovima BiH se takođe poduzimaju aktivnosti mjerenja i smanjivanja zagađenosti i temperature zraka.

6. REFERENCE

- [1] <https://zrakubih.ba/bs/novosti/kvalitet-zraka-i-rezultati-istrazivanja-u-bih/32> , pristupano 20.04.2022.,
- [2] <https://www.fhmzbih.gov.ba/latinica/ZRAK/AQI-metodologija.php> , pristupano 20.04.2022.,
- [3] <https://www.bug.hr/ekologija/protekli-srpanj-potvrđen-kao-najtopliji-mjesec-ikada-zabilježen-34904> , pristupano 10.08.2023.,
- [4] <https://www.klix.ba/vijesti/svijet/evropski-klimatski-opservatorij-potvrdio-da-je-protekli-juli-najtopliji-ikada-zabiljezeni-mjesec/230808031> , pristupano 08.08.2023.,
- [5] <https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-august-2023> , pristupano 10.09.2023.,
- [6] <https://www.bug.hr/istrazivanja/nastavak-rekordne-godine-i-rujan-je-bio-najtopliji-u-povijesti-mjerenja-35866> , pristupano 09.10.2023.,
- [7] <http://www.fhmzbih.gov.ba/latinica/O%20NAMA/povijest.php> , pristupano 20.04.2022.,
- [8] https://unfccc.int/kyoto_protocol , pristupano 20.04.2022.,
- [9] <https://www.klix.ba/vijesti/svijet/nakon-pariskog-klimatskog-sporazuma-odustalo-se-od-gradnje-velikog-broja-termoelektrana/210915051> , pristupano 20.04.2022.,
- [10] <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/paris-agreement/> , pristupano 20.04.2022.,
- [11] Poslovne novosti 12.10.2021.,
- [12] <https://www.klix.ba/vijesti/bih/undp-subvencionira-zamjenu-peci-i-kotlova-na-ugalj-u-kantonu-sarajevo/210104124> , pristupano 20.04.2022.,
- [13] https://mkpigo.ks.gov.ba/sites/mkpigo.ks.gov.ba/files/2023-08/Strategija%20final%2018.08.2023_0.pdf , pristupano 20.04.2022.,
- [14] <https://www.klix.ba/vijesti/bih/u-sarajevu-bi-od-novembra-sljedece-godine-treba-biti-zabranjen-ugalj/201127062> , pristupano 20.04.2022.,
- [15] <https://zrak.ekoakcija.org/sarajevo> , pristupano 14.10.2024.,
- [16] <https://zrak.ekoakcija.org> , pristupano 20.04.2022.,

[17] Regulation (EU) 2023/956 Of The European Parliament and Of The Council, Official Journal of the European Union, 16.05.2023.,

[18] Zero Emission Vehicles: First 'Fit For 55' Deal Will End The Sale Of New CO₂ Emitting Cars In Europe By 2035, European Commission - Press release, Brussels, 28.10.2022..

SEKCIJA 4
SESSION 4

**SIMULACIJA I ODRŽAVANJE UPRAVLJANJA PROCESOM
PROIZVODNJE AMBALAŽE
UZ KORIŠTENJE SENZORA BLIZINE**

**SIMULATION AND MAINTENANCE OF PACKAGING PRODUCTION
PROCESS MANAGEMENT
USING PROXIMITY SENSORS**

**Džemila Badnjar, magistar mašinstva
r. prof. dr. sc. Malik Čabaravdić, dipl. ing. maš.
v. as. mr. Dženana Tomašević, dipl. ing. maš.
Mašinski fakultet-Univerzitet u Zenici
Zenica, Bosna i Hercegovina**

**Almir Osmanović, dipl. ing. maš.
Mašinski fakultet-Univerzitet u Tuzli
Tuzla, Bosna i Hercegovina**

REZIME

Svi proizvodni procesi danas se pokušavaju u većoj ili manjoj mjeri automatizirati. Porastom automatizacije došlo je do sve veće potrebe za senzorima bez kojih automatizirani sistemi ne bi bili mogući. U industrijskoj praksi se sve više koriste senzori blizine koji poboljšavaju radni kapacitet i kvalitetu samog rada. Cilj rada jeste pokazati da se stvarni proces proizvodnje ambalaže proizvoda može simulirati programiranjem PLC-a, te inspirisati različite grane industrije na moguća poboljšanja određenih proizvodnih segmenata. Sigurnost i održavanje sistema industrijske automatizacije ključni su za osiguravanje pouzdanog i učinkovitog rada proizvodnih procesa. Automatizacija omogućuje povećanu pouzdanost, produktivnost i preciznost u procesu proizvodnje.

Ključne riječi: programabilni logički kontroler PLC, senzori blizine, pouzdanost, održavanje

ABSTRAKT

All production processes are being attempted to be automated to a greater or lesser extent today. With the increase in automation, there was an increasing need for sensors without which automated systems would not be possible. In industrial practice, proximity sensors are used more and more, which improve the working capacity and the quality of the work itself. The aim of the work is to show that the actual process of production of product packaging can be simulated by PLC programming, and to inspire different branches of industry to possible improvements in certain production segments. Security and maintenance of industrial automation systems are key to ensuring reliable and efficient operation of production processes. Automation enables increased reliability, productivity and precision in the production process.

Keywords: programmable logic controller PLC, proximity sensors, reliability, maintenance

1. UVOD

U današnje vrijeme sve veća automatizacija kompleksnih proizvodnih sistema zahtjeva primjenu komponenata koje su sposobne prikupiti i prenijeti informacije koje su bitne za proizvodni proces. S obzirom da senzori upravo ispunjavaju ovu zadaću to znači da u posljednjih nekoliko godina postaju iznimno značajni u mjerenju, upravljanju i regulaciji. Velika je raznolikost upotrebe senzora blizine. Kao najrašireniji primjer upotrebe senzoričke u industriji može se navesti upotreba senzora na tvorničkim trakama za pakiranje u velikim, ali i malim postrojenjima. Pored senzora postoje i drugi elementi koji mogu doprinijeti poboljšanju proizvodnje. Jedan od njih je i programabilni logički kontroler (*PLC*). *PLC* je uređaj koji zamjenjuje relejnu logiku, te se koristi u industriji za upravljanje procesima i za kontrolu proizvodnih procesa. To je digitalni elektronički sistem koji se primjenjuje u industriji i ima programabilnu memoriju koja služi za internu pohranu upravljačkih naredbi za implementiranje specijalnih funkcija kao što su naprimjer logičko upravljanje, funkcije odbrojavanja, brojanja i aritmetičke funkcije. Jedan tipičan predstavnik *PLC* uređaja se sastoji od centralne procesorske jedinice CPU, ulaznih i izlaznih dijelova koji mogu da budu digitalni/analogni, memorijskog bloka, mrežnog modula koji služi za napajanje i komunikaciju te modula za proširenje. Za programiranje *PLC* uređaja postoje mnogi programski jezici. Najviše u upotrebi jest način programiranja ljestvičastim/kontaktim dijagramima (ladder dijagram). [2] Uz ljestvičaste dijagrame, u upotrebi su još i instrukcijske liste (statement list), te funkcionalno blokovski dijagrami (function blok diagram). Za simulaciju upravljanja procesom proizvodnje ambalaže pomoću senzora blizine korišteno je ljestvičasto programiranje *PLC*-a. Ljestvičasti dijagram vrlo je sličan šemi strujnog upravljačkog kruga. Kod šeme strujnog kruga, simboli predstavljaju stvarne uređaje i njihovo ožičenje, dok kod ljestvičastih dijagrama oni predstavljaju naredbe u programu. Pored toga, šema strujnog kruga prikazuje stanje kontakta (*otvoreno/zatvoreno*) dok se u ljestvičastom dijagramu logikom ispituje da li je neka naredba istinita (*true*) što predstavlja logičko '1' ili je neistinita (*false*) što predstavlja logičko '0'. [5] Skratili su prazan hod u proizvodnim pogonima, koji bi nastajao kada bi se mehanički releji istrošili/pokvarili. Smanjili su i potrošnju električne energije koja je bila potrebna za upravljanje sistemom. Zbog brzine *PLC* uređaja, vrijeme trajanja ciklusa proizvodnih procesa je smanjeno što na kraju rezultira većom produktivnošću proizvodnog procesa. Područje primjene *PLC*-a u industriji, do sada je obrađeno od strane nekolicine autora, neki od njih su spomenuti u tekstu koji slijedi:

Liton i drugi su u radu [6] se bavili primjenom *PLC*-a u industriji procesa punjenja boca. Rezultati ovog istraživanja pokazuju da je za 3 sekunde moguće napuniti bocu od 200 ml.

Fathahillah i drugi su u radu [7] se bavili procesom pakiranja proizvoda na temelju boje proizvoda. Ispitivanjem je utvrđeno da uređaj može razdvajati i pakirati proizvode po boji, te da se sistem za pakiranje može nadzirati i upravljati pomoću HMI-ja.

Romadhon i Widyaningrum su u radu [8] se bavili istraživanjem procesa automatskog pakiranja hrane, jer proces pakiranja hrane pomoću konvencionalnog uređaja nije davao zadovoljavajuće rezultate. Tim istraživanjem je prikazano da bi proces automatskog pakiranja bio produktivniji i brži.

Cilj ovog rada jeste prikazati da postoje i izvedbe upravljanja sistemima manje složenosti kod kojih primjena *PLC*-a može biti ekonomski opravdana. Uspješan rad proizvodnog procesa ovisi o programabilnom logičkom kontroleru. Zbog toga je ključno da su *PLC* uvijek operativni i da rade na najvišoj razini učinkovitosti. Redovno preventivno održavanje *PLC* sistema je jedna od najvažnijih strategija za njegovo dobro funkcioniranje. Aktivnosti preventivnog održavanja *PLC*-a mogu biti dugotrajne, ali mogu uštedjeti mnogo problema, skupih popravaka i zastoja proizvodnje.

2. ANALIZA UPRAVLJANJA PROCESOM PROIZVODNJE AMBALAŽE UZ KORIŠTENJE SENZORA BLIZINE

U ovom poglavlju rada prikazana je analiza linija programskog koda ljestvičastog programiranja PLC korištenog za simulaciju upravljanja procesom proizvodnje ambalaže. Simulacija prikazanog procesa proizvodnje ambalaže je izvršena na radnoj stanici PLC-a, smještenog u laboratoriji Fakulteta. Određeni elementi stvarnog procesa proizvodnje ambalaže zamjenjeni su sa elementima radne stanice PLC-a.

Za svaku liniju koda predstavljena je posebna slika sa objašnjenjem. U pitanju je ambalaža koja se radi na horizontalnoj automatskoj mašini, a ne ručno, čime se povećava produktivnost uz smanjenje troškova poslovanja. Upravljačka ploča je glavni odjeljak iz kojeg se mašina pokreće ili iz kojeg se mašinom upravlja. Ovaj dio je bitan za cjeloukupnu operativnu osnovu uređaja. Elementi upravljačke ploče su prikazani na slici 1.A oni su: taster (zelena) za označavanje početka rada, taster (crvena) za proces zaustavljanja rada, taster za povlačenje materijala, taster za fotoelektrični senzor, brojači.



Slika 1. Upravljačka ploča horizontalne automatske mašine

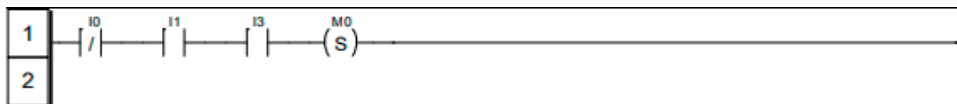
Proces pravljenja ambalaže počinje tako što se cilindar (slika 2.a) na kojem se nalazi materijal za ambalažu pokreće pomoću motora i dolazi na traku (slika 2.b) gdje se pomoću valjaka oblikuje ambalaža. Zatim ambalaža preko uzdužnog valjka kojeg pokreće drugi motor ,dolazi do fotoelektričnog senzora (slika 2.c) koji ima ulogu da označi dio na ambalaži na kojem će se vršiti rezanje. Nakon što senzor označi dio gdje se siječe ambalaža, ona dolazi preko ploče do rezača (slika 2.d). Ono što je važno reći za senzor jeste da je osjetljiv na materijale koji daju odsjaje, poput materijala koji imaju boju srebra ili zlata. Proces se završava tako što rezač preko označenog dijela siječe ambalažu.



a) cilindar b) traka za oblikovanje c) fotoel. senzor d) rezač

Slika 2. Elementi horizontalne automatske mašine za proizvodnju ambalaže proizvoda

Elementi prve linije programskog koda (slika 3) su povezani serijski. Ladder dijagram se izvršava s lijeva na desno. Prva linija programskog koda se odnosi na uslov za rad foto-ćelije sistema (foto-senzor). Uslov za rad foto-ćelije sistema će se ostvariti ako je ulaz (taster 1) I_0 u stanju **logičke nule 0**, ulaz (taster 2) I_1 u stanju **logičke jedinice 1** i ulaz (taster 3) I_3 u stanju **logičke jedinice 1**.



Slika 3. Prva linija programskog koda

Druga linija programskog koda (slika 4) predstavlja uslov za blokadu foto-ćelije. Ova linija programskog koda je usko povezana s prvom linijom u kojoj je **setiran** rad foto-ćelije. Memorija M_0 -kapacitivni senzor će biti u stanju **logičke nule 0** ako je ulaz (taster 1) I_0 u stanju **logičke jedinice 1**, a ulaz (taster 3) I_3 u stanju **logičke nule 0**.



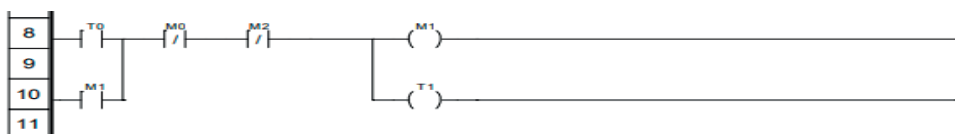
Slika 4. Druga linija programskog koda

Treća linija programskog koda (slika 5) se odnosi na trenutak dobijanja uslova za početak vuče, tj. povlačenje materijala sa cilindra. Omogućavanje uslova za početak vuče će se ostvariti ako je ulaz (taster 4) I_2 u stanju **logičke jedinice 1**, memorija M_0 (kapacitivni senzor) u stanju **logičke nule 0** te ulaz (šalter 1) I_4 u stanju **logičke jedinice 1**.



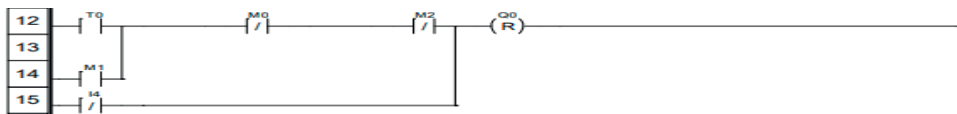
Slika 5. Treća linija programskog koda

Četvrta linija programskog koda (slika 6) predstavlja proces isključenja kočnice do uključenja spojnice. Kod ove programske linije koda imamo funkciju **samoodržanja (latching function)**. Prvi ciklus PLC-a, tj. postavljanje izlaza M_1 (zelena_1) i T_1 (zelena_2) u stanje **logičke jedinice 1** će se realizovati ako je ulaz (optički senzor) T_0 u stanju **logičke jedinice 1**, memorija M_0 (kapacitivni senzor) u stanju **logičke nule 0** te memorija M_2 (šalter 2) u stanju **logičke nule 0**. M_1 će samoodržavat sebe jer je u paralelnoj vezi sa ulazom uz dopuštenja da su M_0 i M_2 u logičkoj nuli. Drugi ciklus PLC-a bi omogućavao da ulaz T_0 -optički senzor **ne mora biti** u stanju **logičke jedinice 1**. Izlazi M_1 i T_1 će biti u stanju **logičke jedinice 1** jer je M_1 postavljen u prvom ciklusu i **samoodržavat** će izlaze M_1 i T_1 sve dok podesimo memoriju M_0 (kapacitivni senzor) u stanje **logičke jedinice 1** i/ili memoriju M_2 (šalter 2) u stanje **logičke jedinice 1**.



Slika 6. Četvrta linija programskog koda

I peta linija programskog koda (slika 7) kao i prethodna se odnosi na proces isključenja kočnice do uključenja spojnice. Uslov za resetiranje **Reset (R)** izlaza Q_0 (crvena_1)-kočnica u stanje **logičke nule 0** možemo ostvariti u tri slučaja. Prvi slučaj se realizuje ako je ulaz (optički senzor) T_0 u stanju **logičke jedinice 1**, memorija (kapacitivni senzor) M_0 u stanju **logičke nule 0**, memorija (šalter 2) M_2 u stanju **logičke jedinice 1**. Drugi slučaj se realizuje ako je memorija (zelena_1) M_1 u stanju **logičke jedinice 1**, memorija (kapacitivni senzor) M_0 u stanju **logičke nule 0**, memorija (šalter 2) M_2 u stanju **logičke jedinice 1**. Treći slučaj ujedno i najjednostavniji se realizuje ako je ulaz (šalter 1) I_4 u stanju **logičke nule 0**;



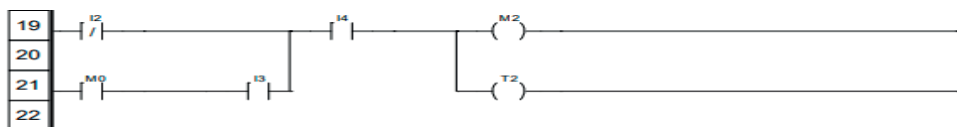
Slika 7. Peta linija programskog koda

Elementi naredne linije programskog koda (slika 8) su povezani serijski. Uslov za postavljanje izlaza Q_1 -crvena_2 u stanje **logičke jedinice 1** će se ostvariti ako je ulaz (zelena_2) T_1 u stanju **logičke nule 0**, ulaz (šalter 1) I_4 u stanju **logičke jedinice 1**, memorija (šalter 2) M_2 u stanju **logičke nule 0**;



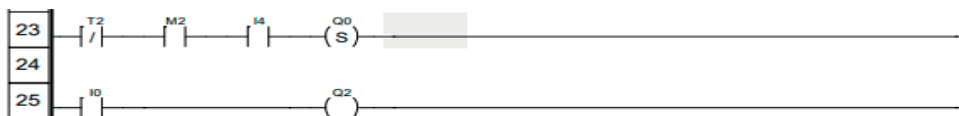
Slika 8. Šesta linija programskog koda

Elementi sedme linije programskog koda (slika 9) su povezani serijski i paralelno. Uslov za postavljanje memorije M_2 (šalter_2) i izlaza T_2 (bijela_1) u stanje **logičke jedinice 1** može se ostvariti u dva slučaja. Prvi slučaj će se realizovati ako je ulaz (taster 4) I_2 u stanju **logičke nule 0** a ulaz (šalter 1) I_4 u stanju **logičke jedinice 1**. Drugi slučaj će se realizovati ako je: memorija (kapacitivni senzor) M_0 u stanju **logičke jedinice 1**, ulaz (taster 3) I_3 u stanju **logičke jedinice 1** te ulaz (šalter 1) I_4 u stanju **logičke jedinice 1**.



Slika 9. Sedma linija programskog koda

Pretposljednja linija programskog koda (slika 10) omogućuje stvaranje uslova za postavljanje **SET (S)** izlaza Q_0 (crvena_1)-kočnica u stanje **logičke jedinice 1** ćemo ostvariti ako je ulaz (bijela_1) T_2 u stanju **logičke nule 0**, memorija (šalter 2) M_2 u stanju **logičke jedinice 1**, te ulaz (šalter 1) I_4 u stanju **logičke jedinice 1**. Posljednja linija programskog koda omogućava postavljanje izlaza Q_2 (bijela_2)-brojač u stanje **logičke jedinice 1**, ako je ulaz (taster 1) I_0 u stanju **logičke jedinice 1**;



Slika 10. Posljednja linija programskog koda

2.1. Usporedba stvarnog i simuliranog procesa proizvodnje ambalaže

Ovo poglavlje rada prikazuje usporedbu stvarnog i simuliranog procesa proizvodnje ambalaže. Opisat će se odnos elemenata stvarnog procesa i prikazanih linija programskog koda simulacije procesa. Prve dvije linije programskog koda se odnose na ostvarivanje uslova za rad foto-ćelije i za blokadu foto-ćelije kod stvarnog procesa. Kod prve linije programskog koda nalaze se ulazni signali: I_0 - induktivni prekidač-taster 1, I_1 -foto ćelija-taster 2, I_3 –grebenasti prekidač foto ćelije-taster 3, te izlazni signal memorija M_0 -dozvola za rad foto-ćelije-kapacitivni senzor. Da bi se omogućila dozvola rada foto-ćelije stvarnog sistema tj. da bi izlazni signal M_0 prve linije programskog koda bio u stanju logičke jedinice tj. u stanju „uključeno“, ulazni signal I_0 mora biti u stanju logičke nule a ulazni signali I_1 i I_3 u stanju logičke jedinice. Druga linija programskog koda je usko povezana s prvom linijom. Ova linija programskog koda omogućava ostvarivanje uslova za blokadu rada foto_ćelije stvarnog sistema. Da bi kapacitivni senzor blizine odnosno izlazni signal M_0 bio u stanju logičke nule tj. „isključeno“ moraju ulazni signali I_0 -taster 1 da bude u stanju logičke jedinice tj. „uključeno“ a ulazni signal I_3 –taster 3 da bude u stanju logičke nule tj. „isključeno“. Pri tome elementi druge linije programskog koda moraju biti povezani paralelnom vezom. Treća linija programskog koda se odnosi u stvarnom procesu na dobijanje uslova za početak vuče, tj. pokretanje materijala sa cilindra. Kod ove linije programskog koda nalaze se ulazni signali I_2 -induktivni prekidač_vuča_taster 4 i I_4 –samoodržanje-šalter 1, te kapacitivni senzor- M_0 -dozvola rada_foto_ćelije. A izlazni signal je T_0 -optički senzor što odgovara dobijanju uslova_vuče. Trenutak dobijanja uslova za početak vuče odnosno izlazni signal T_0 imat će status „uključeno“ ako su tasteri I_2 i I_4 u stanju logičke jedinice tj. imaju status „uključeno“ a taster M_0 u stanju logičke nule, tj. ima status „isključeno“. Četvrta i peta linija programskog koda predstavljaju dio stvarnog procesa koji se odnosi na proces isključenja kočnice do uključjenja spojnice. Kod ove linije programskog koda pored prethodno navedenih ulaznih signala T_0, M_0, I_4 , nalaze se još i ulazni signali M_2 odgovara blokadi vuče stvarnog procesa-šalter 2, M_1 -zeleni_1 odgovara uslovu vuče stvarnog procesa a izlazni signal T_1 -zeleni_2 (dioda) odgovara zadržki kočnice_spojnice stvarnog procesa. Da bi se aktivirali izlazni signali M_1 i T_1 odnosno da bi bili u stanju logičke jedinice tj. da bi imali status „uključeno“ moraju ulazni signali M_0 i M_2 biti „isključeni“ a ulazni signal T_0 status „uključeno“. Ovaj dio odgovara procesu isključenja kočnice do uključjenja spojnice. Naredna linija koda obezbjeđuje da kočnica bude isključena a spojnica uključena, tj. da izlazni signal Q_0 -kočnica-crvena_1 bude u stanju logičke nule tj. ima status „isključeno“. To će se realizovati ako su ulazni signali T_0 i M_2 „uključeni“ a ulazni signal M_0 „isključeno“. Šesta i sedma linija programskog koda se odnose na obrnut proces od prethodne dvije linije programskog koda. Ove dvije linije programskog koda se odnose na proces isključenja spojnice do uključjenja kočnice. Kod ove linije programskog koda pored prethodno navedenih signala imamo i signale Q_1 i T_2 . Da bi izlazni signal Q_1 -crvena_2(dioda)-spojnica bio u stanju logičke jedinice tj. imao status „uključeno“ ulazni signali M_2 i T_1 moraju biti u stanju logičke nule, a ulazni signal I_4 u stanju logičke jedinice. U narednoj liniji programskog koda da bi se aktivirao šalter (M_2)i dioda bijela_1 (T_2), mora da ulazni signal I_2 bude u stanju logičke nule, a ulazni signal I_4 logičke jedinice. Da bi se uključio tj. da bude u stanju logičke jedinice izlazni signal Q_0 -kočnica-crvena_1 u narednoj liniji programskog koda mora da ulazni signal T_2 -zadržka_spojnica_kočnica_bijela_1 mora da bude u stanju logičke nule tj. „isključena“ a ulazni signali M_2 -šalter_2 i I_4 -šalter_1 budu u stanju logičke jedinice tj. uključeni. Posljednja linija programskog koda se odnosi na aktiviranje brojača- Q_2 -bijela_2 stvarnog procesa proizvodnog sistema mora taster 1- I_0 - bude u staju logičke jedinice, tj. uključen.

3. ODRŽAVANJE PRIKAZANOG PROIZVODNOG PROCESA

Ključno je provoditi redovno održavanje automatiziranih proizvodnih procesa. Kada se pravilno održavaju proizvodni procesi, automatizirane uređaje i opremu ne bi trebalo mijenjati, osim ako nije došlo do promjene u dizajnu proizvoda ili je potrebno nadograditi tehnologiju. Održavanje je potrebno kako bi se osiguralo da sistem automatizacije pruža stalne prednosti. Općenito postoje dvije grupe održavanja, a to su: korektivno i preventivno. Neplanirano korektivno održavanje se obično pokreće nakon što je kvar rezultirao smanjenom proizvodnjom i zbog toga može biti skupo. Dobro osmišljeno preventivno održavanje smanjuje rizik od kvarova i zbog toga je obično isplativije. Preventivno održavanje ima za cilj pružanje održavanja u planiranim intervalima, na temelju, naprimjer broja sati rada sredstava što određuje proizvođač. Problem s ovom vrstom održavanja je u tome što ili dolazi prerano ili dolazi kasno. Programabilni logički kontroler ključan je za nesmetan rad proizvodnog procesa. Zato je veoma važno da PLC radi s najvećom učinkovitošću. Jedan od najvažnijih načina da budemo u toku s PLC sistemom je redovno održavanje. [3] Proizvođači proizvode PLC sisteme znajući da će se koristiti u teškim okruženjima u mnogim situacijama. Zbog toga su programabilni logički kontroleri izdržljivi, ali cilj proizvodnje bi trebao biti produžiti vremenski okvir za tu upotrebu prije nego što se pojavi problem. Pravi plan održavanja je najbolji način za to. Programabilni logički kontroler neće raditi ispravno s povremenim napajanjem. Kao dio redovitog održavanja, izvori napajanja se trebaju održavati. Dobro je imati rezervne izvore napajanja kako bi se mogao zamijeniti onaj koji se pokvario bez ikakvog prekida usluge. Na rad programabilnih logičkih kontrolera mogu utjecati i razna onečišćenja u zraku/prostoru gdje je programabilni logički kontroler smješten. Korozivne i vodljive tvari mogu degradirati komponente programabilnog logičkog kontrolera. Isto i elektromagnetske smetnje-EMI mogu uzrokovati velike probleme za programabilne logičke kontrolere te veoma teško može biti identificirati u čemu je problem. Primjena i radno okruženje PLC-a određuje koliko mu je često potrebno preventivno održavanje. Pojedine operacije održavanja moraju se provoditi često ako se programabilni logički kontroler koristi u teškim okruženjima ili aplikacijama s visokim vibracijama.[4] Pored PLC, do prekida rada prikazanog stvarnog procesa proizvodnje ambalaže mogu dovesti oštećenja elemenata proizvodnog procesa. U slučaju prekida napajanja električne energije proces neće biti moguće realizovati. Zatim pored prekida napajanja, do zastoja u proizvodnom procesu može doći zbog nepravilnog rada cilindra, trake sa valjcima te fotoelektričnog senzora. Rijetki su slučajevi u kojima dolazi do prekida rada zbog fotoelektričnog senzora. Glavna prednost ovog senzora jeste njegova pouzdanost. Kako koristi svjetlost, može otkriti objekte različitih veličina, oblika i boja. Još jedna prednost jeste njegova svestranost. Ovaj tip senzora se lahko postavlja i održava, što ih čini isplativim rješenjima za proizvodne procese.[1] Pored toga imaju dug životni vijek, mogu da rade u teškim okruženjima, obezbjeđujući pouzdana i precizna mjerenja tokom dužeg perioda. Sve u svemu, fotoelektrični senzor je koristan alat za različite primjene, pružajući pouzdana i precizna mjerenja koja mogu pomoći proizvodnim procesima da poboljšaju efikasnost i produktivnost. Njegova svestranost, pouzdanost, jednostavnost upotrebe i održavanja čine ga atraktivnom opcijom za proizvodne procese koji zahtjevaju napredna rješenja za automatizaciju.

4. ZAKLJUČAK

Programabilni logički kontroleri predstavljaju ključnu ulogu u mnogim industrijskim procesima i automatiziranim sistemima. Njihova pouzdanost i sposobnost brzog reagiranja čine ih nezamjenjivim uređajem za upravljanje različitim sistemima. Programabilni logički kontroler omogućuje precizno upravljanje, nadzor i automatizaciju što rezultira povećanjem produktivnosti, smanjenjem grešaka i optimizacijom resursa. Modularnost programabilnog logičkog kontrolera omogućuje prilagodbu specifičnim potrebama u različitim industrijama, što čini PLC vrlo prilagodljivim. Također jedna od prednosti PLC-a jeste i zamjena radne snage. Čak i uz redovno održavanje, programabilni logički kontroleri mogu naići na probleme. Najčešći problemi javljaju se u vidu kvarova u komunikaciji, zatim može doći do neispravnog ulaza/izlaza, te greške u programiranju. Uz pravilno projektiranje i programiranje sistema, integracija programabilnih logičkih kontrolera kao upravljačkog sklopa procesa proizvodnje ambalaže će značajno poboljšati učinkovitost i pouzdanost takvog sistema.

5. REFERENCE

- [1] Popović M., „Senzori i merenja“, Sarajevo 2004.
- [2] Smajić H., „Programiranje PLC kontrolera“, Koln 2020.
- [3] <https://develop-llc.com/knowledge-base/maintenance-and-upgrades-of-automated-systems/>
- [4] <https://sdcautomation.com/preventative-maintenance-for-automated-machines/>
- [5] Bolton W. (Fourth edition 2006): *Programmable Logic Controllers*
- [6] Liton A. Md., Shantonu K., Rafiqzaman Md. (2019): *Automatic Bottle Filling System Using PLC Based Controller*, Journal of Advancement in Mechanics, Volume 4, Issue
- [7] Fathahillah F., Siswanto M., Fauziyah M., Parlindungan R., Putri R.I. and Roh Y-G (2020): *Implementation of programmable logic controller in multi machine operations with product sorting and packaging based on colour detection*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 732
- [8] Romadhon A. and Widyaningrum V.T. (2020): *Automatic Food Packing System using PLC*, International Conference on Health Informatics, Medical, Biological Engineering and Pharmaceutical

QUALITY CONTROL SYSTEM OF THE WELDING PROCESS ON BOGIE MANUFACTURING LINE IN ĐĐ SPECIAL VEHICLES

Arijan Herceg, mag.ing.mech.
Đuro Đaković Special vehicles
Ulica 108. brigade ZNG, Slavonski Brod, Croatia

Leon Maglić, prof.dr.sc.
Sveučilište u Slavonskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu
Trg Ivane Brlić Mažuranić 2, Slavonski Brod, Croatia

ABSTRACT

The modern production process of rail vehicles depends largely on the quality of the welding work carried out in the company. The same applies to all components of rail vehicles, including the bogies. An efficient and modern quality assurance system must therefore include all the steps required to guarantee welding quality. The aim of this article is to show a complete workplace organization and a complete organization of the quality assurance system. The main task of such a system is to balance the basic organizational triad of quality, cost and delivery, focusing on the most important part of quality.

Keywords: rail vehicles, welding, quality control, workplace organization

1. INTRODUCTION

The fundamental requirement of a modern production and quality assurance system is to balance the triad of quality, cost and delivery, with the emphasis on quality [1]. Nowadays, successful companies and their managers generally accept that achieving product quality is something that ensures the survival and competitiveness of the company [1]. The bogie shown in Figure 1 is an important part of rail vehicle construction.

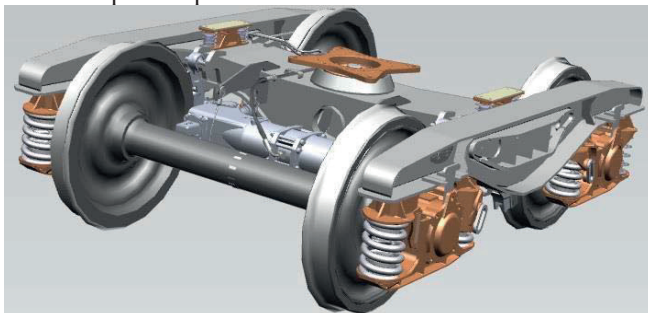


Figure 1. 3D image of classic rail vehicle bogie

As the railroad carriage itself is a welded construction, welding is a quality-critical technology in the manufacture of bogies. The quality assurance team at Đuro Đaković

Special Vehicles (ĐĐSV) realized that to achieve a satisfactory level of welding in the bogie production line, the entire line had to be reorganized. The reorganization was based on the following principles: A plan of the production line with clearly defined workstations must be drawn up, all workstations must be labelled with numbers, employees must be trained so that they know which workstation they belong to and what their responsibilities are there, and finally, the QA team is responsible for implementing the quality system. The quality system must define hold points whose basic task is to stop production until certain steps have been taken to ensure quality. Figure 2 shows the layout of the production line for bogies as used in ĐĐSV.

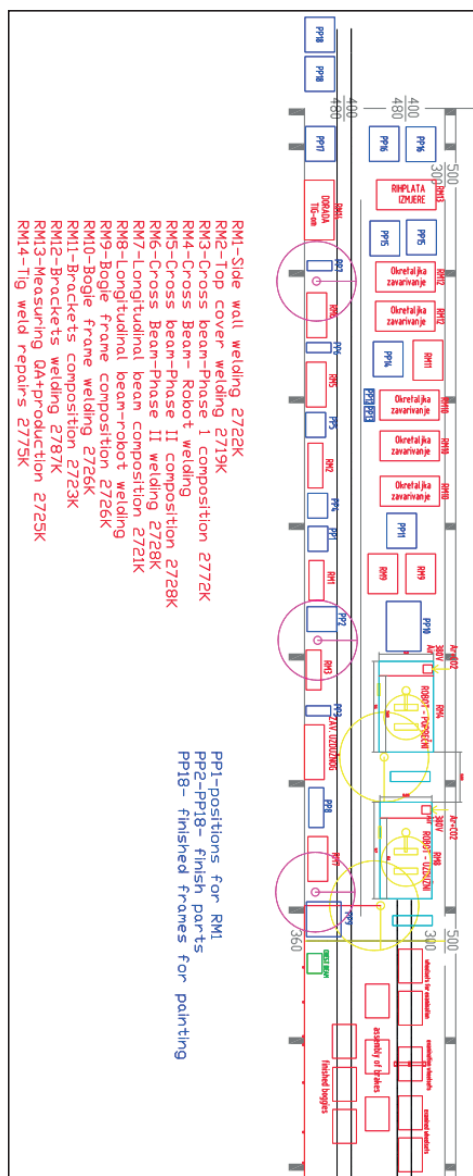


Figure 2. Bogie manufacturing line layout as employed in ĐĐSV

As welding is carried out at workstations 1, 2, 4, 6, 8, 10 and 14, hold points must be defined at these production steps until the QA\QC has been carried out and satisfactory results have been achieved. The QA methods used in welding inspection are visual inspection (VT) [2], penetrant testing (PT) [3] and ultrasonic testing (UT) [4]. If welding defects are detected during the inspection, unacceptable (NA) bogies must be clearly marked to prevent a product with defects from entering the manufacturing process. This is achieved by two types of stickers, which are shown in Figure 3 and Figure 4. A suitable sticker must be affixed to each tested bogie.



Figure 3. Green sticker for acceptable bogies



Figure 4. Red sticker for not-acceptable bogies

2. QA\QC STEPS

As described in the introduction, the QA and QC steps are based on the welding work carried out at specific workplaces. The quality control system therefore follows the welding process and the two are closely linked.

2.1. Workstation 1

Figure 5 shows the welding positions at workstation 1 (the red mark shows the welding position). As according to EN ISO 15085-3 – Railway applications – Welding of railway vehicles and components - all welds must be 100% inspected VT, the VT inspection will be the main quality control tool.

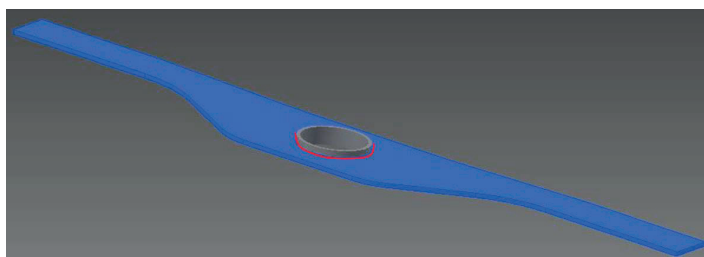


Figure 5. Positions welded at workplace 1

It is the welder's responsibility to inform the quality control members that welding is complete and ready for inspection. The quality control members must establish the hold point, perform the inspection, and inform the worker that the part is ready to continue the production line. Figure 6 shows the current workstation and its numerical designation.



Figure 6. Workstation 1 in the workshop

2.2. Workstation 2

Figures 7 and 8 show welding done at workstation 2. Specific to workstation 2 is that workpiece must be rotated and welding performed on both sides.

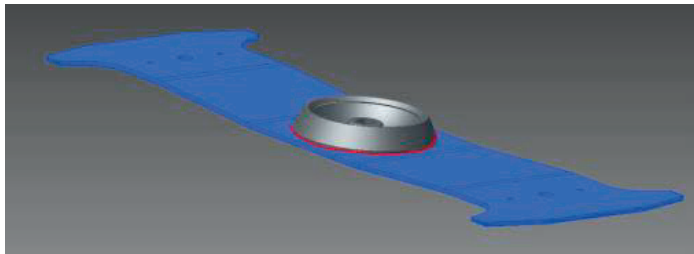


Figure 7. Positions welded at workplace 2 – A side

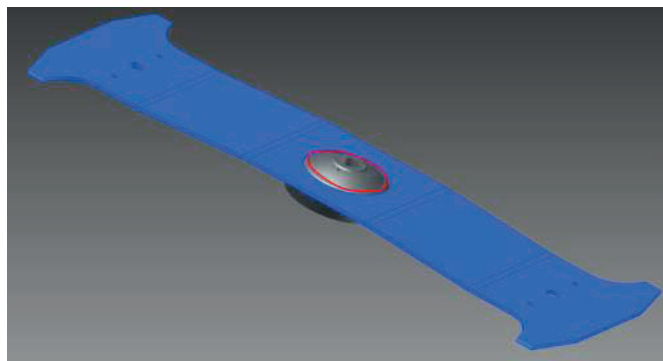


Figure 8. Positions welded at workplace 2 – B side

In addition to the VT tests at workstation 2, PT tests must also be carried out based on the requirements of the standard and the calculations performed by the design department. Figure 9 shows the location, the type of weld and the required NDT test.

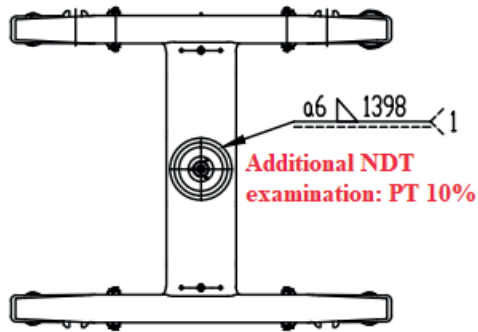


Figure 9. Additional NDT examination. workstation 2

Therefore, it follows that workstation 2 has these hold points:

- 1) Welding done on the side A – VT 100%, PT 10%
- 2) Welding done on the side B – VT 100%, PT 10%

Figure 10 shows actual workstation 2.



Figure 10. Workstation 2 in the workshop

2.3. Workstation 4

To increase efficiency and quality, the welding work at workstation 4 is carried out by a robot. The welding ends (curves) are excluded from this process, as these still must be welded manually due to their small dimensions. In addition, particular attention must be paid to the correct sequence during welding and testing, as some weld seams are not easily accessible during all welding steps. Figures 11 and 12 show the welds at workstation 4.

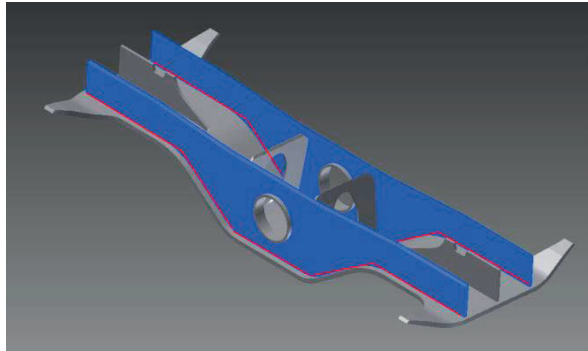


Figure 11. Positions welded at workstation 4 – A side

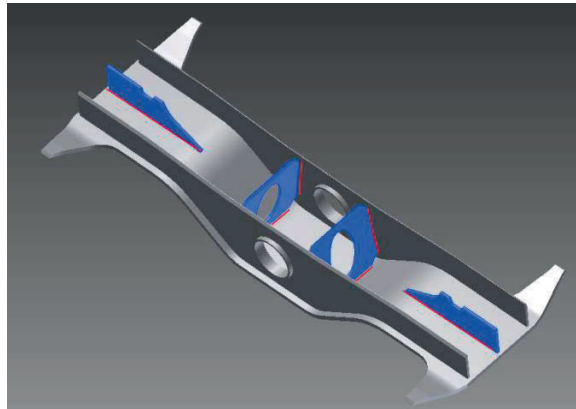


Figure 12. Positions welded at workstation 4 – B side

The VT test carried out in this step must confirm that the weld seams inside the bogie box are properly executed before the part is transferred to the production process and the box is closed. Figure 13 shows workstation 12 in the production layout.



Figure 13. Workstation 4 in the workshop

2.4. Workstation 6

The importance of adhering to established welding and inspection procedures is clearly visible in this part of the manufacturing process. If the box closes at this stage with defects found inside, it will be extremely difficult to carry out welding repairs later. Figures 14 and 15 show the welding process carried out at this workstation.

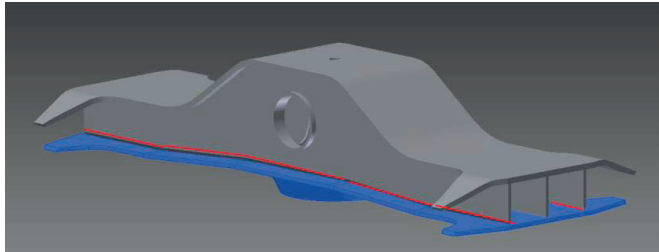


Figure 14. Positions welded at workstation 6 – A side

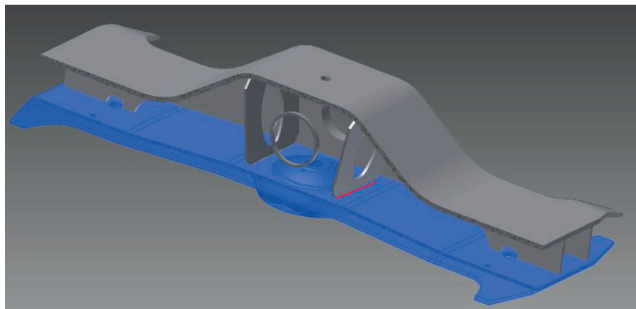


Figure 15. Positions welded at workstation 6 – B side

Again, the welder must inform the quality control member that he has welded, and the quality control member must perform an inspection and inform the welder whether the part is acceptable or unacceptable. Figure 16 shows workstation number 6.



Figure 16. Workstation 6 in the workshop

2.5. Workstation 8

Workstation 8 is another example of robotic welding to increase efficiency and quality. The welding of longitudinal beams shown in Figure 17 is a perfect opportunity for the robot to replace human labour.

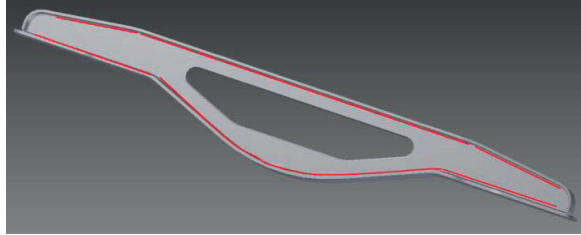


Figure 17. Positions welded at workstation 8

Figure 18 shows workstation location on manufacturing layout and finished longitudinal beams.



Figure 18. Workstation 8 in the workshop

2.6. Workstation 10

Workstation 10 is another critical phase of the manufacturing process with regard to the required NDT inspection. In addition to the classic VT test, PT and UT tests must also be carried out in this phase. Turning devices are used to turn the bogie frame into a favourable position. The stopping points defined here must consider the necessary tests in this order: VT test, PT test and finally UT test. The box must not be closed if the quality control member has not confirmed that the weld seams inside are properly executed. Figures 19 and 20 show the welding procedure.

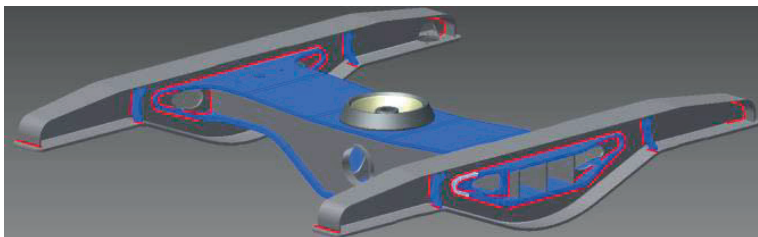


Figure 19. Positions welded at workstation 10 – A side

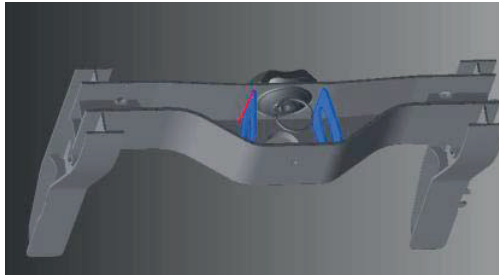


Figure 20. Positions welded at workstation 10 – B side

All required NDT checks are shown in Figure 21. The complexity of the NDT checks requires more time at this workstation. This is to be expected and must be considered when calculating the workstation performance.

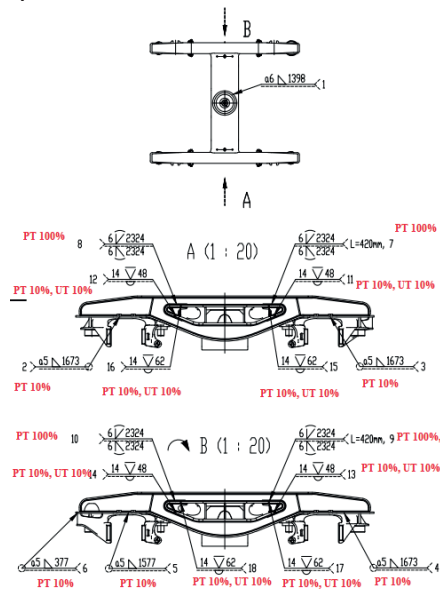


Figure 21. Additional NDT examination. workstation 10

Figure 22 shows workstation 10 in the production hall and the device used to bring the bogie into a favourable position.



Figure 22. Workstation 10 in the workshop

3. CONCLUSIONS

Developing a new QA/QC system that is fully integrated into the production process is a difficult task. Especially when you consider how to measure the effectiveness of such a system. Several studies have been conducted to show how process factors can be defined and measured based on Kaizen principles [5]. The ĐĐSV company strives to get one step closer to the Kaizen principles with each iteration of its processes. The quality control system for the bogie production line was designed with this in mind. To make it effective, all company employees must adhere to the established rules and standards. Breakpoints must be established and adhered to. If employees understand this and develop a sense of self-discipline, the system will achieve the desired balance between quality, cost and delivery. Another major obstacle to implementing a quality control system is management support. Again, studies show that management does not always understand the Kaizen concept [6] and does not want to see why they should invest the company's hard-earned resources in this concept. Regardless, ĐĐSV has decided to start with its bogie production line as an example of what can be done to first stabilize the manufacturing process and later improve it as much as possible according to the Kaizen philosophy.

4. REFERENCES

- [1] Masaaki, I, (2012), *Gemba Kaizen: A commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy, Second edition*, McGraw Hill,
- [2] EN ISO 17637:2017. *Non-destructive testing of welds- Visual testing of fusion-welded joints* (ISO 17637:2016; EN ISO 17637:2016)
- [3] EN ISO 3452-1:2021. *Non-destructive testing - Penetrant testing – Part 1: General principles* (ISO 3452-1:2021; EN ISO 3452-1:2021)
- [4] EN ISO 17640:2018. *Non-destructive testing of welds - Ultrasonic testing – Techniques, testing levels, and assessment* (ISO 17640:2018; EN ISO 17640:2018)
- [5] Franken, José & van Dun, Desirée & Wilderom, Celeste. (2024). *Kaizen Event process factors for operational performance improvement: an archival study*. *Production Planning & Control*. 10.1080/09537287.2024.2358402.
- [6] Todorovic, Mirjana & Čupić, Milan & Jovanovic, Dejan. (2024). *Managers' attitudes as a critical success factor of kaizen*. *E+M Ekonomie a Management*. 27. 69-86. 10.15240/tul/00

METODOLOGIJA OSPOSOBLJAVANJA ZA SIGURAN RAD

TRAINING METHODOLOGY FOR SAFE WORK

Dr. Sc. Mustafa Imamović
Mašinski fakultet, Univerzitet u Zenici
Zenica

REZIME

Osposobljavanje zaposlenika za siguran rad je veoma bitna aktivnost u cilju smanjenja rizika u radu i nastanka ozljeda tokom rada. Sprovodi se prema utvrđenom programu prije zaposlenja, tokom zaposlenja prema aktu o procjeni rizika i prema zakonskim odredbama koje regulišu ovu problematiku. Osposobljavanje zaposlenika za siguran rad provodi se prema programu osposobljavanja koji se mora temeljiti na procjeni rizika i treba obuhvatiti sve opasnosti, štetnosti, odnosno napore utvrđene procjenom rizika te načine otklanjanja opasnosti, štetnosti i napora.

Program osposobljavanja sastoji se od teoretskog osposobljavanja koje se provodi za sve zaposlenike, ovisno o poslovima koje će obavljati i praktičnog osposobljavanja na radnom mjestu. Provedbu osposobljavanja za siguran rad provode radnici za zaštitu na radu u firmama ili ovlaštene organizacije. Osposobljavanje se vrši prema propisanoj metodologiji.

U ovom radu je prikazana metodologija osposobljavanja, način izrade programa kao i zakonske obaveze shodo zakonu o zaštiti na radu u FBiH. Tematika koja je obrađena u radu može se koristiti kao dobra praksa licima koji se bave ovim aktivnostima u cilju što kvalitetnijeg osposobljavanja.

Ključne riječi: *osposobljavanje, siguran rad, metodologija osposobljavanja,*

SUMMARY

Training workers for safe work is a very important activity in order to reduce risks at work and the occurrence of injuries during work. It is carried out according to the established program before employment, during employment according to the act on risk assessment and according to the legal provisions that regulate this issue. The training of workers for safe work is carried out according to a training program that must be based on a risk assessment and should include all hazards, hazards, or efforts determined by the risk assessment, as well as ways to eliminate hazards, hazards and efforts.

The training program consists of theoretical training that is carried out for all workers, depending on the tasks they will perform, and practical training at the workplace. Training for safe work is carried out by occupational safety workers in companies or authorized organizations. Training is carried out according to the prescribed methodology.

This paper presents the methodology of training, the way of creating the program as well as the legal obligations according to the law on occupational safety in FBiH.

The topics covered in the paper can be used as good practice by all who are engaged in these activities in order to provide the highest quality training possible.

Keywords: *training, safe work, training methodology*

1. UVOD

Osposobljavanja za siguran rad je veoma značajna i zakonski obavezna aktivnost prilikom izvođenja radova. Svrha provedbe osposobljavanja je: stjecanje teoretskih i praktičnih znanja za provođenje mjera sigurnosti, zaštite zdravlja i zaštite okoliša, upoznavanje zaposlenika sa specifičnim opasnostima i štetnostima te mjerama i sredstvima za zaštitu od opasnosti prilikom obavljanja konkretnih poslova i radnih zadataka, osposobljavanje za primjenu mjera i sredstava za rad na siguran način, razvoj svijesti o potrebi sigurnog rada radi sprječavanja incidentnih situacija koje mogu imati negativan utjecaj na zdravlje i okoliš.

Osposobljavanjem se postiže: smanjenje ozljeda na radu, povećava se produktivnost i motivacija zaposlenika, upoznavanje s pravilima zaštite na radu i pravilima struke koja se pri radu moraju primjenjivati te sa sigurnim načinom izvođenja radnih operacija za sve poslove.

Poslodavac je obavezan, na osnovu procjene rizika, osposobiti zaposlenika za rad na siguran način i to: prije početka rada, kod promjena u radnom postupku, kod uvođenja nove radne opreme ili njezine promjene, kod uvođenja nove tehnologije, kod upućivanja zaposlenika na novi posao, odnosno na novo mjesto rada, kod utvrđenog oštećenja zdravlja uzrokovanog opasnostima, štetnostima ili naporima na radu.

Poslodavac je obavezan zaposlenika, prije početka rada, obavijestiti o svim činjenicama i okolnostima koje utječu, ili bi mogle utjecati na njegovu sigurnost i zdravlje te je obavezan osposobiti ga za praktičnu primjenu mjera zaštite na radu koje je zaposlenik dužan primjenjivati u skladu s procjenom rizika kojima je izložen na radu i u vezi s radom.

Ako se uzme u obzir da 90 % nezgoda na radu izazvano je ljudskim faktorom, a 10 % faktori tehničke prirode onda je jasno da se osposobljavanjem zaposlenika može značajno utjecati na smanjenje uzroka ljudskog faktora što daje dodatni značaj osposobljavanja.

Osposobljavanje za siguran rad na radnom mjestu je proces koji ima za cilj pružiti radnicima znanja i vještine za obavljanje posla na način koji je siguran za njih i njihove sazaposlenike.

Osim toga, učinkovit plan osposobljavanja na radnom mjestu uključuje upute i smjernice za prepoznavanje opasnosti, štetnosti, poduzimanje mjera i sprečavanje nezgoda.

Osim očitih razloga, propisa i moralne odgovornosti, postoji mnogo drugih prednosti osposobljavanja kao što su:

- Manji gubitak produktivnosti zbog bolesti ili ozljeda;
- Prevencija incidenata u budućnosti;
- Veće zadovoljstvo zaposlenika;
- Niže premije osiguranja;
- Smanjena naknada zaposlenicima za bolovanje zbog ozljeda na radu i bolesti;
- Zaštita od odgovornosti i tužbi.

Kada se priprema program obuke za siguran rad, cilj bi trebao biti i:

- minimiziranje incidenata i nezgoda,
- maksimiziranje svijesti i pažnje,
- održavanje zaposlenika zdravim, sretnim i produktivnim,
- ne samo ispunjenje obaveza s regulatornim zakonskim obavezama.

Osposobljavanje za siguran rad se obavlja na radnom mjestu prema pripremljenom programu osposobljavanja, primjenom usvojene metodologije i na kraju se vrši provjera osposobljenosti te izdavanje uvjerenja/ certifikata o osposobljenosti za siguran rad na određenom radnom mjestu.

2. ZAKONSKA REGULATIVA

Osposobljavanje na radnom mjestu je definirano različitim propisima kao što su: smjernice EU, standardi, nacionalno zakonodavstvo te pozitivna praksa.

Konkretno kod nas Zakonom o zaštiti na radu u F BiH je propisan način na koji se zaposlenik osposobljava za siguran i zdrav rad te je utvrđeno da se isto uključuje kako teorijsko, tako i praktično osposobljavanje zaposlenika. [1]

Naime, imajući u vidu sadržaj programa osposobljavanja koji je propisan odredbom zakona, jasno proizlazi da osposobljavanje zaposlenika za siguran i zdrav rad mora obuhvatiti i teorijski i praktičan pristup. Provjera teorijske i praktične osposobljenosti zaposlenika za siguran i zdrav rad obavlja se na radnom mjestu. Navedeno podrazumijeva da se obuka zaposlenika za siguran i zdrav rad, u okviru određenih segmenata (npr. prava i dužnosti u provođenju propisa i mjera zaštite na radu i posljedice zbog ne pridržavanja tih propisa i mjera, pružanje prve pomoći, upoznavanje s odredbama ovog zakona i sl), može obaviti i na drugom mjestu, npr. u prostoru kojeg osigura ovlaštena organizacija, ako je osposobljavanje zaposlenika za siguran i zdrav rad poslodavac povjerio ovlaštenoj organizaciji.

Međutim, sama provjera teorijske i praktične osposobljenosti zaposlenika za siguran i zdrav rad mora se obaviti na radnom mjestu zaposlenika, za vrijeme trajanja njegovog redovnog radnog vremena, kako bi se izvršila provjera je li zaposlenik upoznat s načinom korištenja sredstava rada i opreme i načinom upotrebe štetnih materija, s upotrebom odgovarajućih sredstava rada i odgovarajuće opreme i sredstava lične zaštite, kao i pravilnim i namjenskim korištenjem uređaja i sredstava kojima se služi pri radu i sl.

Kada je u pitanju osposobljavanje za siguran rad, za poslodavca su propisane i dodatne obaveze u slučaju poslova s povećanim rizikom. Naime, pored osposobljavanja za siguran i zdrav rad koje se za sve zaposlenike provodi u slučajevima propisanim odredbom ovog zakona, za zaposlenike raspoređene na poslove s povećanim rizikom je propisana i obaveza obavljanja periodične provjere osposobljenosti za siguran i zdrav rad, a koje se obavlja na način, u roku i po postupku utvrđenom aktom o procjeni rizika. ima pravo na sigurne i zdrave uvjete rada.

U smislu prava koja su zaposleniku stavljena na raspolaganje, a u vezi s upoznavanjem s odredbama ovog zakona, zaposlenik mora biti upoznat i s pravom na zdravstveni nadzor, a posebno sa segmentom obaveze koja se odnosi na obavljanje periodičnih ljekarskih pregleda kada su u pitanju poslovi s povećanim rizikom. Također, zaposlenik koji se raspoređuje na poslove s povećanim rizikom upoznaje se sa svojim pravom, odnosno s obavezom poslodavca da takvog zaposlenika posebno osigura od rizika nezgoda i povrede na radu, radi osiguranja naknade štete.

Pored prava, zaposlenik mora biti upoznat i s obavezom prema kojoj je svaki zaposlenik dužan da poslove svog radnog mjesta obavlja u skladu sa svojom stručnom spremom i završenom obukom, kao i uputstvima koja daje poslodavac, tako da ne izlaže sebe ili druga lica na koja mogu uticati njegove aktivnosti ili nepažnja u toku procesa rada, opasnostima od povrede na radu ili profesionalnog oboljenja. Također, zaposlenik mora biti upoznat i s pojedinačnim obavezama koje su propisane odredbama ovog zakona.

U okviru osposobljavanja za siguran i zdrav rad, zaposlenik se posebno upoznaje i s posljedicama koje zbog nepridržavanja propisa i mjera zaštite na radu. Naime, radnici moraju biti posebno upoznati da nepridržavanje utvrđenih pravila sigurnosti i zaštite zdravlja na radu i propisanih obaveza, u smislu ovog zakona, predstavlja težu povredu radne obaveze u skladu s kolektivnim ugovorom, odnosno općim aktom poslodavca, što podrazumijeva da se zbog nepridržavanja propisa i mjera zaštite na radu zaposleniku može izreći trajna mjera otkaza ugovora o radu bez poštivanja otkaznog roka, kao posljedica činjenja teže povrede radne obaveze.

Pored navedenog, zaposlenik se u toku osposobljavanja upoznaje i s pružanjem prve pomoći i korištenjem protivpožarnih aparata na način utvrđen posebnim propisima.

Kada je u pitanju upoznavanje s organizacijom sigurnosti i zaštite zdravlja na radu, zaposlenik se u tom smislu upoznaje s načinom na koji je organizirano provođenje zaštite na radu kod poslodavca, tko su odgovorna i ovlaštena lica, je li imenovan zaposlenik za zaštitu na radu, je li organizirana služba zaštite na radu kod poslodavca, tko su lica kojim se zaposlenik obraća, odnosno tko su lica koja zaposlenik obavještava u slučaju kada mu prijete neposredna opasnost po život i zdravlje, kome prijavljuje svaku opasnost koju primijeti na radu, kao i povrede koje zadobije pri radu i sl.

Pored navedenog, zaposlenik se u toku osposobljavanja za siguran i zdrav rad upoznaje i sa svim ostalim odredbama ovog zakona u smislu obaveza i odgovornosti poslodavca.

Osposobljavanje zaposlenika za siguran i zdrav rad može provesti sam poslodavac ili obavljanje tih poslova može povjeriti organizaciji iz oblasti zaštite na radu koja je od strane Federalnog ministarstva rada i socijalne politike ovlaštena za obavljanje te vrste stručnih poslova.

Naime, poslodavac može osposobljavanje zaposlenika u smislu navedenog obaviti sam ako ima zaposlena lica s položenim stručnim ispitom.

Regulativa u Evropskoj uniji uglavnom je bazirana na sličnim principima ali i nacionalni standardi daju neke posebne instrukcije.

3. PROGRAM I METODOLOGIJA OSPOSOBLJAVANA

S obzirom na to da je Zakonom o zaštiti na radu propisano da se osposobljavanje za siguran i zdrav rad provodi na teorijski i praktičan način, to su predviđeni i segmenti koje navedeno osposobljavanje obuhvata, a daje se u programu osposobljavanja.

U tom smislu, predviđeno je da se zaposlenik s obzirom na program osposobljavanja upoznaje sa tehničko - tehnološkim procesom i organizacijom rada u cjelini, a posebno sa poslovima svog radnog mjesta.

Naime, osposobljavanje zaposlenika mora biti prilagođeno specifičnostima njegovog radnog mjesta, te je od bitne važnosti da se zaposlenik prilikom osposobljavanja za siguran i zdrav rad upozna sa tehničko - tehnološkim procesom i organizacijom rada kod poslodavca u cjelini, a posebno s poslovima svog radnog mjesta. [2]

Na prilagođen način sa specifičnostima radnog mjesta zaposlenik shodno programu se upoznaje i s opasnostima koje ugrožavaju sigurnost i zdravlje na radu, korištenjem sredstava rada i opreme i načinom upotrebe štetnih materija na tom radnom mjestu, kao i s mjerama zaštite na radu i razlozima zbog kojih se te mjere predviđaju i provode. U smislu navedenog, zaposlenik se upoznaje sa svim vrstama rizika na poslovima na koje se raspoređuje i o poduzetim konkretnim mjerama sigurnosti i zaštite na radu, u skladu s aktom o procjeni rizika. Nadalje, zaposlenik se upoznaje s pravima i dužnostima u provođenju propisa i mjera zaštite na radu i posljedicama zbog nepridržavanja tih propisa i mjera, odnosno upoznaje se s odredbama ovog zakona. U tom smislu zaposlenik mora biti upoznat sa generalnim pravom prema kojem svaki zaposlenik ima pravo na sigurne i zdrave uvjete rada.

U smislu prava koja su zaposleniku stavljena na raspolaganje, a u vezi s upoznavanjem s odredbama ovog zakona, zaposlenik mora biti upoznat i s pravom na zdravstveni nadzor, a posebno sa segmentom obaveze koja se odnosi na obavljanje periodičnih ljekarskih pregleda kada su u pitanju poslovi s povećanim rizikom.

Također, zaposlenik koji se raspoređuje na poslove sa povećanim rizikom upoznaje se sa svojim pravom, odnosno s obavezom poslodavca da takvog zaposlenika posebno osigura od rizika nesreće i povrede na radu, radi osiguranja naknade štete.

Pored generalnog prava, zaposlenik mora biti upoznat i sa generalnom obavezom prema kojoj je svaki zaposlenik dužan da poslove svog radnog mjesta obavlja u skladu sa svojom stručnom spremom i završenom obukom, kao i uputstvima koja daje poslodavac, tako da ne izlaže sebe ili druga lica na koja mogu uticati njegove aktivnosti ili nepažnja u toku procesa rada,

opasnostima od povrede na radu ili profesionalnog oboljenja. Također, zaposlenik mora biti upoznat i s pojedinačnim obavezama koje su propisane odredbama ovog zakona. [3].

U okviru osposobljavanja za siguran i zdrav rad, zaposlenik se posebno upoznaje i s posljedicama koje zbog nepridržavanja propisa i mjera zaštite na radu.

Naime, radnici moraju biti posebno upoznati da nepridržavanje utvrđenih pravila sigurnosti i zaštite zdravlja na radu i propisanih obaveza, u smislu ovog zakona, predstavlja težu povredu radne obaveze u skladu sa kolektivnim ugovorom, odnosno općim aktom poslodavca, što podrazumijeva da se zbog nepridržavanja propisa i mjera zaštite na radu zaposleniku može izreći trajna mjera otkaza ugovora o radu bez poštivanja otkaznog roka, kao posljedica činjenja teže povrede radne obaveze.

Dalje shodno programu, zaposlenik se upoznaje i s pružanjem prve pomoći i korištenjem protivpožarnih aparata na način utvrđen posebnim propisima.

Kada je u pitanju upoznavanje s organizacijom sigurnosti i zaštite zdravlja na radu, zaposlenik se u tom smislu upoznaje s načinom na koji je organizirano provođenje zaštite na radu kod poslodavca, tko su odgovorna i ovlaštena lica, je li imenovan zaposlenik za zaštitu na radu, je li organizirana služba zaštite na radu kod poslodavca, tko su lica kojim se zaposlenik obraća, odnosno tko su lica koja zaposlenik obavještava u slučaju kada mu prijete neposredna opasnost po život i zdravlje, kome prijavljuje svaku opasnost koju primijeti na radu, kao i povrede koje zadobije pri radu i sl.

Zaposlenik se u toku osposobljavanja za siguran i zdrav rad upoznaje i sa svim ostalim odredbama ovog zakona u smislu obaveza i odgovornosti poslodavca.

Praktična obuka podrazumijeva da se radnici osposobe sa pravilnom upotrebom lične zaštitne opreme, upotrebom posebnih pomagala, alata i uređaja koji se koriste na konkretnom radnom mjestu.

Zbog značaja osposobljavanja ovaj postupak se treba provesti shodno usvojenoj metodologiji koja treba biti prilagođena radnicima koja će osposobljavanje učiniti učinkovitim.

To podrazumijeva da se ista sastoji od prethodno utvrđenih šest koraka a to su: planiranje osposobljavanja (*design*), izrada konkretnog plana (*develop*), realizacija osposobljavanja (*deliver*), procjena kvaliteta (*evaluate*), evidentiranje (*document*) i kontinuirano poboljšanje (*continuous improvement*).

Planiranje osposobljavanja je korak u kome se osmišljava osposobljavanje kroz analizu potrebe, analizu zadatka, određivanje ciljeva, analiza učesnika, kao i ostala razmatranja. Ovo je dakle misaoni proces. Razmišljamo kako, što, gdje?



Slika 1. Koraci kod osposobljavanja za siguran rad

Drugi korak je izrada plana osposobljavanja. Za konkretna radna mjesta se izrađuje plan pri tome se informacije prikupljaju samo od relevantnih izvora (zaposlenika, proizvođača, stručnih organizacija, standardi, regulatorne agencije...).

Realizacija osposobljavanja je obrađena u prethodnoj tački. Kod realizacije treba slijediti činjenice da obrazujemo odrasle osobe, treba biti orijentiran na cilj, unijeti iskustva iz ranijih osposobljavanja. Slušaoce-kandidate treba motivirati.

Procjena kvaliteta je veoma bitan korak u svakom poslu te svakako i u postupku osposobljavanja. Mogu se provesti i ankete kako bi bili sigurni kako smo realizirali ovu aktivnost te kako bi istu mogli unaprijediti. Praćenje zaposlenika na radnom mjestu je najbolji način procjene učinka osposobljavanja.

Evidentiranje tj. dokumentiranje je veoma bitno a propisano je i zakonom. Testovi mogu biti pomoć-alat kod provjere osposobljenosti.

Kontinuirano poboljšanje je korak koji uvijek treba da je prisutan u postupku osposobljavanja. Uvijek je moguće poboljšati ono što se vidi da nije dalo rezultat kao i uključivanje novih saznanja.

Ova metodologija je okvirna i može se mijenjati.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je data metodologija i program osposobljavanja zaposlenika za siguran rad. Metodologija je data po koracima i to: planiranje osposobljavana, izrada konkretnog plana, realizacija osposobljavanja, procjena kvaliteta, evidentiranje i kontinuirano poboljšanje. Dakle uvijek u osposobljavanju za siguran rad nalazi se faze poboljšanja.

U programu je dat obavezan okvirni sadržaj koji je neophodan da se uključi kod osposobljavanja je kako definirano zakonom. Osposobljavanjem se podiže kultura zaposlenih i ispunjava se zakonska obaveza. Za ne ispunjenje ove obaveze predviđenu su znatne kazne inspektora. Osposobljavanje se vrši na radnom mjestu.

Ovaj rad prikazuje osnove kako se vrši osposobljavanja a također može da bude i vodilja koju mogu primjenjivati radnici za zaštitu kao i ovlaštene organizacije kod sprovođenja osposobljavanja zaposlenika za siguran rad.

5. REFERENCE

[1] *Zakon o zaštiti na radu* (2020) ("Službene novine Federacije BiH", broj: 79/20).

[2] Imamović E.; Gajević A.(2021), *Komentar zakona o zaštiti na radu*, Privredna štampa Sarajevo.

[3] *Priručnik za osposobljavanje* (2022), Zaštita na radu, PMF Zagreb.

UPRAVLJANJE ODRŽAVANJEM VREĆASTOG FILTERSKOG POSTROJENJA U KOMPANIJI ZA PROIZVODNJU ČELIKA

MANAGEMENT OF THE MAINTENANCE OF THE BAG FILTER PLANT IN THE STEEL FACTORY

Prof. dr. Sabahudin Jašarević
Univerzitet u Zenici, Politehnički
fakultet, Fakultetska 1, 72000 Zenica
Bosna i Hercegovina

Dženana Muračević, dipl.inž.maš.
Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet,
Fakultetska 1, 72000 Zenica
Bosna i Hercegovina

REZIME

Određivanje uspješnosti realizacije postavljenih ciljeva predstavlja osnov svakog upravljanja. Skupa oprema u procesnoj industriji kao što je metalurgija, uslovi u kojima se koristi, veliki troškovi održavanja, tražena raspoloživost (obično 24 sata i 365 dana), tražena maksimalna pouzdanost zbog sigurnosti ljudi i imovine, kontinuitet proizvodnog procesa i sprječavanja velikih nesreća i ekoloških incidenata, traži od organizacije sistema funkcije održavanja uspostavu, i kontinuiranu primjenu procesa i procedura kontrolisanja i određivanja uspješnosti održavanja.

Uspješnost održavanja je pokazatelj postizanja cilja funkcije održavanja u određenom vremenu, uslovima okoline uz određene troškove. [1] U ovom radu prikazana je primjena upravljanja održavanjem vrećastih filtera u firmi za proizvodnju čelika, te izračunati neki od indikatora koji mogu ukazivati na uspješnost održavanja istog postrojenja.

Ključne riječi: procesna metalurgija, vrećasti filteri, održavanje, indikatori kvaliteta održavanja

ABSTRACT

Determining the success of the realization of set goals is the basis of all management. Expensive equipment in process industries such as metallurgy, conditions in which it is used, high maintenance costs, required availability (typically 24 hours and 365 days), required maximum reliability for the safety of people and property, continuity of the production process and prevention of major accidents and environmental incidents, requires the organization of the system of maintenance functions to establish and continuously apply processes and procedures for controlling and determining the success of maintenance.

The success of maintenance is an indicator of achieving the goal of the maintenance function in a certain time, in environmental conditions at certain costs. [1] This paper presents the application of maintenance management of bag filters in the steel production company and calculates some of the indicators that can indicate the success of the maintenance of the same plant.

Keywords: process metallurgy, bag filters, maintenance, maintenance quality indicators

1. UVOD

Savremeno poslovanje zahtijeva snižavanje troškova, a upravo troškovi održavanja značajno učestvuju u ukupnim troškovima organizacija tako da menadžment u svim dobro vođenim

organizacijama nastoji da smanji troškove održavanja, a da istovremeno raspoloživost sredstava bude u zadanim granicama. U mnogim oblastima poslovanja troškovi održavanja su jedini troškovi na čijem snižavanju se može raditi, a svakodnevni rad na poboljšanju funkcije održavanja je danas preduvjet za opstanak mnogih organizacija, jer u tržišnoj utakmici pobjeđuju oni koji uspiju realizovati više poboljšanja u odnosu na druge [1].

Usljed porasta entropije, kao mjere neodređenosti sistema, dolazi do otkaza, poremećaja i prekida kod svih sistema u prirodi. Da bi jedan tehnički sistem ispravno radio u određenom vremenskom periodu, neophodno je da se na odgovarajući način održava. Potrebu za održavanjem imaju i popravljivi tehnički sistemi i sistemi za jednokratnu upotrebu.

Održavanje sredstava za rad u industrijskim poslovnim sistemima je funkcija od posebnog značaja zbog toga što bitno utiče na mogućnost korištenja proizvodnih kapaciteta i na troškove poslovnog sistema. Raznovrsnost opreme koja se održava, porast njene složenosti, porast zahtjeva funkcije proizvodnje u pogledu intenziteta i načina korištenja i evidentan tehnički progres povećavaju složenost funkcije održavanja. Naročito je to izraženo u procesnoj industriji kakva je metalurgija gdje se posebni uslovi postavljaju vezano za ekološke zahtjeve koje moraju ispuniti ova postojenja.

Održavanje tehničkih sistema (mašina i uređaja), odnosno sredstava za rad, kao funkcija i dio procesa proizvodnje zauzima danas važno mjesto u proizvodnom sistemu svake kompanije [4]. Na razvoj održavanja uticao je brz industrijski napredak, kao i stalni porast automatizacije i povezanosti sredstava za rad, zatim nagli porast fiksnih troškova u odnosu na promenljive.

U ovom radu prikazano je održavanje filterskog postrojenja unutar kompanije za proizvodnju čelika. Također prikazani su i inikatori koji ukazuju na uspješnost tog održavanja.

2. OPIS RADA FILTERSKOG POSTROJENJA

Posljednjih godina vrećasti filteri su dobili široku upotrebu u industriji čelika, posebno u obliku pulsni mlaznih vrećastih filtera. Tokom procesa proizvodnje željeza i čelika, od drobljenja rude do proizvodnje čelika, stvara se značajna količina prašine, što dovodi do ozbiljnog zagađenja zraka. Kako bi riješila ovaj problem, industrija željeza i čelika oslanja se na sakupljače prašine za filtriranje dima i čestica prašine iz zagađivača zraka, a pritom se vraćaju vrijedni materijali [3]. Vrećasti sakupljači prašine koji se koriste u industriji čelika uključuju vrećaste sakupljače prašine sa električnim lučnim pećima, sakupljače prašine sa vrećama srednje frekvencije za peći, sakupljače prašine u vrećama AOD, sakupljače prašine iz peći za koksiranje i različite vrećaste sakupljače prašine sastavljene u ormariće sa sklopovima vreća, uređaje za preusmjeravanje, puls sistemi za ubrizgavanje, sistemi za izbacivanje pepela, kontrolni sistemi i sistemi zaštite van mreže. Ovi sistemi vrećastih filtera efikasno hvataju fine čestice prašine veće od 0,3 μm , postizujući efikasnost uklanjanja prašine koja prelazi 99%. Upotreba različitih sakupljača prašine pokazuje široku primjenu vrećastih filtera u industriji. Kineska industrija željeza i čelika ima više od 1.600 kompanija [2], što je čini glavnim korisnikom vrećastih filtera. Istaknute čelične kompanije kao što su Wuhan Iron and Steel, Baosteel, Panzhihua Iron and Steel i Shougang imaju po preko 200 vrećastih filtera. Količina i obim upotrebe vrećastih filtera utvrđuju njihovu dominaciju u industriji čelika. Shanghai Baosteel, na primjer, sa godišnjom proizvodnjom čelika od preko 10 miliona tona, suočava se s brojnim izvorima emisije prašine i visokim temperaturama dimnih plinova. Za ublažavanje uticaja zagađenja prašinom i dimom na postrojenje i životnu sredinu, kompanija je opremila preko 300 kompleta objekata za zaštitu životne sredine, uključujući više od 200 vrećastih filtera. [2]

S obzirom da je tema ovog rada uspješnost održavanja filterskog postrojenja u kompaniji za proizvodnju čelika, ukratko ćemo objasniti način rada navedenog postrojenja, Slika 1.

U građevinskom objektu kompanije za proizvodnju čelika, u sklopu transportne i dozirne linije za pripremu sirovina u proizvodnom procesu nalaze se strojevi i lokacije na kojima je potrebno izvršiti odsis prašine, a sa zahtjevanim odsisnim brzinama na haubama. Na temelju tih podataka

izračunata je ukupna količina zraka koja se odsisava sa strojeva i presipnih lokacija proizvodne linije, te je prema tome određena filterska površina koja može bez posljedica za sistem podnijeti opterećenje od $O = 140-160 \text{ m}^3/\text{m}^2$ za normalnu prašinu, te $O = 100-120 \text{ m}^3/\text{m}^2$ za sitnu prašinu. Ovisno o filterskoj površini povećava se ili smanjuje veličina (dimenzija) filtera, no koncept rada uvijek ostaje isti [9].

Odsisavanje materijala (smjesa zraka i prašine) ostvaruje se potrebnim podtlakom u cijevnoj mreži pomoću odsisnog ventilatora. Iz glavne ili više glavnih podtlačnih linija magistralnih cjevovoda materijal se transportuje do stabilnog filtera gdje se pomoću filter vreća filtrira prašina od zraka. Filter vreće su prema potrebi antistatičke i vodootporne. Nakon što se smjesa onečišćenog zraka pročisti, odnosno profiltrirana prašina se zadrži u silosu-koritu filtera, čisti zrak putem cjevovoda se isto tako u podtlaku transportuje do odsisnog ventilatora. Čisti zrak tako prolazi kroz ventilator, ne oštećujući ga i povratnim cjevovodom se vraća natrag u atmosferu. Nakon filtracije smjese zraka i prašine, zrak prolazi kroz filter vreće, a prašina ostaje u njima, odnosno u filteru i skuplja se u korito-silos ispod filtera.

Kako bi se produžio vijek trajanja filterskih vreća i smanjila njihova zapunjenost filter je opremljen sistemom otresanja/regeneracije filterskih vreća centrifugalnim ventilatorom.

Tokom rada filtera, kroz centrifugalni ventilator, koji se nalazi iznad čiste komore filtera (ventilator je pozicioniran na krovu filtera, zajedno sa cjevovodom i leptir-klapnama) upuhuje se zrak u jedan red filter vreća unutar filtera, i to na unutrašnje-čiste strane filter vreća. Kako bi se dobilo efikasnije otresanje/regeneracija vreća centrifugalni ventilator otresanja potrebni zrak za otresanje koristi, odnosno *povlači* iz čiste komore filtera. Na taj način stvara se kontra tlak (nadtak) postojećem glavnom odsisnom ventilatoru linije, gdje se istovremeno smanjuje podtlak u komori filtera sa vrećama, a raste tlak u čistoj komori filtera. Ovim principom dobiva se dodatni efekt koji pospješuje otresanje vreća pomoću zraka upuhanog snagom centrifugalnog ventilatora otresanja.

Pošto se kolica i komore ne mogu fiksno povezati sa konstrukcijom reda vreća koji se u određenom trenutku otresa, optimalno brtvljenje-dihtanje obavlja se pomoću prikladnog fleksibilnog materijala sa rasterom rupa na sebi koji omogućuje ciljano upuhivanje zraka u filter vreće koje se nalaze u jednom vertikalnom redu vreća.

Ovaj koncept otresanja/regeneracije filter vreća omogućuje otresanje prilikom rada sistema odsisa, ne narušavajući optimalni rad cjelokupnog sistema odsisa i filtera, ili smanjenje odsisa zraka sa prašinom sa potrebnih mjesta, te se na taj način dobiva efikasnije otresanje, jer se zrak u obliku impulsa, odnosno vala širi duž filterskih vreća odvajajući prašinu sa materijala vreća, koja dalje pada u korito filtera, i naposljetku prazni iz korita pomoću cijevnog pužnog transporterera. Dužinom vremena otresanja filter vreća se upravlja preko elektronskog programatora (PLC-a).

Nakupljeni materijal se preko presipnog mjesta usipa u pužni transporter, koji taj materijal vraća u proizvodni proces na lokaciju prema dogovoru sa investitorom.

3. SLUŽBA ODRŽAVANJA FILTERSKIH POSTROJENJA

Proces održavanja tehničkih sredstava za rad (postrojenja, strojevi, transportna sredstva, aparati i uređaji, ...) sprovodi se kroz aktivnosti preventivnog, periodičnog, investicionog održavanja, periodičnih pregleda, interventnog otklanjanja kvarova, te kontinuirane izrade, nabavke i ugradnje rezervnih dijelova. Pomenute aktivnosti obuhvataju:

- mašinsko održavanje,
- periodične preglede i
- održavanje primarnih i sekundarnih sistema otprašivanja.



Slika 1. Vrećasto filtersko postrojenje u kompaniji za proizvodnju čelika

3.1. Mašinsko održavanje

Isto se provodi u različitim vremenskim periodima i obuhvata skupove aktivnosti koji se obavljaju prilikom istog. Tu se sprovode sljedeće vrste održavanja:

- Dnevno održavanje,
- Periodično održavanje,
- Investiciono održavanje,
- Interventno otklanjanje većih kvarova i havarija,
- Popravka, izrada i nabavka rezervnih dijelova,

koje se razlikuju ne samo po vremenu nego i po radovima koji se obavljaju u okviru istog. Kao primjer navodimo šta se radi na poslovima dnevnog i periodičnog održavanja:

Dnevno održavanje postrojenja vrši se prema uputstvima za rukovanje i održavanje postrojenja i listama kontrolnih pregleda, u kojima su precizirane konkretne aktivnosti za rukovaoca postrojenja. O uočenim nepravilnostima u radu mašine / postrojenja neposredni radnici proizvodnje obavještavaju usmeno dežurne radnike održavanja, na osnovu informacija dobijenih od zaposlenika održavanja i majstora za određena područja analiziraju se navedene informacije i utvrđuje prioritet održavanja koji može biti:

- odmah otkloniti kvar dok postrojenje nastavlja sa radom;
- otkloniti kvar pri sljedećem tehnološkom zastoju;
- nedostatak otkloniti pri sljedećem planiranom sedmičnom ili mjesečnom remontu.

Na osnovu podataka realizacije aktivnosti dnevnog održavanja, te u skladu sa godišnjim planom održavanja, menadžeri održavanja uz pomoć asistenta menadžera uz konsultaciju sa direktorom, planiraju periodično održavanje. **Plan periodičnog održavanja** se radi za svaku sedmicu u mjesecu u skladu sa zahtjevima proizvodno-tehnološkog procesa. U slučajevima velikog obima poslova koji prevazilaze kapacitete, mogu se koristiti i kapaciteti nekog drugog Sektora ili kapaciteti eksternog izvođača izvan preduzeća.

3.2. Održavanje primarnih i sekundarnih sistema otprašivanja

3.2.1. Postrojenja primarnog otprašivanja

Ovoj grupi postrojenja pripadaju hibridni filteri i elektrofilteri sa svim svojim pripadajućim postrojenjima. Postrojenjima filtera pripadaju sabirni koševi – 10 komada ispod svakog filtera, dvopolne klapne i mehanizmi za otresanje elektroda. Ovaj posao održavanja elektrofiltera radi održavanje u dnevnoj smjeni, Tabela 1.

Tabela 1. Pregled i održavanje postrojenja primarnog otprašivanja [9]

POSTROJENJE PRIMARNOG OTPRAŠIVANJA		
R.b.	Učestalost pregleda	Aktivnosti
1.	Dnevni	Vizuelni pregled ispusnih mehanizama (klapni) za ispuštanje prašine iz filtera, vizuelni pregled ispusnih koševa iz elektrofiltera
2.	Sedmični	Pregled elektroda u elektrofilterima, pregled mehanizama koji opslužuju elektrode
3.	Mjesečni	Zamjena brtvi na ispusnim mehanizmima (klapnama), eventualna sanacija ispusnih koševa, čišćenje elektrofiltera
4.	Polugodišnji	Pregled i zamjena ulja u reduktorima otresača elektrofiltera
5.	Godišnji	Remont elektrofiltera sa svim pratećim dijelovima

3.2.2. Postrojenja sekundarnog otprašivanja

Ovoj grupi postrojenja pripada: ATU i VA sistema otprašivanja i vrećasti filtera sa pratećom usisnom i potisnom instalacijom, Tabela 2.

Tabela 2. Pregled i održavanje vrećastih filterskih postrojenja [9]

POSTROJENJE PRIMARNOG OTPRAŠIVANJA		
R.b.	Učestalost pregleda	Aktivnosti
1.	Dnevni	Pregled usisne i potisne instalacije, vizuelni pregled filtera i pregled parametara filtera
2.	Sedmični	Pregled unutrašnjosti filterskog postrojenja, pregled kolica za otresanje/ispuhivanje vreća, pregled filc dizne, pregled vodilica lanca kolica za otresanje/ispuhivanje vreća, pregled pužnih transporterera za transport prašine iz filtera.
3.	Mjesečni	Podešavanje kolica za otresanje vreća, centriranje filc fizne, pregled leptir klapni za ispuhivanje vreća, pregled pužnica na pužnim transporterima, pregled fleksibilnih crijeva za ispuhivanje vreća, pregled koša ispod filtera.
4.	Polugodišnji	Podmazivanje ležajeva pužnih transporterera, zamjena fleksibilnih crijeva, zamjena filc dizne, zamjena točkica na kolicima.
5.	Godišnji	Pregled vreća, te zamjena istih po potrebi (svake dvije godine), sanacija koša ispod filtera.

4. USPJEŠNOST ODRŽAVANJA VREĆASTOG FILTERSKOG POSTROJENJA U 2023. GODINI (PRIMJENA INDIKATORSKIH METODA OCJENE USPJEŠNOSTI)

Posmatrat ćemo rad filterskog postrojenja tokom 2023. godine.

Naravno, tokom godine dešavali su se različiti kvarovi koji su doveli do otkaza postrojenja i koji su zahtijevali određene intervencije. U sljedećoj tabeli (Tabela 3.) navedene su sve intervencije na postrojenju u 2023. godini.

Tabela 3. Neplanirani kvarovi (otkazi) filterskog postrojenja u 2023. godini [9]

Naziv postrojenja	Januar	Februar	Mart	April	Maj	Juni
Vrećasto filtersko postrojenje	-zamjena postolja reduktora pužnog transportera br.1 -prljava komora podignuta na 2000 Pa i sve radi u automatici -zamijenjen pogonski lanac puža br.1 -odvojen od komunikacije i više ne izbacuje"	- resetovani parametri -začepio pužni transp. te usisan filter i zamijenjen pogonski lanac na pužnom transp. br.1 -čišćenje kose cijevi između pužnih transp., zamjena pogonskog lanca na pužnom transp. br.1"	- izbacio zbog pužnog transportera br.1 - zamijenjen lančanik z=16 - usisan pužni transporter br.1 i pušten u rad -pregledana i očišćena kosa cijev između pužnih transportera br.1 i br.2"	- pregled, defektacija i popravka leptir klapni za ispuhivanje vreća	NIJE BILO KVAROVA (OTKAZA)	-zamjena klapne pogona za ispuhivanje vreća
	Juli -zamjena klapne pogona za ispuhivanje (otresanje) vreća -zavarivanje fleka na cijevima - zamjena leptir klapne	Avgust NIJE BILO KVAROVA (OTKAZA)	Septembar -remont filtera (Alpimont, početak radova) -zamjena klapni za otresanje vreća - zamjena lanca na pužu i čišćenje puža 3 -pregled filtera (problem: poremećeni parametri) -podmaz. ležajeva na pužnom transp. 2 -pregled klapni za otresanje vreća	Oktobar -zamjena klapne (dp= 200 Pa) -podešavanje protoka zraka na usisnom cjevovodu (28 Hz) -zamjena ulja u reduktoru -zamjena klapna -zaustavljen filter, zamijenjen sklopnik i filter ponovo pušten u rad	Novembar - zamijenjene vodilice od lanca kolica za otresanje vreća (dp= 150 Pa)	Decembar STAJANJE POGONA

Neki od indikatora održavanja koje možemo izračunati iz gornjih podataka su:

$$I_1 = \text{Vrijeme u radu} = \frac{\text{Broj sati u radu}}{\text{Ukupan broj sati}} * 100 = 92,06\%$$

$$I_2 = \text{Vrijeme u otkazu} = \frac{\text{Broj sati u otkazu}}{\text{Ukupan broj sati}} * 100 = 7,94\%$$

Indikatori za ocjenjivanje uspješnosti održavanja I_1 i I_2 nam pokazuju da je postrojenje 92,06% vremena tokom 2023. godine bilo u radu, a 7,94% vremena je bilo u kvaru (odnosno nije radilo).

Kod otkaza postrojenja razlikovati ćemo planirane i neplanirane otkaze. Planirani radovi na postrojenju prikazani su u sljedećim tabelama, kao i broj sati planiranih za navedene radove. Iz tabele 3 možemo vidjeti da je broj neplaniranih otkaza postrojenja **27**. Dok iz tabele 4 možemo vidjeti da je broj planiranih zaustavljanja filtera **15**. Ukupan broj zastoja je **42**.

$$I_3 = \frac{\text{Broj neplaniranih zastoja}}{\text{Ukupan broj zastoja}} * 100 = \frac{27}{42} * 100 = 0,6428 * 100 = 64,28\%$$

$$I_4 = \frac{\text{Broj planiranih zastoja}}{\text{Broj ukupnih zastoja}} * 100 = \frac{15}{42} * 100 = 0,3572 * 100 = 35,72\%$$

Tabela 4. Plan mjesečnih i godišnjih remonata filterskih postrojenja [9]

PLAN MJESEČNIH I GODIŠNJIH REMONATA EKOLOŠKIH POSTROJEŃA ZA 2023. GOD.		Zemlja, 04.07.2023., godine												Prispebnica	Planirani poslovi	Broj sati za plansko održavanje	Ukupan Br. Sati			
Br. vr	Naziv postrojenja	Mjesec	Januar	Februar	Mart	April	Maj	Jun	Juli	August	Septembar	Oktoibar	Novembar					Decembar		
1	Filtersko postrojenje F - 1	pl.															Zamjena vreća (1000 kom.) GARAŠTIH ROK DO 08.2023. planirano za avgust (post-umno održanje CEO)	1. remont (zamjena vreća): 7 dana 2. podmazivanje zamjesečno 3. zamjena fleksibilnih cijelova, legtir klipovi, vodilica od lanca kolica, leđajeva i si - 4 sata mjesečno 4. čišćenje cijevovoda, kolekva, pužnih transportera- 8 sati mjesečno	1.168 sati 2. 12 sati 3. 48 sati 4. 96 sati	324
		repl.1																		
		repl.2																		
		repl.																		
2	Filtersko postrojenje F - 2	pl.														Zamjena vreća (1000 kom.) GARAŠTIH ROK DO 08.2023. planirano za avgust (post-umno održanje CEO)	1. remont (zamjena vreća): 7 dana 2. podmazivanje zamjesečno 3. zamjena fleksibilnih cijelova, legtir klipovi, vodilica od lanca kolica, leđajeva i si - 4 sata mjesečno 4. čišćenje cijevovoda, kolekva, pužnih transportera- 8 sati mjesečno	1.168 sati 2. 12 sati 3. 48 sati 4. 96 sati	324	
		repl.1																		
		repl.2																		
		repl.																		
3	Filtersko postrojenje F - 3	pl.														Zamjena vreća (1000 kom.) GARAŠTIH ROK DO 08.2023. planirano za avgust (post-umno održanje CEO)	1. remont (zamjena vreća): 7 dana 2. podmazivanje zamjesečno 3. zamjena fleksibilnih cijelova, legtir klipovi, vodilica od lanca kolica, leđajeva i si - 4 sata mjesečno 4. čišćenje cijevovoda, kolekva, pužnih transportera- 8 sati mjesečno	1.168 sati 2. 12 sati 3. 48 sati 4. 96 sati	324	
		repl.1																		
		repl.2																		
		repl.																		

Legenda:	
	1. rezervni dijelovi sa skladišta
	2. kupiti rezervne dijelove
	3. rezervna radna snaga
	4. odloziti radna snaga

Legenda:	
	Planirani remont
	Popravljen plan aktivnosti 1
	Popravljen plan aktivnosti 2
	Radovi na postrojenju (remont)
	Reaktivacija
	nje op.

Indikatori za ocjenjivanje uspješnosti održavanja I_3 i I_4 nam pokazuju da je 64,28% neplaniranih zastoja i 35,72% planiranih zastoja. Ovaj indikator ocjene uspješnosti je pokazatelj da bi se broj planiranih zastoja trebao povećati pri samoj izradi plana.

$$I_5 = \frac{\text{Broj sati planiranih zastoja}}{\text{Broj sati ukupnih zastoja}} * 100 = 54,45\%$$

$$I_6 = \frac{\text{Broj sati neplaniranih zastoja}}{\text{Broj sati ukupnih zastoja}} * 100 = 45,55\%$$

Ključni indikator učinka (KPI) – MTBF: srednje vrijeme između kvarova. MTBF jedan je od najvažnijih indikatora za sektor održavanja. [6,7,8]

Mjeri prosjek vremena dobrog funkcionisanja između kvarova opreme koja se može popraviti i odličan je alat za mjerenje pouzdanosti mašine. Najefikasniji način upravljanja ovim indikatorom je primjena na svaki dio opreme. To olakšava proces, jer smatra da će svaki od njih imati drugačiji životni ciklus. Za naš primjer:

$$I_7 = MTBF = 265,2 [h]$$

Kada se utvrdi prosječno vrijeme od jednog kvara do drugog, možemo odrediti učestalost s kojom moramo staviti naše aktivnosti preventivnog održavanja i inspekcije u MPC (planiranje i kontrola održavanja). Preporučuje se da izračunate 70% srednjeg vremena između kvarova za obavljanje ove inspekcije. Odnosno, ako filter ima MTBF od 265,2 sati, svakih 185,6 sati (265,2 x 0,7) mora se izvršiti pregled ove opreme. Logično, što je veći MTBF to bolje, jer opremi treba duže da otkáže, odnosno uspjeti ste postići manju učestalost prekida.

Ključni indikator učinka (KPI) – MTTR: Srednje vrijeme za popravku. Ovaj indikator je usko povezan s lakoćom održavanja, odnosno lakoćom kojom tim za održavanje zamjenjuje opremu u uslovima da obavljaju svoje funkcije nakon kvara. Drugim riječima, ovaj KPI ukazuje na prosječno vrijeme za popravku sredstva [6,7,8].

Za razliku od MTBF-a, što je niži MTTR, to bolje, tako da moramo raditi na tome da on bude nizak. U našem slučaju izračunati MTTR će biti:

$$I_8 = MTTR = 23,8 [h]$$

Glavne greške kod ocjene ovih indikatora:

- Ne postoji idealna vrijednost i referenca za MTTR,
- Zahtjevanje od timova za održavanje da održavaju nizak MTTR može ih dovesti u zabludu. Mnogo bolje od održavanja niskog MTTR-a je izbjegavanje kvarova. Menadžer održavanja mora ohrabriti tim da koristi detektivske i prediktivne strategije održavanja koje se zasnivaju na praćenju imovine. I jedni i drugi procjenjuju „zdravstveno“ stanje mašina, identifikujući „simptome“ u realnom vremenu kako sredstvo ne bi izgubilo svoje performanse do tačke da dođe do kritične situacije kvara.

Ključni indikatori učinka (KPI) – Izračunavanje dostupnosti i pouzdanosti sredstava

Ova dva indikatora su zaista važna za planiranje i kontrolu održavanja (MPC), jer je njegov glavni cilj da garantuje i poveća dostupnost i pouzdanost sredstava, optimizujući produktivnost. Zbog toga smo odlučili da ih spojimo. Oba se određuju na osnovu MTBF-a i MTTR-a. Ali prije nego što ih izračunamo, shvatimo značenje svakog od njih prema brazilskom nacionalnom standardu 5462: Dostupnost: kapacitet stavke da može obavljati određenu funkciju u datom trenutku ili tokom određenog vremenskog perioda. Pouzdanost: vjerovatnoća da stavka izvrši svoju funkciju koja je navedena u projektu, prema radnim uslovima, u određenom vremenskom intervalu. Značenje je slično, zar ne? Pokušajmo bolje oprimjeriti. Raspoloživost opreme je procenat u kojem je sredstvo ostalo dostupno tokom određenog perioda. Pouzdanost će, s druge strane, biti vjerovatnoća da će oprema ostati dostupna u datom periodu. Formula dostupnosti je data:

$$AVAILABILITY = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 = \frac{265,2}{265,2 + 23,8} \times 100 = 91,76\%$$

Standardi svjetske klase određuju da je dobra dostupnost iznad 90%. Odnosno, u ovom slučaju oprema je unutar granica [6,7].

Broj izvršenih remonata na filterskom postrojenju je 1, a također i broj planiranih remonata je 1.

$$I_7 = \frac{1}{1} = 100\%$$

Ako posmatramo indikator I_7 , možemo zaključiti da imamo 100% uspješnost remonta u 2023. godini.

Tabela 5. Zaposleni u održavanju [9]

R.br.	Posao koji obavljaju	Br. Radnika	Radno mjesto
1.	Eksterna radna snaga za održavanje filtera	3	bravar
2.	Eksterna radna snaga za održavanje filtera	1	zavarivač
3.	Eksterna radna snaga za remont filtera	5	bravar 4 + zavarivač 1
4.	Interna radna snaga	1	bravar
5.	Interna radna snaga	1	dipl.ing.

Tabela 6. Zalihe rezervnih dijelova [9]

br.	Naziv	Opis	Mjerna jedinica	Broj komada/sati
1.	FLEKSIBILNO CRIJEVO ZA ISPUHIVANJE VREĆA	CRIJEVO FLEKSIB. LTS KO6 – 1000 – 0064	kom	10
2.	KAVEZ VREĆA PREMA UZORKU 2000X200X20 MM	KAVEZ VREĆA PREMA UZORKU 2000X200X20 MM	kom	1000
3.	LEŽAJ RADIJALNI 6004-2RSH/C3	LEŽAJEVI ZA KOLICA FILTERA	kom	20
4.	Filc dizne za ispuhivanje vreća filtera	FILC DIZNE 2530X305X30 SKICA	kom	10
5.	OBJUMICA ZA CRIJEVO DIMEN. 60-380 B12/W4	OBJUMICA ZA CRIJEVO DIMEN. 60-380 B12/W4	kom	40
6.	OBJUMICA ZA CRIJEVO DIMEN. 60-215 B12/W4	OBJUMICA ZA CRIJEVO DIMEN. 60-215 B12/W4	kom	40
7.	FILTERSKE VREĆE	Vreće za F1, F2 i F3	kom	1000
8.	VIJAK M12 X 120 DIN 933	POTROŠNI REZERVNI DIO	kom	200
9.	NAVRTKA M12 DIN 934	POTROŠNI REZERVNI DIO	kom	200
10.	LIM 10 mm HARDOX 400	LIM 10 mm HARDOX 400	kg	2891
11.	LIM 5mm S235	LIM 5mm S235 15000x6000x5	kg	2826,08
12.	LANAC JEDNOREDNI 12B SD (LANAC GAL 8187 12B-1)	LANAC ZA POGON PUŽNIH TRANSPORTERA	m	30
13.	ELEMENT SPOJICE ZA LANAC 12B-1 DIN8187	ELEMENT SPOJICE ZA POGON PUŽNIH TRANSP.	kom	30
14.	LANČANIK 3/4"x7/16 Z=16	POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	10
15.	CIJEV 2.499247 POZ.218 DIN2458 ST37.2	CIJEV 2.499247 POZ.218 DIN2458 ST37.2	kom	4
16.	CIJEV 2.499247 POZ.219 DIN2458 ST37.2	CIJEV 2.499247 POZ.219 DIN2458 ST37.2	kom	4
17.	POKLOPAC FILTER VREĆ PREMA UZO.200X40	POKLOPAC FILTER VREĆ PREMA UZO.200X40	kom	1000
18.	MOTOR EL. TIP:ASEA MT90L24F165-2 2,2KW	MOTOR EL. TIP:ASEA MT90L24F165-2 2,2KW	kom	2
19.	REDUKTOR I=12,7 MODEL:HM410042-D;ASEA	REDUKTOR I=12,7 MODEL:HM410042-D;ASEA	kom	2
20.	KUČIŠTE SA LEŽAJEM UCF 217	REZERVNI POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	8
21.	KUČIŠTE SA LEŽAJEM UCF 214	REZERVNI POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	6
22.	KUČIŠTE SA LEŽAJEM UCF 212	REZERVNI POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	5
23.	KUČIŠTE SA LEŽAJEM UCF 206	REZERVNI POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	4
24.	KUČIŠTE SA LEŽAJEM UCF 204	REZERVNI POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	4

Tabela 7. Utrošeni dijelovi u toku 2023. godine [9]

br.	Naziv	Opis	Mjerna je	Broj komada/sati
1.	Fleksibilno crijevo za ispuhivanje (otresanje) vreća	CRIJEVO FLEKSIB. LTS KO6 – 1000 – 0064	kom	4
2.	KAVEZ VREĆA PREMA UZORKU 2000X200X20 MM	KAVEZ VREĆA PREMA UZORKU 2000X200X20 MM	kom	1000
3.	LEŽAJ RADIJALNI 6004-2RSH/C3	LEŽAJEVI ZA KOLICA FILTERA	kom	8
4.	Filc dizne za ispuhivanje vreća filtera	FILC DIZNE 2530X305X30 SKICA	kom	4
5.	OBJUMICA ZA CRIJEVO DIMEN. 60-380 B12/W4	OBJUMICA ZA CRIJEVO DIMEN. 60-380 B12/W4	kom	10
6.	OBJUMICA ZA CRIJEVO DIMEN. 60-215 B12/W4	OBJUMICA ZA CRIJEVO DIMEN. 60-215 B12/W4	kom	12
7.	Filterske vreće	Vreće za F3	kom	1000
8.	LIM 10 MM HARDOX 400	LIM 10 MM HARDOX 400	kg	556
9.	LANČANIK 3/4"x7/16 Z=16	POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	2
10.	CIJEV 2.499247 POZ.218 DIN2458 ST37.2	CIJEV 2.499247 POZ.218 DIN2458 ST37.2	kom	1
11.	CIJEV 2.499247 POZ.219 DIN2458 ST37.2	CIJEV 2.499247 POZ.219 DIN2458 ST37.2	kom	1
12.	POKLOPAC FILTER VREĆ PREMA UZO.200X40	POKLOPAC FILTER VREĆ PREMA UZO.200X40	kom	1000
14.	REDUKTOR I=12,7 MODEL:HM410042-D;ASEA	REDUKTOR I=12,7 MODEL:HM410042-D;ASEA	kom	1
15.	LIM 5mm S235	LIM 5mm S235 15000x6000x5	kg	706,52
16.	KUČIŠTE SA LEŽAJEM UCF 217	REZERVNI POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	2
17.	KUČIŠTE SA LEŽAJEM UCF 214	REZERVNI POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	4
18.	KUČIŠTE SA LEŽAJEM UCF 212	REZERVNI POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	4
19.	KUČIŠTE SA LEŽAJEM UCF 206	REZERVNI POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	2
20.	KUČIŠTE SA LEŽAJEM UCF 204	REZERVNI POTROŠNI DIO ZA PUŽNE TRANSP.	kom	1

Na osnovu tabela 5,6 i 7 u nastavku su izračunati indikatori uspješnosti I_8 i I_9 .

$$I_8 = \frac{\text{Vrijednost usluge redovnog održavanja}}{\text{Ukupni trošak usluge održavanja}} * 100 = 70,11\%$$

$$I_9 = \frac{\text{Vrijednost usluge remonta}}{\text{Ukupni trošak usluge održavanja}} * 100 = 29,89\%$$

Indikatori za ocjenjivanje uspješnosti održavanja I_8 i I_9 nam pokazuju da je vrijednost usluga redovnog održavanja 70,11% od ukupnog troška usluge održavanja, a vrijednost usluge remonta 29,89% od ukupnog troška usluge održavanja.

5. ZAKLJUČAK

U savremenom svijetu tehnike i ekonomije eksploatacija i održavanje postrojenja sve je složenije i odgovornije, a tehnički sistemi integrisani su u sve društvene i gospodarske procese i njihovo je pravilno funkcioniranje presudan uvjet svakodnevnih ljudskih aktivnosti [1].

Važnost održavanja raste sa složenošću industrijskih postrojenja, sa zahtjevima u pogledu kvalitete proizvoda, kao i u situacijama kada ih ne možemo isporučiti u zahtijevanom roku zbog kvara ili neispravnosti na postrojenju. Ulogu i značaj procesa održavanja u savremenim poslovnim sistemima i u sklopu proizvodnje moguće je analizirati samo uz ostale logističke i glavne procese. Poznavanjem tih veza podiže se efikasnost proizvodnje, vrsnoća proizvoda i ukupna učinkovitost poslovnog sistema.

S razvojem proizvodnog procesa potrebno je misliti i na razvoj procesa održavanja. To se ogleda u razvoju kadrova za održavanje (edukacija), nabavi savremene opreme i pomagala za preglede i servisiranje (dijagnostička oprema), u osiguranju originalnih rezervnih dijelova, uvođenju informacijskog sistema održavanja i dr.

Definiranje procesa održavanja sastoji se od definiranja njegove organizacijske strukture i od nadležnosti i definiranju programa održavanja za svaku vrstu tehničkih sredstava. Kod organizacijske strukture održavanja treba misliti o sadržaju i trajanju održavanja, o učestalosti izvođenja pojedinih radova na održavanju, o mjestu izvođenja radova, potrebnoj kvalifikacijskoj strukturi radne snage, o sredstvima (oprema, dokumentacija, prostor, rezervni dijelovi) te o troškovima održavanja.

Kroz stvaranje koncepcije održavanja prelamaju se utjecaji politike održavanja, sistema održavanja, strategije, pristupa, principa održavanja i osobina tehničkog sredstva. Sistem održavanja ostvaruje svoj cilj koristeći određene resurse tehnologije i organizacije održavanja: vrijeme u kojem traje održavanje, prostor u kojem se ono izvodi, materijalni resursi (oprema, strojevi, alati, rezervni dijelovi i reprodukcijski materijal), kadar i tehnička radna dokumentacija.

U ovom radu prikazana je uspješnost rada vrećastog filterskog postrojenja za 2023. godinu. Indikatori uspješnosti su relativno dobri. Naravno, potrebno je i dalje poboljšavati održavanje, kako bi rezultati bili još bolji.

6. LITERATURA

- [1] Brdarević, Safet: *Uspješnost održavanja*, OMO Beograd, 1988.
- [2] <https://www.linkedin.com/pulse/application-pulse-jet-bag-filters-steel-plants-visionfilter> (pregledano 29.08.2024.)
- [3] Masoud Ebrahimi, Seyyed Mohammad Taghi Fatemi Ghomi, Behrooz Karimi: *Application of the preventive maintenance scheduling to increase the equipment reliability: Case study- bag filters in cement factory*. Journal of Industrial and Management Optimization, 2020, 16(1): 189-205. doi: [10.3934/jimo.2018146](https://doi.org/10.3934/jimo.2018146)
- [4] Brdarević, Safet: *Održavanje sredstava za rad*, Mašinski fakultet u Zenici, Zenica, 1993.
- [5] Karić, M.; Brdarević, S.; Jašarević, S.: *Mjerenje uspješnosti funkcije održavanja kao instrument upravljanja u JP EP ZD RMU "Abid Lolić" Bila-Travnik*, 9th Reseach/Expert Conference with International Participation QUALITY 2015, Neum, B&H, Organiser: University of Zenica - University of Erlangen-Nuremberg – Quality Association of Bosnia and Herzegovina; Neum, B&H, 10-13 June 2015., Brdarević S., Jašarević S. (Ed.), ISSN 1512-9268, pages 249-256
- [6] Stenstrom, C., Parida, A., Kumar, U. Galar. D.: *Performance Indicators and Terminology for Value Driven Maintenance*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 222-232. <http://dx.doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0024>
- [7] Al Weber; Ron Thomas: *Key Performance Indicators - Measuring and Managing the Maintenance Function*, Ivara Corporation, November 2005, <https://www.plant-maintenance.com/articles/KPIs.pdf> (preuzeto: 8.08.2024)
- [8] Aditya Paridal, Gopi Chattopadhyay; Uday Kumar: *Multi Criteria Maintenance Performance Measurement: A conceptual model*, Luleå University of Technology, Proceedings of COMADEM 2005, 31st Aug – 02nd Sep 2005, Cranfield, UK, pp. 349-356, ISBN: 1 871315 91 3
- [9] Dokumentacija kompanije za proizvodnju čelika

ISPITIVANJE PAROVODA U SKLADU SA STANDARDOM EN 13480-5

STEAM PIPING SYSTEM TESTING ACCORDING TO EN 13480-5 STANDARD

Damir Špago, docent
Edin Džiho, docent
Emir Nezirić, vanredni profesor
Edin Šunje, docent
Univerzitet „Džemal Bijedić“ u Mostaru, Mašinski fakultet
Mostar, Bosna i Hercegovina

REZIME

Kao posljednji korak prije puštanja procesno-energetskog postrojenja u rad javljaju se pregled i ispitivanje samog sistema pri radnim parametrima. Ova ispitivanja se uglavnom provode poštujući procedure propisane odgovarajućim standardima. U ovom radu je prikazan proces ispitivanja parovoda u postrojenju za preradu kartonske ambalaže, a u skladu sa procedurama navedenim u standardu EN 13480-5 „Industrijski metalni cjevovodi – Pregled i ispitivanje“.

Ključne riječi: ispitivanje nedestruktivnim metodama, NDT, hidrostatičko ispitivanje pod pritiskom.

ABSTRACT

Inspection and testing of the system with working parameters is a last step prior the exploitation phase of process-energy plant. Those testings are usually done according to procedures defined in the appropriate standards. This paper will present the proces of the testing of steam piping system in the cardboard production plant, and with accordance to procedures described in standard EN 13480-5 „Metallic industrial piping – Inspection and testing“.

Ključne riječi: non-destructive testing, NDT, hydrostatic pressure test.

1. UVOD

Prilikom puštanja procesno-energetskih sistema, ali i drugih mašinskih sistema, potrebno je izvršiti preglede i ispitivanja koji će potvrditi kvalitet izrade i montaže sistema. Ovim pregledima se potvrđuje operativna gotovost sistema i prije nego sistem krene u probni rad, te se smanjuju eventualni otkazi u prvoj fazi eksploatacije sistema [1]. Ova ispitivanja su uglavnom propisana različitim međunarodnim standardima koji propisuju sve aspekte procesa ispitivanja sistema, od karakteristika opreme za ispitivanje, preko obučenosti osoblja pa sve do kvalitativnih i kvantitativnih graničnih stanja prihvatljivosti parametara rada sistema.

Specifičnost parovoda kao elemenata proceno-energetskih sistema je to što su cijevni sistemi, ali i drugi elementi u radu izloženi visokim pritiscima i povišenim temperaturama. Pored standardnih metoda ispitivanja bez razaranja, ovakvi sistemi su najčešće podvrgnuti

hidrostatičkom ispitivanju kojim se ocjenjuje sveobuhvatan kvalitet izvedbe samog sistema [2].

U ovom radu će biti prikazan proces ispitivanja parovoda u postrojenju za preradu kartona prema standardu EN 13480-5 „Industrijski metalni cjevovodi – Pregled i ispitivanje“.

2. PROCEDURA ISPITIVANJA PREMA STANDARDU „EN 13480-5 INDUSTRIJSKI METALNI CJEVOVODI – PREGLED I ISPITIVANJE“

Standard EN 13480-5 „Industrijski metalni cjevovodi – Kontrola i ispitivanje“ definiše zahtjeve za preglede i ispitivanja metalnih cjevovoda u industriji [3]. Ovaj standard predstavlja dio serije standarda:

EN 13480-1 „Industrijski metalni cjevovodi – Općenito“

EN 13480-2 „Industrijski metalni cjevovodi – Materijali“

EN 13480-3 „Industrijski metalni cjevovodi – Dizajn i proračun“

EN 13480-4 „Industrijski metalni cjevovodi – Izrada i ugradnja“

EN 13480-5 „Industrijski metalni cjevovodi – Dodatni zahtjevi za ukopane cjevovode“

Standard definiše ispitivanja dijelova i elemenata cjevovoda u toku prefabrikacije dijelova cjevovoda, kontrolu zavarenih spojeva u toku same instalacije, te zavarenih spojeva nakon završetka instalacije a prije puštanja u rad cjevovoda. U ovom radu bit će opisan dio ispitivanja nakon završetka instalacije, a prije puštanja u rad cjevovoda.

Za ovo ispitivanje standard propisuje ispitivanja bez razaranja (NDT) zavarenih spojeva, kao i hidrostatički test nakon pozitivnih rezultata NDT ispitivanja.

2.1. NDT ispitivanja

NDT ispitivanja zavarenih spojeva propisana ovim standardom podrazumijevaju primjenu sljedećih aspekata:

- Zavareni spojevi trebaju biti podvrgnuti vizuelnoj kontroli prije ostalih NDT metoda;
- Područje koje se ispituje obuhvata zavar i zonu uticaja toplote;
- Površinska ispitivanja se izvode na vanjskoj površini cijevi;
- Sva ispitivanja se provode na zavaru u njegovom konačnom stanju, odnosno nakon zavarivanja ili nakon termičke obrade;
- Kriteriji prihvatljivosti trebaju biti usklađeni sa EN ISO 17635:2016, Dodatak A [4] ;
- Detektovane greške trebaju biti korigovane u skladu sa EN 13480-4 i ponovo ispitane istom NDT metodom i prema istim kriterijima prihvatljivosti;
- Tačke uspostavljanja i gašenja zavarivačkog luka je potrebno prebrusiti prije ispitivanja.
- Ukoliko se ispituje manje od 100% zavarenih spojeva, zavarene spojeve koji se ispituju izabrati slučajnim uzorkom.

U zavisnosti od debljine i vrste materijala [5] bira se postotak ispitanih zavarenih spojeva prema površinskim metodama ispitivanja (magnetnim česticama – MT, penetrantskim česticama – PT) ili volumetrijskim metodama (radiografsko ispitivanje – RT, ispitivanje ultrazvukom – UT). Svo osoblje koje provodi NDT ispitivanja treba da je certificirano najmanje nivo 1 prema EN ISO 9712:2012, dok evaluaciju rezultata može dati nivo 2 ili 3 prema istom standardu.

2.2. Hidrostatički test

Nakon završenih NDT ispitivanja pristupa se ispitivanju sistema pod pritiskom. Ispitivanje se u pravilu provodi vodom (hidrostatički test), dok se ispitivanje zrakom provodi samo u slučaju da voda može napraviti štetu na cjevovodu (korozija, led, težina vode) [6].

Ispitni pritisak ne smije biti manji od pritiska koji je za 43% veći od radnog pritiska. Nakon postizanja ispitnog pritiska, potrebno je održavati pritisak u trajanju od 30 minuta. Nakon

toga se sistem rasterećuje do radnog pritiska, nakon čega se podvrgava 100% pregledu zavarenih spojeva vizuelnom kontrolom. Za sistem se može reći da je uspješno izdržao hidrostatički test ako nisu uočena curenja ili plastične deformacije u toku ispitivanja.

Oprema za mjerenje pritiska u toku hidrostatičkog testa mora biti takva da može mjeriti testni pritisak.

3. PRIMJENA STANDARDA NA ISPITIVANJU STVARNOG POSTROJENJA

U nastavku je prikazana primjena standarda EN 13480-5 „Industrijski metalni cjevovodi – Kontrola i ispitivanje“ na stvarnom postrojenju parovoda u postrojenju za preradu kartona.

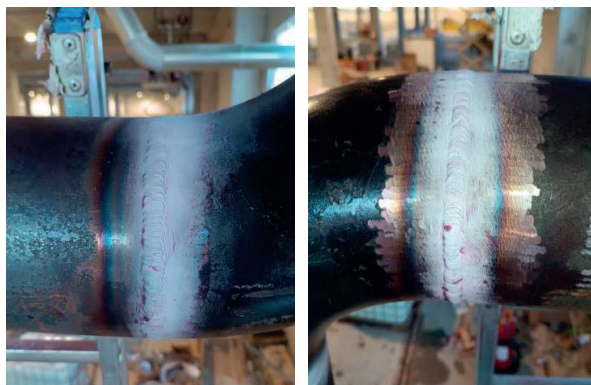
Postrojenje za preradu kartona se sastoji od hibridnog parnog kotla snage 5 MW na strani plamenika tečnog naftnog gasa i 2,3 MW na strani električnih grijača sa CRU (eng. condensate recovery unit) jedinicom za iskorištavanje otpadne toplote kondenzata i razvodnikom pare. Parovod se sastoji od tri vrste cijevi prečnika DN80 za kondenzat niskog pritiska i visokog pritiska, te DN150 za glavni parni vod. Materijal je čelik za posude pod pritiskom. Radni pritisak za glavni parni vod iznosi 13 bar a maksimalni 16 bar. Kondenzat visokog pritiska ima maksimalni pritisak od 9 bara, a kondenzat niskog pritiska manje od 1 bar.

Ispitivanje prije hidrostatičke probe se sastojalo od vizuelne kontrole 100% zavarenih spojeva, te ispitivanju 20% od ukupnog broja zavarenih spojeva penetrantskim tečnostima, što odgovara broju pojedinih tipova zavarenih spojeva zahtjevanih standardom. Po završetku ispitivanja metodama bez razaranja pristupilo se hidrostatičkom testu, odnosno ispitivanju pod pritiskom.

3.1. NDT ispitivanja

Vizuelna kontrola je izvršena na 100% dostupnih zavarenih spojeva. Spojevi su prije pregleda po potrebi očišćeni čeličnom četkom ili brisanjem krpom. Za pregled kao pomoćno sredstvo korištena je baterijska lampa (>500 lx). Vizuelnom kontrolom nisu uočeni propusti u izvođenju zavarivačkih radova, odnosno montaži cjevovoda.

Prije ispitivanja penetrantima površine su očišćena nečistoća, kontrola je rađena pod ambijentalnim osvjetljenjem proizvodnog pogona uz korištenje dodatne baterijske lampe (>500 lx) pri temperaturi ispitivanih komada od 12°C. Nakon čišćenja, na vanjsku površinu cijevi je nanesen vodom perivi bojom kontrastni penetrant TIEDE PWL-1. Pri ispitivanju je vrijeme penetracije iznosilo od 15 do 20 minuta, nakon kojeg je uklonjen višak penetranta brisanjem krpom blago natopljenom rastvaračem TIEDE RL-40. Nakon uklanjanja viška penetrantske tečnosti, na površinu je nanijet razvijatelj TIEDE DL-20. Od samog nanošenja razvijaja praćeno je razvijanje penetranta tokom narednih 15 do 20 minuta.



Slika 1. Zavareni spojevi iznad razdjelnika nakon nanošenja razvijaja

Ispitivanjem zavarenih spojeva penetrantskim tečnostima nisu detektovane nedozvoljene indikacije. Nakon vizuelne kontrolne i ispitivanja zavarenih spojeva penetrantskim tečnostima moglo se pristupiti hidrostatičkom ispitivanju.

3.2. Hidrostatički test

Za mjerenje pritiska tokom tlačne probe korišten je digitalni senzor pritiska sa mjernim trakama P8AP (100 bar) proizvođača HBM. Senzor je spojen na mjerno-pojačivački uređaj SPIDER 8, sa kojeg su podaci pohranjivani na računar (Slika 2.).

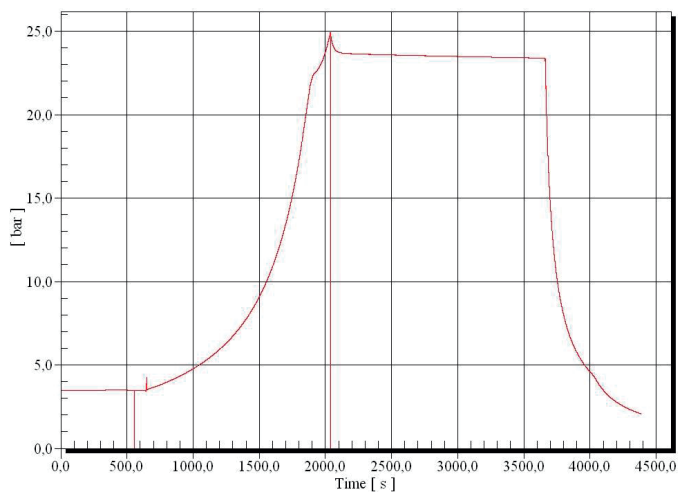


Slika 2. Lokacija senzora pritiska (uz postojeći manometar na sistemu)

Tlačna proba je prvo provedena nad glavnim parovodom sa radnim pritiskom od 13 bar i maksimalnim pritiskom do 16 bara. Prema standardu EN 13480-5 tlačna proba se provodi nad sistemom sa ispitnim pritiskom ne manjim od 1,43X maksimalni pritisak. Usvojeno je da ispitni pritisak bude 50% veći od maksimalnog pritiska.

$$P_t = 1,5 P_{\max} = 24 \text{ bar}$$

Tlačna proba je izvršena vodom na način da je cjevovod napunjen vodom, a zatim je električnom pumpom pritisak postepeno podizan do ispitnog pritiska. Dijagram promjene pritiska tokom tlačne probe prikazan je na slici 3.



Slika 3. Promjena pritiska prilikom tlačne probe glavnog parovoda

Tokom tlačne probe pri maksimalnom pritisku izvršena je vizuelna kontrola svih spojeva. Na zavrnim spojevima nije primjećeno propuštanje spojeva. Na rastavljivim spojevima (prirubnicama, manometru) primjećeno je propuštanje vode koje uzrokuje pad pritiska, te se dotezanjem istih postiglo odgovarajuće brtvljenje. Sva mjesta na kojima je uočeno propuštanje su u dijelu cjevovoda iznad razdjelnika kod parnih kotlova. Deformacije cjevovoda nisu uočene. Lokacije gdje su uočena propuštanja prikazane su na slici 4.

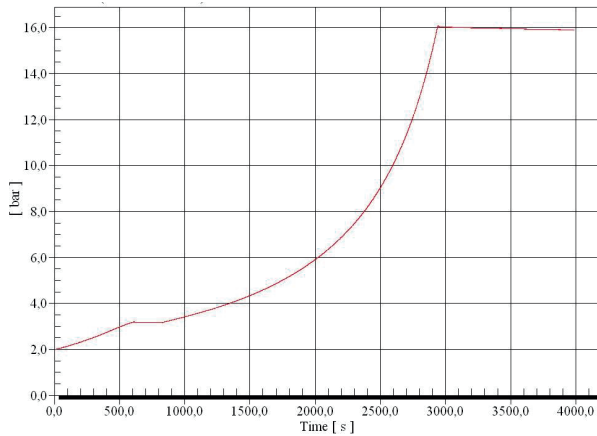


Slika 4. Lokacije na kojima je uočeno kapanje na rastavljivim spojevima

Po završetku ispitivanja glavnog parovoda voda iz glavne cijevi je preko spoja prebačena u cjevovod srednjetačnog kondenzata. U ovom cjevovodu radni pritisak je 9 bara, te je u skladu sa EN 13480-5 usvojen ispitni pritisak od 16 bara.

$$P_t = 1,78 P_s = 16 \text{ bar}$$

Električnom pumpom pritisak postepeno podizan do ispitnog pritiska. Dijagram promjene pritiska tokom tlačne probe cjevovoda srednjetačnog kondenzata prikazan je na slici 5.



Slika 5. Promjena pritiska prilikom tlačne probe cjevovoda srednjetačnog kondenzata

Za obje tlačne probe vrijeme trajanja ispitivanja je iznosilo minimalno 30 minuta preporučeno prema standardu EN 13480-5. Tokom tlačne probe nakon rasterećenja sa ispitnog na radni pritisak izvršena je vizuelna kontrola svih spojeva. Na zavernim spojevima nije primjećeno propuštanje spojeva. Deformacije na cjevovodu nisu zabilježene.

4. ZAKLJUČAK

Nakon ispitivanja zavarenih spojeva parovoda vizuelnom kontrolom u obimu 100 % dostupnih spojeva nisu pronađeni spojevi sa nedopuštenim nesavršenostima prema navedenim kriterijima prihvatljivosti.

Tokom ispitivanja zaverenih spojeva penetrantskim tečnostima u obimu od najmanje 20% zavarenih spojeva detektovane su indikacije na dva zavarena spoja. Navedene indikacije su izbrušene i ponovo zavarene, te nakon ponovljenog ispitivanja nisu detektovane. Također su ispitani dodatni spojevi, kako je predviđeno standardom EN 13480-5. Dodatnim ispitivanjem nisu pronađene nove indikacije.

Tlačnom probom su testirani su cjevovodi za radnu paru radnog pritiska 13 bara i cjevovod kondenzata visokog pritiska (radni pritisak 9 bara). Tokom tlačne probe nije primjećeno propuštanje zavarenih spojeva. Zbog nedovoljno pritegnutih steznih spojeva pojavilo se propuštanje na 4 spoja, te je dotezanjem spojeva ostvareno brtvljenje. Na cjevovodu nisu uočene dodatne deformacije.

Nakon svih provedenih ispitivanja, može se zaključiti da parovod zadovoljava kriterije prihvatljivosti navedenih standarda i može se pustiti u eksploataciju.

5. REFERENCE

- [1] Dhillon, B.S.: Engineering maintenance : a modern approach, CRC Press, Boca Raton (FL), 2002.
- [2] Becht, C.: Process Piping – The Complete Guide to ASME B31.3, ASME Press, New York, 2009.
- [3] BAS EN 13480-5/A1: Industrijski metalni cjevovodi - Dio 5: Kontrola i ispitivanje, 2020.
- [4] ISO/TR 15680: Zavarivanje – Smjernice za grupisanje metalnih materijala, 2017.
- [5] EN ISO 17635: Non-destructive testing of welds - General rules for metallic materials, 2016.
- [6] Kolmetz, K.: Hydrostatic Pressure Test (Engineering Best Practices), KLM Technology Group, Johor, Malaysia, 2023.

KOMPENZACIJA DIMENZIONALNIH ODSUPANJA CILINDRIČNIH MJERA KOD 3D PRINTANJA ONYX MATERIJALA

Josip Kačmarčik, v. prof. dr
Amer Neimarlija, asistent
Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet u Zenici
Fakultetska 1, Zenica, Bosna i Hercegovina

Pejo Konjatić, r. prof. dr.
Sveučilište u Slavonskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu
Trg Ivane Brlić Mažuranić 2, Slavonski Brod, Hrvatska

REZIME

Dimenzionalna tačnost predstavlja jedan od glavnih izazova kod 3D printanja FDM tehnologijom, jer proces topljenja i hlađenja materijala na kojem se zasniva, dovodi do temperaturnih širenja i skupljanja, što rezultira geometrijskim odstupanjima. U ovom istraživanju, cilj je bio kompenzirati ta odstupanja kako bi se postiglo labavo nalijeganje cilindričnih geometrija. Na osnovu prethodnih istraživanja su definirane korekcije cilinričnih mjera koje su primjenjene prilikom kreiranja CAD modela za 3D printanje. Koristeći 3D printer Markforged Mark Two i Onyx materijal, izrađeni su parovi uzoraka, s cilindrom na jednom i odgovarajućim cilindričnim otvorom na drugom uzorku u paru, s prečnicima u rasponu od 5 do 20 mm. Pri izradi uzoraka su varirani parametri 3D printanja, ispunu i debljina sloja. Rezultati istraživanja su pokazali da su primijenjene kompenzacije uspješno rezultirale željenim labavim nalijeganjem.

Ključne riječi: 3D printanje, FDM tehnologija, ONYX materijal, cilindrična geometrija, dimenzionalna tačnost, kompenzacija dimenzionalnih odstupanja

1. UVOD

Aditivna proizvodnja ili 3D printanje, što je široko poznat i korišten termin, predstavlja proizvodnu tehnologiju čija ukupna tržišna vrijednost kontinuirano raste tokom prethodnih godina, uz prognoze daljeg rasta [1]. Aditivna proizvodnja je suštinski digitalna tehnologija jer se zasniva na postojanju digitalnog, 3D model proizvoda. Dodatno, sa svojom fleksibilnošću i mogućnosti lake prilagodbe proizvoda kupcu, čini jedan od neizostavnih dijelova buduće savremene industrije. Kontinuirani razvoj 3D printera i materijala za printanje doveo je do značajne i brze ekspanzije primjene 3D printanja u raznim industrijama. Danas su 3D printeri dostupni u širokom rasponu cijena, prilagođeni različitim aplikacijama, a uz besplatan pristup bazama znanja i modelima, omogućeno je daljnje širenje njihove upotrebe. Ova tehnologija koristi se za proizvodnju proizvoda od polimera, metala i keramike u raznim sektorima, uključujući automobilsku industriju, medicinu, arhitekturu, vojnu industriju, avioindustriju, elektroindustriju itd [2-3].

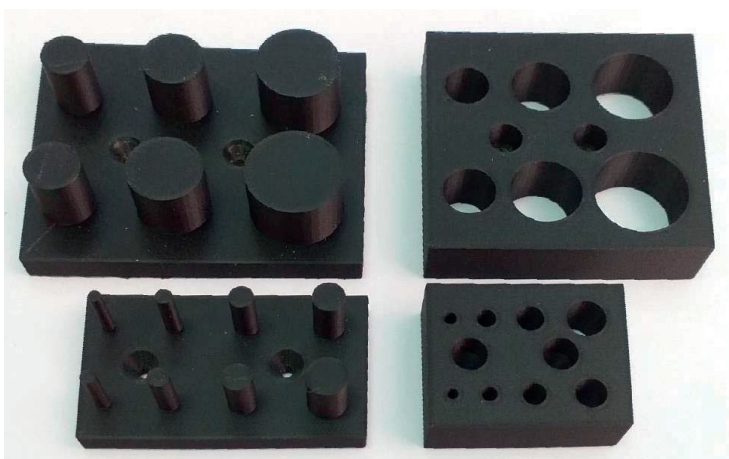
Najpristupačnija tehnologija za 3D printanje polimera je FDM tehnologija kod koje je se pomoću pokretne glave za printanje koja topi materijal -filament, i slaže ga nit po nit, sloj po sloj, izrađuje konačni dio [4-5]. Jedan od glavnih nedostataka FDM tehnologije proizlazi iz toga što se u procesu printanja materijal topi, zatim hladi i očvršćava, što uzrokuje temperaturna širenja i skupljanja. Na kraju, to dovodi do geometrijskih odstupanja u odnosu na predviđene dimenzije i oblike. Za uspješnu primjenu 3D printanih dijelova u sklopovima ili kao zamjenu za postojeće dijelove, prilikom dizajna 3D dijelova potrebno je uzeti u obzir ova moguća odstupanja i izvršiti korekciju mjera kako bi se kompenzirala odstupanja od nominalnih dimenzija uzrokovana varijacijama tokom 3D printanja. Istraživanje dimenzionalne tačnosti 3D printanja FDM postupkom i mogućnosti kompenzacije odstupanja je veoma popularna tema istraživanja u brojnim radovima [6-10]. Popularnost ove teme se može objasniti tim da je ova tehnologija relativno nova, konstantno se razvija i na tržištu se stalno nude nove mašine i materijali, te se stoga javljaju nove nepoznanice i teme za istraživanje.

U ovom radu je istraživana kompenzacija dimenzionalnih odstupanja cilindričnih mjera u rasponu od 5 do 20 mm, kod izrade dijelova od ONYX materijala s različitim postavkama 3D printanja. U tu svrhu su izrađeni parovi uzoraka (cilindar – cilindrični otvor) kod kojih su mjere cilindričnih geometrija korigovane s ciljem ostvarivanja labavog nalijeganja.

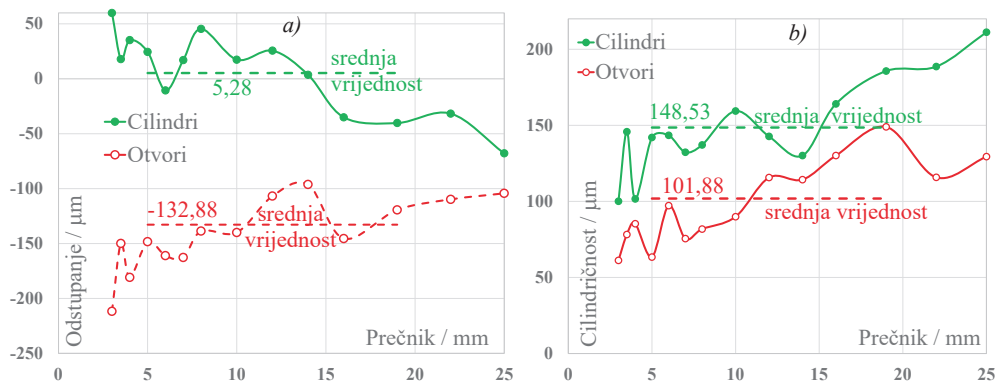
2. DEFINIRANJE I IZRADA UZORAKA

2.1. Definiranje korekcija cilindričnih dimenzija na osnovu prethodnih istraživanja

Istraživanja u ovom radu se zasnivaju na prethodnim istraživanjima [7] u kojima su mjerena dimenzionalna odstupanja od zadanih dimenzija u CAD modelu, na uzorcima s cilindrima i cilindričnom otvorima prečnika od 3 mm do 25 mm (slika 1), izrađenim od ONYX-a [11] na Markforged Mark Two 3D printeru [12], istovjetno materijalu i uređaju koji se istražuju i u ovom radu. Na slici 2. su prikazani osnovni rezultati ovog istraživanja, izmjerena odstupanja na uzorcima od konstruktivnih mjera, tj. mjera CAD modela koje su korištene za 3D printanje i odstupanja od oblika, cilindričnost. Rezultati iz [8] dobiveni su mjerenjima na koordinatnoj mjernoj mašini, CMM (coordinate measuring machine), Zeiss Contura G2 [13].



Slika 1. Uzorci s različitim dimenzijama cilindričnih geometrija iz prethodnih istraživanja [7].



Slika 2. Izmjereni rezultati iz prethodnih istraživanja [7] sa srednjom vrijednošću u rasponu 5-19 mm: a) dimenzionalna odstupanja b) cilindričnost

Na slici 2 prikazane su i vrijednosti srednjih odstupanja i cilindričnosti za cilindrične geometrije na uzorcima u dimenzijama raspona prečnika od 5 do 19 mm. Ovaj raspon odgovara rasponu dimenzija od 5 do 20 mm, koji je odabran za istraživanje u ovom radu. Na osnovu srednjih vrijednosti odstupanja (slika 2.b) usvojene su korekcije za cilindrične mjere. Dilema autora kod planiranja istraživanja u ovom radu bila je da li je potrebno definirati vrijednost korekcije u zavisnosti od dimenzije. Iako se na slici 2.b s rezultatima iz prethodnih istraživanja mogu uočiti da odstupanja variraju u zavisnosti od dimenzije, ova odstupanja nemaju jasnu statističku ili matematičku zavisnost. Zbog toga je pri planiranju eksperimenta u ovom radu usvojena hipoteza da odstupanje ne ovise o dimenzijama, te su za sve dimenzije korištene iste vrijednosti korekcija. Ipak da bi se ova hipoteza i provjerila, uzorci su izrađivani u tri osnovne dimenzije, 5, 10 i 20 mm, koje predstavljaju i geometrijski niz. Ove osnovne dimenzije su pri pripremanju CAD modela korigovane kako bi se osiguralo labavo nalijeganja cilindara i cilindričnih otvora na uzorcima. Za vanjske mjere je usvojena negativna korekcija od 0,15 mm, tj. smanjivanje prečnika cilindara u CAD modelu za tu vrijednost, a za unutrašnje mjere pozitivna korekcija od 0,30 mm, tj. povećanje prečnika cilindričnih otvora u CAD modelima za tu vrijednost. Kod definiranja ovih vrijednosti se koristila srednja vrijednost odstupanja (slika 2.a) i polovina vrijednosti cilindričnosti (slika 2.b), kako bi se uzela u obzir i nepravilnost oblika (kod obrade rezultata mjerenja na CMM-u u prethodnim istraživanjima je korišten algoritam najmanjih kvadrata). Na ove vrijednosti je dodana (ili oduzeta) određena vrijednost, kako bi se osigurao zazor u cilindričnim parovima. Vrijednost dodatka usvojena je na način da se radi praktičnosti dobije zaokružena konačna vrijednost korekcije. Proračun korekcija je prikazan u tabeli 1.

Tabela 1. Definiranje potrebnih korekcija cilindričnih mjera

Geometrija	A: izmjereno srednje odstupanje [μm]	B: $\frac{1}{2}$ cilindričnost [μm]	C: dodatak [μm]	Formula	Korekcija [μm]
Cilindar	5,28	74,27	70,45	$-A - B - C$	-150
Cilindrični otvor	-132,88	81,50	85,62	$-A + B + C$	300

2.2. Planiranje eksperimenta

Za razliku od istraživanja [8], u kojem je razmatrana samo jedna vrijednost popune (37%) dijelova kod 3D printanja, i jedna vrijednost debljine sloja (0,1 mm), u ovom radu istraživane su tri vrijednosti popune (28%, 55% i 100%) i dvije vrijednosti debljine sloja (0,1 mm i 0,2

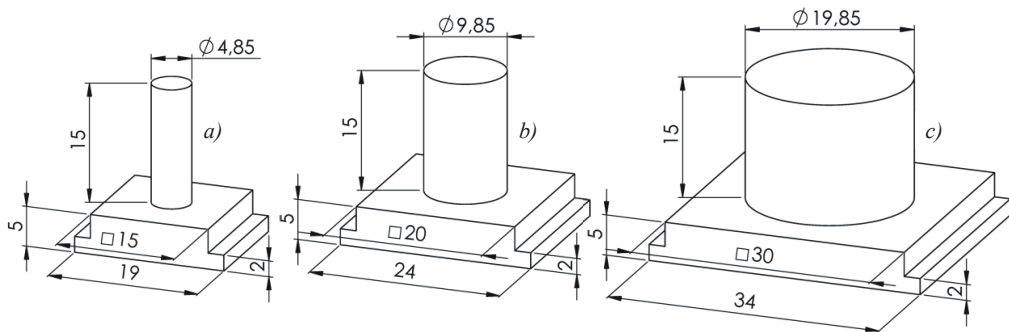
mm). Vrijednosti popune od 28% i 55% su odabrane jer su maksimalna i minimalna vrijednosti za opciju trougaonog šablona popune. U planu eksperimenta je usvojena izrada uzoraka sa svim kombinacijama popune i debljine sloja, uz dodatna dva ponavljanja centralnih vrijednosti popune (55%) za obje vrijednosti debljine sloja, što je značilo ukupno po 10 uzoraka za cilindre i cilindrične otvore (2 · 3 različitih kombinacija popune i debljine sloja, plus 2 · 2 ponavljanja centralnih vrijednosti popune za obje vrijednosti debljine sloja). Iz praktičnih razloga, u svrhu ograničavanja broja uzoraka, za svaku od 6 varijanti kombinacija vrijednosti popune i debljine sloja je proizvoljno odabrana jedna od tri dimenzije (5 mm, 10 mm i 20 mm). Plan eksperimenta, izrađen na prethodno opisani način je prikazan u tabeli 2.

Tabela 2. Plan eksperimenta: Dimenzije i postavke 3D printanja za izradu uzoraka

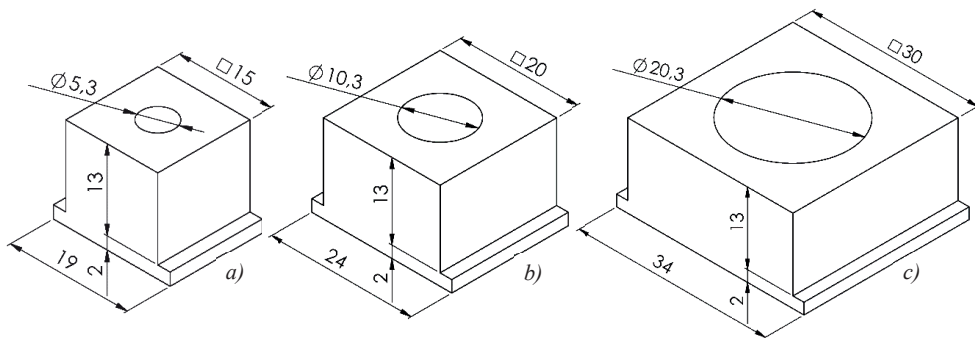
Oznaka uzorka	Debljina sloja	Popuna	Nazivna mjera	Cilindri		Cilindrični otvori	
				Korekcija	Korigovana mjera	Korekcija	Korigovana mjera
1	0,1	28	5	0,15	4,85	0,30	5,30
2a	0,1	55	20	0,15	19,85	0,30	20,30
2b	0,1	55	20	0,15	19,85	0,30	20,30
2c	0,1	55	20	0,15	19,85	0,30	20,30
3	0,1	100	10	0,15	9,85	0,30	10,30
4	0,2	28	10	0,15	9,85	0,30	10,30
5a	0,2	55	5	0,15	4,85	0,30	5,30
5b	0,2	55	5	0,15	4,85	0,30	5,30
5c	0,2	55	5	0,15	4,85	0,30	5,30
6	0,2	100	20	0,15	19,85	0,30	20,30

2.3. CAD modeli uzoraka

Prema planu eksperimenta (tabela 2), pomoću komercijalnog softvera SolidWorks, kreirani su CAD modeli za uzorke koji će se dalje koristiti za 3D printanje. Potrebno je bilo napraviti po tri modela (osnovne dimenzije cilindričnih geometrija 5, 10 i 20 mm) za uzorke sa cilindrima i za uzorke s cilindričnim otvorima, sveukupno 6 modela. Usvojeno je da visine (dubine) cilindričnih geometrija budu 15 mm. Na osnovu ovoga izrađeni su modeli sa cilindrima visine 15 mm, koji su na kvadratnoj bazi visine 5 mm, koja je za približno 10 mm šira od cilindra (slika 3.). Dodatno su na dno modela dodana dva nastavka, tj. baza je proširena za 2 mm, u visini od 2mm, u svrhu omogućivanja pričvršćivanja uzorka kod mjerenja na koordinatnoj mjernoj mašini (CMM). Međutim, zbog tehničkih problema, nije bilo moguće obaviti mjerenje na CMMu, već je obavljeno pomoću pomičnog mjerila, tako da ovi nastavci nisu imali funkciju u ovom istraživanju. Slično su napravljene i modeli za uzorke s cilindričnim otvorima. Ovi modeli su kvadratne osnove, koja je za približno 10 mm šira od cilindričnog otvora, visine 15 mm (slika 4.). Kao i kod modela s cilindrima, na dnu modela dodana su dva nastavka, 2mm x 2 mm.



Slika 3. CAD modeli uzoraka s cilindrima s korigovanim dimenzijama (-0,15 mm) u osnovnim dimenzijama od: a) 5 mm, b) 10 mm i c) 20mm



Slika 4. CAD modeli uzoraka s cilindričnim otvorima s korigovanim dimenzijama (+0,3 mm) u osnovnim dimenzijama od: a) 5 mm, b) 10 mm i c) 20mm

2.4. Izrada uzoraka

Za izradu uzoraka korišten je 3D printer Markforged Mark Two [12], prikazan na slici 5. U svrhu ostvarivanja optimalnih uslova printanja prostor za printanje je zatvoren, a radi sprječavanja degradacije svojstava zbog upijanja vlage, filament se skladišti u hermetički zatvorenoj posudi.



Slika 5. Markforged Mark Two printer s posudom za filament.

Ovaj printer opremljen je jednom glavom za printanje koja ima dvije odvojene mlaznice. Jedna mlaznica namijenjena je za nanošenje osnovnog polimernog materijala, dok druga služi za polaganje kontinuiranih vlakana unutar slojeva polimera. Ovaj način printanja poznat je kao kontinuirano ojačanje vlaknima CFR (Continuous Fibre Reinforcement), čime se dobivaju

dijelovi od kompozitnog materijala ojačanog vlaknima, s značajnim poboljšanjem mehaničkih i drugih svojstva u odnosu na klasično FMD printanje. Iako dodavanje vlakana tokom 3D printanja može imati utjecaja na krajnje dimenzije, u ovom radu taj aspekt nije istraživani i uzorci su izrađivani bez dodatnog ojačanja vlaknima.

Za izradu uzorka korišten je ONYX materijal [11] (tabela 3), kompozitni filament na bazi najlona ojačanog mikro karbonskim vlaknima, idealnom za proizvodnju čvrstih i izdržljivih dijelova s kvalitetnim vanjskim površinama [14].

Tabela 3. Karakteristike Onyx materijala za printanje [14]

Zatezni modul elastičnosti (GPa)	Savojni modul elastičnosti (GPa)	Napon tečenja (MPa)	Zatezna čvrstoća (MPa)	Savojna čvrstoća (MPa)	Izduženje pri lomu (%)	Temperatura toplotne stabilnosti (°C)	Gustina (g/cm ³)
2,4	3,0	40	37	71	25	145	1,2

Na slici 6. su prikazani prethodno opisani uzorci izrađeni za potrebe ovog istraživanja.

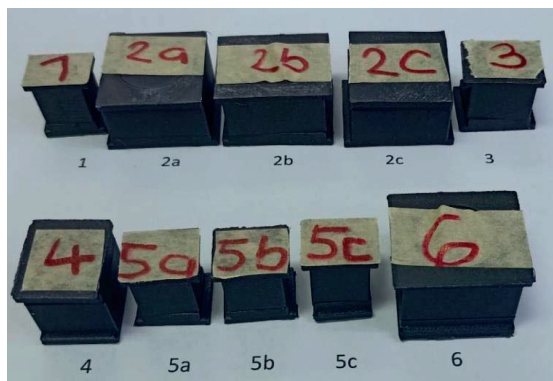


Slika 6. Uzorci izrađeni 3D printanjem

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

3.1. Vizuelna i manuelna kontrola ostvarenih nalijeganja

Vizuelni pregledom svih izrađenih uzoraka konstatirano je da su površine na uzorcima s cilindrima manjih dimenzija, 5 mm, lošijeg kvaliteta površine, što je uobičajeno kod izrade FDM postupkom ovakvih geometrija (slika 6).

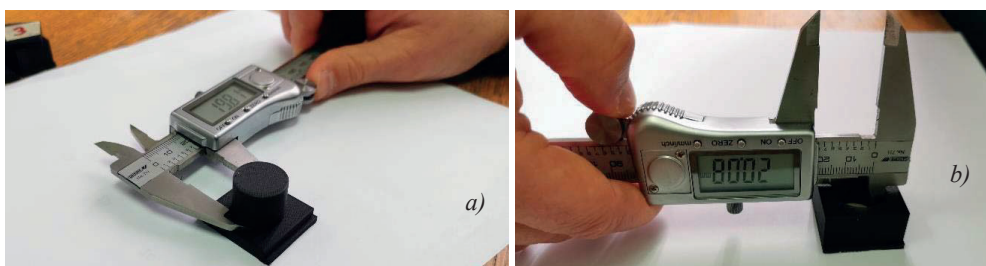


Slika 7. Parovi uzoraka u sklopu.

Daljim pregledom utvrđeno je kako je moguće sklapanje svih parova uzorka bez dodatne obrade površina, slika 7. Uzorci su se jednostavno i lagano uklopili, te je nakon toga bila moguća rotacija cilindara u cilindričnim otvorima uz minimalni otpor. Na različitim parovima uzoraka uočena je određena razlika u otporu među površinama prilikom uklapanja i rotacije, ali ne prevelika. Tako da se nakon manualnog pregleda može zaključiti da je na svim parovima uzoraka ostvareno labavo nalijeganja, sa sličnim vrijednostima zazora.

3.2. Rezultati mjerenja uzoraka

Pri planiranju istraživanja bilo je predviđeno mjerenje uzoraka CMM-om, međutim zbog tehničkih problema (kvara na mašini) to nije bilo moguće. Iz tog razloga uzorci su izmjereni pomoću pomičnog mjerila. Načelno, za nivo odstupanja i tačnosti dimenzija koje se mogu ostvariti 3D printanjem, pomičnim mjerilom može pružiti zadovoljavajuću tačnost i rezoluciju očitavanja. Za mjerenje je korišteno digitalno pomično mjerilo sa rezolucijom očitavanja od 0,01 mm. Kod mjerenja cilindara je pravljeno 6 mjerenja, po 3 na različitim visinama cilindra (slika 8a). Kod mjerenja otvora nije bilo moguće vršiti mjerenja na različitim visinama, zbog same konstrukcije kraka pomičnog mjerila (slika 8b), pa su izvršena 4 mjerenja. Srednja vrijednosti svih mjerenja uzimana je kao konačni rezultat mjerenja. U tabeli 4 prikazani su rezultati mjerenja svih uzoraka.



Slika 8. Mjerenje uzoraka pomičnim mjerilom: a) cilindrični otvori, b) cilindri

Tabela 4. Rezultati mjerenja uzoraka.

Oznaka uzorka	Rezultati za cilindre [mm]			Rezultati za cilindrične otvore [mm]			Ostvareni zazor [mm]
	Izmjereni prečnik	Odstupanje od CAD	Odstupanje od nazivne mjere	Izmjereni prečnik	Odstupanje od CAD	Odstupanja od nazivne mjere	
1	4,86	0,01	-0,14	5,09	-0,21	0,09	0,23
2a	19,84	-0,01	-0,16	20,11	-0,20	0,11	0,26
2b	19,85	0,00	-0,15	20,11	-0,20	0,11	0,26
2c	19,88	0,03	-0,12	20,09	-0,21	0,09	0,20
3	9,80	-0,05	-0,20	10,10	-0,20	0,10	0,30
4	9,81	-0,04	-0,19	10,11	-0,19	0,11	0,30
5a	4,79	-0,06	-0,21	5,11	-0,19	0,11	0,32
5b	4,84	-0,01	-0,16	5,12	-0,18	0,12	0,28
5c	4,80	-0,05	-0,20	5,09	-0,21	0,09	0,29
6	19,77	-0,08	-0,23	20,06	-0,24	0,06	0,29
Srednja vrijednost	/	-0,03	-0,18	/	-0,20	0,10	0,27

Iz rezultata u tabeli 5 ne može se uočiti jasna ovisnost između izmjerenih odstupanja, te dimenzija i parametara 3D printanja. Time je potvrđena hipoteza koja je postavljena pri planiranju ovog istraživanja, da dimenzionalna odstupanja ne ovise o dimenzijama cilindričnih

geometrija. Rezultati istraživanja dodatno su pokazali kako dimenzionalna odstupanje ne ovise ni o parametrima 3D printanja. Ako se posmatraju srednje vrijednosti odstupanja dimenzija uzoraka od konstruktivnih dimenzija iz CAD modela, izmjerena vrijednost od -30 μm za cilindre i 200 μm za cilindrične otvore bliske su vrijednosti iz prethodnog istraživanja [7] koje se koristilo u ovom radu (5,28 μm za cilindre i -132,88 μm za cilindrične otvore). Srednja vrijednost zazora od 0,27 mm ukazuje na to da su kompenzacije koje su primjenjene u ovom radu mogle biti i nešto manje. Međutim, uz očekivano odstupanje od oblika i kvalitet površine kod 3D printanja, ukoliko se želi osigurati labavo nalijeganje bez potrebe za dodatnom obradom dijelova nakon 3D printanja, može se zaključiti da su rezultati istraživanja pokazali kako su predložene kompenzacije cilindričnih mjera (tabela 1) u ovom radu potrebne. Sve prethodne konstatacije odnose se na printanje dijelova od ONYX materijala pomoću Markforged Mark Two printera.

4. ZAKLJUČAK

Dimenzionalna tačnost ostaje jedan od ključnih izazova kod 3D printanja FDM tehnologijom, gdje temperaturna širenja i skupljanja uzrokuju geometrijska odstupanja. Ovo istraživanje uspješno je pokazalo da se kompenzacijom dimenzija u CAD modelima može postići labavo nalijeganje cilindričnih parova uzoraka izrađenih na Markforged 3D printeru koristeći Onyx materijal. Korekcije dimenzija cilindara od -0,15 mm i cilindričnih otvora od 0,30 mm u CAD modelima korištenim za 3D printanje omogućile su jednostavno sklapanje parova uzoraka uz ostvarivanje prosječnog zazora od 0,27 mm. Eksperiment je također pokazao da faktori poput dimenzije cilindrične geometrije, popune i debljine sloja ne utiču značajno na odstupanja, što potvrđuje da jednake kompenzacije mogu biti primjenjive na različite dimenzije i parametre printanja.

Ovaj rad ima praktičnu primjenu kod 3D printanja dijelova od ONYX materijala na MarkForged Mark Two 3D printeru, jer pokazuje kako se pomoću kompenzacija mjera u CAD modelu može postići labavo nalijeganje između cilindričnih površina na dijelovima u sklopu bez potrebe za postprocesnim zahvatima. Međutim, za preciznije vrste nalijeganja s užim tolerancijama, kao što su prelazna i čvrsta nalijeganja, kod planiranja izrade je neophodno planirati naknadnu obradu kako bi se osigurala precizne dimenzije i kvalitet površine. Rezultati i preporuke ovog rada mogli bi se koristiti i kao opšte smjernice kod printanja s drugim materijalima i pomoću drugih FDM 3D printera.

ZAHVALA

Ovo istraživanje je sprovedeno u okviru projekta „Istraživanje dimenzionalne tačnosti različitih tehnologija 3D printanja“ koje je finansirano od strane Federalnog Ministarstva obrazovanja i nauke, Federacija BiH, Bosna i Hercegovina.

5. REFERENCE

- [1] *AMPOWER Report 2024, Additive Manufacturing Report*, Ampower GmbH & Co. KG (<https://additive-manufacturing-report.com>, pristupljeno 30.09.2024).
- [2] Ngoa, T.D., Kashania, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Huib, D. (2018), *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*, Composites Part B: Engineering, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- [3] Savastano, M., Amendola, C., D'Ascenzo, F., & Massaroni, E. (2016), *3-D Printing in the Spare Parts Supply Chain: An Explorative Study in the Automotive Industry*, Digitally Supported Innovation, pp 153–170.

- [4] Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, & Arifin, Z. (2021), *A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters*, Open Engineering, vol. 11, no. 1, 2021, pp. 639-649.
- [5] Bryll, K., Piesowicz, E., Szymański, P., Ślaczka, W., Pijanowski, M. (2018), *Polymer Composite Manufacturing by FDM 3D Printing Technology*, MATEC Web of Conferences 237.
- [6] Kacmarcik, J., Spahic, D., Varda, K., Porca, E., & Zaimovic-Uzunovic, N. (2018), *An investigation of geometrical accuracy of desktop 3D printers using CMM*, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 393, No. 1, p. 012085, IOP Publishing, 2018.
- [7] Kačmarčik, J., Bešliagić, E., Varda, K., Zaimović-Uzunović N. (2022), *Tačnost cilindričnih mjera kod dijelova izrađenih 3D printanjem s ONYX filamentom*, 7. Konferencija „ODRŽAVANJE 2022“, pp. 405-411.
- [8] Kluska, E., Gruda, P., Majca-Nowak, N. (2018), *The accuracy and the printing resolution comparison of different 3d printing technologies*, Transactions on Aerospace Research 3 (252) 2018, pp. 69–86.
- [9] Grgić, I., Karakašić, M., Glavaš, H., Konjatić, P. (2023), *Accuracy of FDM PLA Polymer 3D Printing Technology Based on Tolerance Fields*, Processes 2023, 11(10):2810
- [10] Surabhi, S. N. D., Shah, C. V., Surabhi, M. D. (2024), *Enhancing Dimensional Accuracy in Fused Filament Fabrication: A DOE Approach*, Journal of Material Sciences & Manufacturing Research. SRC/JMSMR-21.
- [11] Markforged, Onyx™ (<https://markforged.com/materials/plastics/onyx>, pristupljeno 04.10.2024).
- [12] Markforged, Mark Two (<https://markforged.com/3d-printers/mark-two>, pristupljeno 04.10.2024).
- [13] ZEISS CONTURA G2, Affordable high-end measuring technology (<https://www.zeiss.com.sg/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/bridge-type-cmms/contura-g2.html>, pristupljeno 04.10.2024).
- [14] Markforged, Material datasheet, Composites (<https://www-objects.markforged.com/craft/materials/CompositesV5.2.pdf>, pristupljeno 04.10.2024.).
- [15] Markforged, Eiger (<https://markforged.com/software>, pristupljeno 04.10.2024).

STATISTICAL METHODS IN MAINTENANCE PLANNING

İzzettin Hakan Karaçizmeli
Harran University
Şanhurfa, Türkiye

ABSTRACT

With the developments in technology, especially in information technology, customer needs have also changed, and it has become difficult to satisfy customers. This situation causes products to diversify and business processes to become more complex. Sustainability of more challenging business processes can be possible by creating the right maintenance strategies. This study will address the redesign of maintenance processes in manufacturing facilities. Statistical methods used in maintenance planning will be summarized and an example will be shared.

Keywords: Maintenance planning, process redesign, strategy, statistical methods

1. INTRODUCTION

Technological developments, the rapid development of information technologies, the widespread use of social media and increased interaction among people have differentiated the needs and desires of the customers. In an environment of intense competition, it has become more difficult to satisfy customers. To be sustainable, businesses must shape their processes according to the expectations of their customers. This situation causes an increase in product variety, diversification and complexity of processes. Producing the right product on time, delivering it quickly, and keeping costs under control is a really challenging task.

The maintenance process is one of the important and binding processes that will help a business achieve its goals. In both production and service businesses, proper maintenance strategies are required to prevent interruption of the work being done. For a right maintenance strategy, it is necessary to understand the processes that must be maintained well. The way to do this is through data management. It is important to design maintenance processes according to the need and scientifically. A data set should be created by recording the needs and what is done. On the basis of this, it is easier to make maintenance plans using statistical techniques.

Although there are researchers who classify maintenance strategies in different ways, the classifications are basically similar. According to the most common classification, maintenance strategies are classified as breakdown maintenance (reactive maintenance), preventive maintenance, and predictive maintenance [1]. If autonomous maintenance is added to this classification, maintenance strategies are divided into 4 classes. It is also possible to divide these main strategies into subgroups. For example, Nezami and Yildirim (2013) divided

predictive maintenance into two groups, reliability-centered maintenance and condition-based maintenance [2]. Patil et al. (2021) divided maintenance into two main groups, planned and unplanned, and then classified maintenance types in other classifications in a different way [3].

The important thing is to choose the maintenance strategy that will provide the best results at the lowest cost to the company in a competitive environment. Business process redesign (BPR) methodologies can be used when making this selection. BPR, which was especially popular among researchers in the 1990s, was summarized by Davenport and Short (1990) as the analysis and redesign of business processes [4].

Statistical approaches are of great importance in preventive and especially predictive maintenance studies. Regular recording of maintenance and fault information provides the formation of a significant database over time. With this database, it becomes possible to perform data mining and use statistical techniques in maintenance plans.

In this study, first, the ways to redesign maintenance processes will be discussed, then the statistical techniques used in maintenance planning will be discussed, and an example will be shared.

2. MAINTENANCE PROCESS REDESIGN

In fact, although the work is similar, different researchers have proposed different BPR methodologies [5-7]. A specific BPR flow for maintenance processes is seen in Figure 1. In businesses where capacity is strained and work is very intense, there is a tendency to skip maintenance. On the other hand, in businesses where work is not very intense, there is a tendency to waive maintenance in order not to increase costs. However, the costs of skipping/not performing maintenance may be higher than allocating time to maintenance or performing maintenance. Therefore, after determining the maintenance needs and goals of the business, it is easier to choose the most appropriate maintenance strategy for the business.

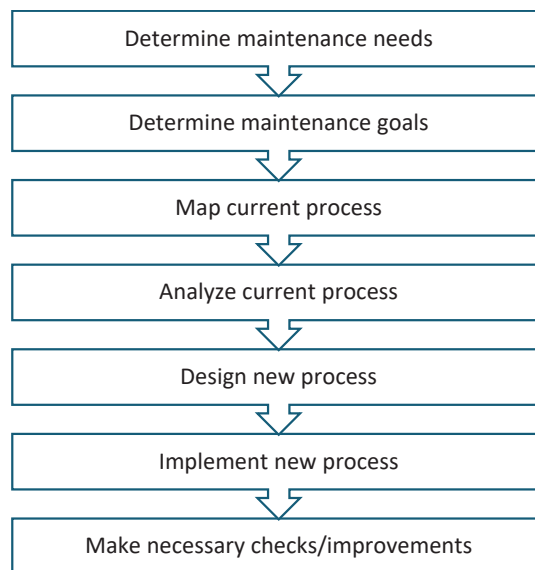


Figure 1. Flow chart of the maintenance process redesign

Breakdown maintenance is already a type of maintenance that should be in every business. Preventive or predictive maintenance can be applied according to the need. Autonomous maintenance is a Kaizen component based on the lean manufacturing philosophy, also called total productive maintenance (TPM) [8]. In this system, each employee is responsible for his/her own machine. Therefore, everyone has a responsibility. Preventive and protective maintenance are among the periodic maintenance that the maintenance team plans to perform. In addition, machine users are also given responsibilities for the trouble-free operation of machines and equipment. Users can directly intervene in certain problems. In this way, the number of stops and the duration of stops are minimized. In fact, a kind of hybrid maintenance strategy is implemented with autonomous maintenance.

3. STATISTICAL METHODS FOR MAINTENANCE PLANNING

It is useful to use statistical techniques when planning maintenance. Therefore, in order to create a database, breakdown and maintenance information must be recorded. After creating a certain archive, it becomes possible to perform analyses using statistical techniques.

Le et al. (2014) used linear regression for predictive maintenance [9]. Shimada and Sakajo (2016) used probability distributions for the occurrence of failures in the scope of predictive maintenance [10]. Saïdy et al. (2020) used statistical control charts to predict failure trends [11]. Da Silva Arantes et al. (2021) tried to determine anomalies through time series [12].

In this study, an analysis for the prediction of breakdown with time series is shared. Figure 2 shows the occurrence of two different breakdowns of a textile washing machine over a six-month period. Since this machine is a bottleneck in the enterprise, planned preventive maintenance is cancelled. For this reason, reactive maintenance is performed. Table 1 shows the descriptive statistics of the breakdown frequencies. So, type 1 breakdown occurs every 13.83 days and type 2 breakdown occurs every 22.38 days.

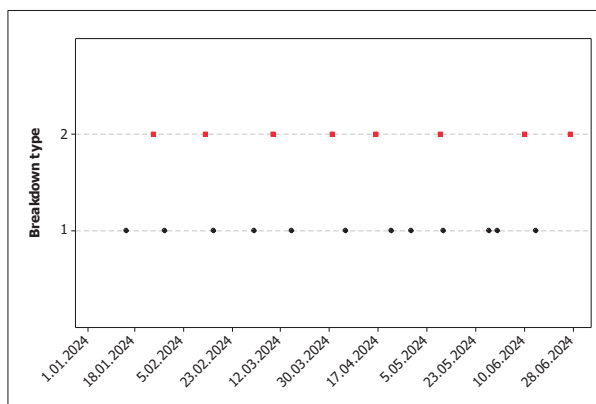


Figure 2. Time series plot by breakdown type

Table 1. Descriptive statistics for frequencies of breakdowns

Breakdown	N	Mean	SD	Min	Max
1	12	13.83	4.73	3	20
2	8	22.38	4.96	16	31

4. CONCLUSION

As seen in the shared study, if this business plans predictive maintenance once every 13 days for the first breakdown and once every 22 days for the second breakdown by looking at the means of breakdown frequencies, it is possible to reduce breakdowns by half. Here, managers can make a decision by performing a cost-benefit analysis. Waiting for a breakdown to perform any maintenance is a risk taken to reduce the number of maintenances. In this case, it is necessary to compare the capacity loss due to breakdowns that occur with the capacity loss due to predictive maintenance and also the spare part or scrap costs, if any.

Each business can determine a maintenance strategy according to its own conditions. Using statistics when planning maintenance will be both a scientific and a useful approach. Reliability analysis can also be done based on descriptive statistics.

REFERENCES

- [1] Altın, B., Çınar, M. A., Alboyacı, B. (2022), *Investigation of Partial Discharge Monitoring Techniques for Maintenance Management in Medium Voltage Power Systems*, Politeknik Dergisi, 25(4), pp. 1671-1679.
- [2] Nezami, F. G., Yildirim, M. B. (2013), *A Sustainability Approach for Selecting Maintenance Strategy*, International Journal of Sustainable Engineering, 6(4), pp. 332–343.
- [3] Patil, A., Soni, G., Prakash, A., Karwasra, K. (2022), *Maintenance Strategy Selection: A Comprehensive Review of Current Paradigms and Solution Approaches*, International Journal of Quality & Reliability Management, 39(3), pp. 675-703.
- [4] Davenport, T. H., Short, J. E. (1990), *The New Industrial Engineering: Information Technology and Business Process Redesign*, Sloan Management Review, 31, pp. 11-27.
- [5] Harrison, D. B., Pratt, M. D. (1993), *A Methodology for Reengineering Businesses*, Planning Review, 21(2), pp. 6-11.
- [6] Manganelli, R. L., Klein, M. M. (1994), *A Framework for Reengineering*, Management Review, 83, pp. 10+.
- [7] Underdown, D. R. (1997), *An Enterprise Transformation Methodology*, The University of Texas at Arlington, pp. 83-98.
- [8] Imai M. (2012), *Gemba Kaizen*, McGraw-Hill Companies.
- [9] Le, T., Luo, M., Zhou, J., Chan, H. L. (2014), *Predictive Maintenance Decision Using Statistical Linear Regression and Kernel Methods*, Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), Barcelona, Spain, pp. 1-6.
- [10] Shimada, J., Sakajo, S. (2016), *A Statistical Approach to Reduce Failure Facilities Based on Predictive Maintenance*, 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Vancouver, BC, Canada, pp. 5156-5160.
- [11] Saidu, C., Xia, K., Kircaliali, A., Harik, R., Bayoumi, A. (2020), *The Application of Statistical Quality Control Methods in Predictive Maintenance 4.0: An Unconventional Use of Statistical Process Control (SPC) Charts in Health Monitoring and Predictive Analytics*. In: Ball, A., Gelman, L., Rao, B. (eds) *Advances in Asset Management and Condition Monitoring*. Smart Innovation, Systems and Technologies, 166, Springer, Cham, pp. 1051-1061.
- [12] Da Silva Arantes, J., Da Silva Arantes, M., Fröhlich, H. B., Siret, L., Bonnard, R. (2021), *A Novel Unsupervised Method for Anomaly Detection in Time Series Based on Statistical Features for Industrial Predictive Maintenance*, Int J Data Sci Anal, 12, pp. 383–404.

HOME APPLIANCE REPAIR SERVICE SCHEDULING: A SAMPLE APPLICATION

İzzettin Hakan Karaçizmeli
Harran University
Şanlıurfa, Türkiye

ABSTRACT

Time is a very important and non-renewable resource. Due to the diversification and increase in people's needs and the intensity of business life, time management is becoming more important. On the other hand, doing the work with less cost and without harming the environment is an important motivation. In this study, an application will be presented on scheduling home appliances repair service. The aim is to meet the needs of customers with less cost and less CO₂ emissions. The service scheduling problem is solved both with a mathematical model and heuristic. The results obtained are analysed.

Keywords: Scheduling, travelling repairman problem, CO₂ emission

1. INTRODUCTION

The rapid development of technology and the increase in the level of prosperity are also changing consumption habits. In this direction, consumption in the field of consumer electronics is also increasing. A significant part of the products in this field are home appliances. A significant part of home appliances consists of products such as refrigerators, washing machines, dishwashers, ovens, and air conditioners, also called white goods.

The after-sales service organised by the manufacturers is very important for these products. Consumers care about how quickly the problems they encounter are resolved. For example, food in a refrigerator that takes a long time to repair may spoil. A non-working air conditioner may disrupt thermal comfort. Such situations also negatively affect people's brand loyalty. Therefore, a wide service network and fast service are necessary to ensure customer satisfaction.

The mentioned tools are usually repaired or maintained on site. If it is a process that cannot be done on site, it can be transported to the centre by the service representative. An authorised service usually has more than one vehicle and service representative. Daily work plans are made according to the requests received in advance. In this direction, customer addresses are visited. Making a correct routing allows the work to be done faster. In fact, this problem is a vehicle routing problem (VRP), where more than one vehicle goes to more than one customer and eventually returns to the centre.

The problem is similar to the multiple travelling salesman problem (mTSP). There are many studies on mTSP. In some of these studies, mathematical models were established and exact solution methods were used, while in some heuristic or metaheuristic methods were used. Bektas (2006) examined the problem, models, and solution methods and shared the mathematical model in which a two-index decision variable was used [1]. With the mathematical model proposed by Kara and Bektas (2006), it was possible to balance the number of stops that travelling salesmen will visit. In these models, it is assumed that travellers will return to the central depot [2]. There are also open-ended versions of this problem. For example, Kartal (2023) solved the mTSP problem in such a way that there is no obligation to return to the centre [3].

In some studies, the departure and departure times of the customer are also included in the calculation taking into account the time window. Kallehauge et al. (2005) developed a mathematical model with time windows for VRP in general [4]. Gocken et al. (2018) developed a solution proposal for the time-windowed version of the TSP problem [5]. Atasagun and Karaoglan (2019) proposed a mathematical model for a special case of VRP with time windows [6].

Heuristic and metaheuristic solution approaches have also been developed. Nuriyeva and Kizilates (2017) solved mTSP with a heuristic method that modified the shortest path algorithm [7]. Gocken et al. (2018) used the genetic algorithm [5]. Sun et al. (2021) solved mTSP with ant colony optimisation [8].

In this study, the problem of scheduling home appliance services, which is an example of mTSP, was solved with both a mathematical model and a heuristic method and the results were compared. This problem can be called the multi-travelling repairman problem (mTRP).

2. MATERIAL&METHODS

The problem considered is the routing problem of vehicles of a home appliance repair service that will go to addresses. This mTRP is similar to mTSP. The service has a centre. Previously received requests are served at the customer addresses by more than one vehicle and a service representative. Each service representative must return to the centre after finishing his work.

It is necessary to go to all planned customers. In addition, in order to avoid problems among employees, the number of customers served by each service representative, that is, the amount of work, should be close to each other. The aim is to quickly fix problems in customers' products. When doing this job, it is aimed at reducing fuel costs by covering the least distance and at the same time reducing CO₂ emissions.

In the implementation of the problem, a 10-node transportation network was used. One of these nodes is the service centre, and the other 9 are the customers to be visited. These customers will be visited with 3 service vehicles and teams. The repair and maintenance work to be done on the customers is assumed to be standard. The service vehicles and traffic conditions on the roads are also assumed to be the same.

2.1. Mathematical model

The mathematical model proposed by [2] was preferred because it is suitable for the problem structure. The decision variable y_{ij} takes the value of "1" if there is a trip between i and j and "0" otherwise. d_{ij} indicates the distance between customers i and j . Time can also be used

instead of distance. M indicates the maximum number of customers to whom a service vehicle can go to; N indicates the minimum number of customers to whom it must go to. The objective function is shown in (1) and is used to minimise the total distance. The number of vehicles to be scheduled is shown by v . When the constraints are considered, (2-3) shows the number of vehicles that will leave and return from the service centre. (4-5) guarantees that one vehicle will go to a customer and one vehicle will leave. (6-8) ensures that the service vehicles will stop by maximum M and minimum N customers. These constraints also help balance the workload of service teams. (9) prevents the formation of subtours in the schedule.

$$\sum_i \sum_j d_{ij} y_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{j=2}^m y_{1j} = v \quad (2)$$

$$\sum_{i=2}^m y_{i1} = v \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m y_{ij} = 1, \quad j = 2, \dots, m \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m y_{ij} = 1, \quad i = 2, \dots, m \quad (5)$$

$$p_i + (M - 2) \times y_{1i} - y_{i1} \leq M - 1, \quad i = 2, \dots, m \quad (6)$$

$$p_i + y_{1i} + (2 - N) \times y_{i1} \geq 2, \quad i = 2, \dots, m \quad (7)$$

$$y_{1i} + y_{i1} \leq 1, \quad i = 2, \dots, m \quad (8)$$

$$p_i - p_j + M \times y_{ij} + (M - 2) \times y_{ji} \leq M - 1, \quad 2 \leq i \neq j \leq m \quad (9)$$

2.2. Heuristic method

In this study, the heuristic method based on the shortest path algorithm developed by [7] was used. In this method, a centre node is first selected. The service centre is determined as the central node in this application. Then, the farthest node to the centre node is selected. In the next step, the shortest path from the centre node to the determined farthest node is found, then the second shortest path to the same node is determined. One of these paths represents the outbound route, the other the return route. Thus, the route of the first vehicle is determined. The same operations are repeated as many times as the number of service vehicles.

3. RESULTS&DISCUSSION

A sample application was made for the scheduling problem of the home appliance repair service. The scheduling process was performed for a total of 10 nodes, one of which is the service centre, and the paths were determined. Since three vehicles will be used for this study, three paths were determined. The distances between the nodes are shown in Table 1.

Table 1. Distance matrix

Nodes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	750	1,600	750	3,200	3,400	3,400	4,100	3,500	4,900
2	750	0	1,700	1,800	4,400	4,700	5,300	5,500	4,700	5,000
3	1,600	1,700	0	2,000	5,300	4,700	4,600	5,600	4,900	3,500
4	750	1,800	2,000	0	4,000	3,300	3,300	4,600	3,900	5,300
5	3,200	4,400	5,300	4,000	0	1,800	2,400	2,900	2,500	5,500
6	3,400	4,700	4,700	3,300	1,800	0	3,400	4,300	4,700	6,600
7	3,400	5,300	4,600	3,300	2,400	3,400	0	3,000	190	3,700
8	4,100	5,500	5,600	4,600	2,900	4,300	3,000	0	2,700	5,500
9	3,500	4,700	4,900	3,900	2,500	4,700	190	2,700	0	3,600
10	4,900	5,000	3,500	5,300	5,500	6,600	3,700	5,500	3,600	0

First, the mathematical model of the mTRP, which is an example of mixed-integer programming, was solved by coding it in the GAMS software. According to the result obtained, three paths were formed for three service vehicles. The total path is 30,140 m. The paths obtained with this solution are shown with red arrows in Figure 1.

Secondly, the mTRP was solved with the heuristic method. The total distance travelled on the three paths formed for the three service vehicles with the heuristic method is 33,190 m. The paths formed with the heuristic method are shown with black arrows in Figure 1.

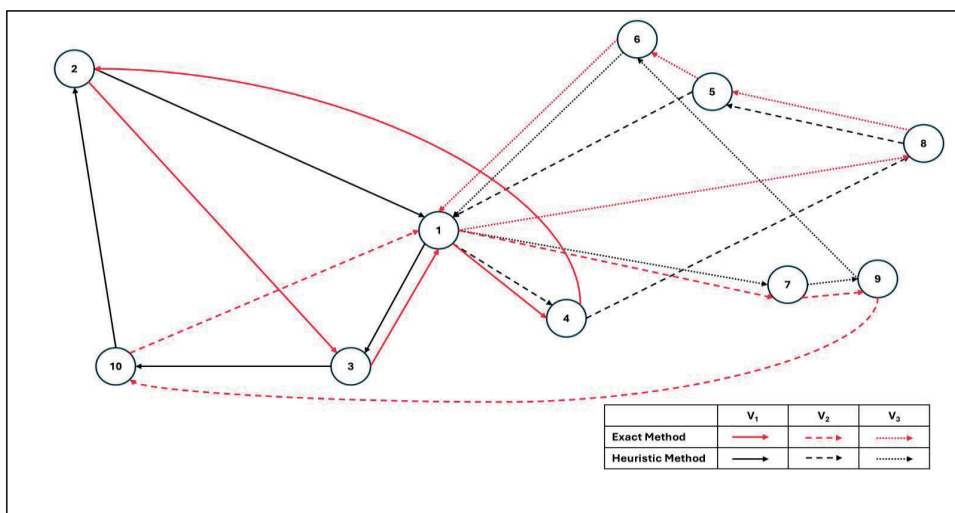


Figure 1. Paths formed according to the solution method

4. CONCLUSION

With the increase in population, technology, and the level of prosperity in society, the use of home appliances is also increasing day by day. This increase brings with it the need for repair services. The operations to be carried out by the services are carried out mostly at the address where the appliance is used. Therefore, good planning is necessary to meet customer demands. However, it is important for employee satisfaction to distribute the workload in the planned projects. Another important result is the reduction in CO₂ emissions by vehicles that travel less.

In this study, a service scheduling problem called mTRP is considered which is an example of the mTSP problem. As an example, a scheduling problem with 10 nodes and 3 service vehicles including a service centre is solved. The problem is solved both with the exact solution method MIP and with a heuristic method found in the literature. The MIP solution gives 9.2% better results than the heuristic solution.

It may be difficult to find solutions to large-scale problems with mathematical models. Therefore, the performance of the heuristic method can be increased. In subsequent studies, time information can be added to the problem according to the type of work in the service. In addition, road time loss information can be added depending on traffic density.

REFERENCES

- [1] Bektas, T. (2006), *The Multiple Traveling Salesman Problem: An Overview of Formulations and Solution Procedures*, Omega, 34(3), pp. 209-219.

- [2] Kara, I., Bektas, T. (2006), *Integer Linear Programming Formulations of Multiple Salesman Problems and Its Variations*, European Journal of Operational Research, 174(3), pp. 1449-1458.
- [3] Kartal, Z. (2023), *Open Multiple Travelling Salesman Problem and A Solution Proposal*, Journal of Engineering Sciences and Design, 11(4), pp. 1517-1528.
- [4] Kallehauge, B., Larsen, J., Madsen, O. B., Solomon, M. M. (2005), *Vehicle Routing Problem with Time Windows*, Springer US.
- [5] Göçken, T., Yaktubay, M., Kılıç, F. (2018), *A Multi Objective Genetic Algorithm Approach for The Solution of Vehicle Routing Problem with Time Windows*, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 6(4), pp. 774-786.
- [6] Atasagun, G. C., Karaođlan, İ. (2019), *A Mathematical Model for the Time Dependent Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-Up and Delivery*, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34(4), pp. 1743-1755.
- [7] Nuriyeva, F., Kizilates, G. (2017), *A New Heuristic Algorithm for Multiple Traveling Salesman Problem*, TWMS Journal of Applied and Engineering Mathematics, 7(1), pp. 101-109.
- [8] Sun, B., Wang, C., Yang, Q., Liu, W., Yu, W. (2021), *Ant Colony Optimization for Balanced Multiple Traveling Salesmen Problem*, 2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), Las Vegas, NV, USA, pp. 476-481.

A HYBRID SOLUTION APPROACH FOR THE MAINTENANCE STRATEGY SELECTION PROBLEM

Serkan Kaya,
Harran University, Engineering Faculty, Department of Industrial Engineering
Osmanbey Campus, Şanlıurfa, Turkey

ABSTRACT

In today's intensely competitive environment, businesses need to reduce their costs while increasing their productivity in order to survive. One of the important factors affecting the efficiency of a business is the necessity to follow a correct and effective maintenance strategy. It is an important problem for decision makers to choose the right strategy among a large number of criteria and alternatives. This decision making process becomes a multi-criteria decision making problem due to its structure. In this study, a hybrid method consisting of a combination of MEREC and MABAC methods is presented for the problem of selecting the optimal maintenance strategy in a business. Six maintenance strategies are evaluated according to five criteria determined by expert opinion and literature. In the solution of the problem, the criteria weights are obtained by MEREC method and the ranking of the alternatives is performed by MABAC method. The results obtained enabled the business to choose a better maintenance strategy.

Keywords: Maintenance Strategy Selection, Multi Criteria Decision Making, MEREC, MABAC.

1. INTRODUCTION

In the global competitive environment, efforts to reduce the costs of businesses have become a necessity. One of the important strategies for businesses to reduce their costs is maintenance strategy [1]. Costs can be reduced by following an effective maintenance strategy in maintenance and repair activities, which constitute an important expense among total enterprise costs. In a study conducted by the European Union, it was determined that one third of all maintenance costs are caused by unnecessary and inadequate maintenance activities [1-2]. The appropriate maintenance strategy to be implemented in enterprises not only reduces the costs of the enterprise, but also increases product quality standards. It reduces the failure rate of machine equipment and ensures more efficient operation of the equipment. It reduces the accident rate as well as production losses in the enterprise.

In order to achieve the best performance in maintenance strategy, maintenance cost, safety, feasibility, reliability and other factors should be considered together [3]. Some of these factors are cost-based and some are benefit-based. Selecting the most appropriate maintenance strategy by optimising these factors simultaneously is a difficult problem [4]. Multi-criteria decision making (MCDM) techniques are frequently used in solving problems where multiple alternatives are evaluated according to multiple criteria. Since the maintenance strategy selection problem involves more than one criterion and alternative, it is considered as an MCDM problem [2,5].

Although appropriate maintenance strategy selection has an important place in production systems, studies in this field have been very limited [2]. Researchers have recently started to focus on the selection of appropriate maintenance strategy in textile, energy, automotive, mining and other fields [1]. Pariazar et al. evaluated Corrective Maintenance (CM), Periodic/Time-Based Maintenance (TBM), Condition-Based Maintenance (CBM), Predictive Maintenance (PdM) and Opportunistic Maintenance (OM) alternatives in a manufacturing enterprise by using Analytic Hierarchy Process (AHP) method with the criteria of added value, cost, safety and feasibility [6]. Shyjith et al. examined CM, Reliability Centred Maintenance (RCM), CBM and PdM alternatives under the main criteria of environmental conditions, equipment failures, training and feasibility in a textile mill. They used AHP for criterion weights and Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS) method for ranking the alternatives [7]. Emovon et al. used Delphi-AHP method to select the best CM, TBM and CBM maintenance alternatives under the main criteria of cost, safety, added value and feasibility [8]. Panchal et al. evaluated CM, TBM, CBM, PdM and RCM alternatives in a fertiliser plant with a hybrid method obtained from the combination of fuzzy AHP and fuzzy Combinative Distance Based Assessment (CODAS) methods [9]. Akgönül et al. used Fuzzy Analytic Network Process (ANP), TOPSIS and Elimination Et Choix Traduisant la Réalité (ELECTRE) methods in their maintenance strategy selection study for a medical organisation. As a result of all three methods, they determined that the best maintenance strategy is revision maintenance [10].

Syan and Ramsobag reviewed the studies on maintenance strategy selection. According to the authors, the most commonly used criteria are listed as cost, validity, reliability, safety, added value, risk, spare parts, benefit, environmental impacts and feasibility. Maintenance strategies were found as Preventive Maintenance (PM), CM, CBM, PdM, OM, RCM and Total Productive Maintenance (TPM). It is also reported that researchers generally prefer AHP, ANP, TOPSIS, Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH), Complex Proportional Assessment (COPRAS) and *Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje* (VIKOR) methods in solving these problems [11].

This study addresses the problem of selecting the optimal maintenance strategy for an enterprise. As a result of the evaluations made by experts in the field and the literature, 5 criteria were identified: cost, safety, reliability, feasibility and added value. The most suitable maintenance strategy for the enterprise was selected from 6 alternatives, namely CM, TBM, OM, CBM, PdM and RCM. A hybrid method is proposed to solve the problem, which is a combination of Method Based on the Removal Effects of Criteria (MEREK) and Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison (MABAC) methods. The weights of the criteria are determined by the MEREK method and the ranking of the alternatives is performed by the MABAC method. In the second part of the study, the material and method section is given. Criteria, alternatives, MEREK and MABAC methods are defined in this section. In the third section, the problem is solved with the proposed algorithm and the results are presented. The last section presents the results obtained and the future study plan.

2. MATERIAL AND METHODS

Maintenance strategy selection is used in many industries, including paper, mining, chemicals, transportation, automotive, textile, aerospace, construction and medical equipment, particularly in manufacturing and energy. The most commonly considered alternatives in maintenance strategy selection studies are TBM, CM, CBM, PdM, TPM, OM, RCM, PM, Prescriptive Maintenance (RM). In the literature, AHP, TOPSIS, Simple Additive Weighting (SAW), VIKOR, ELECTRE, Decision Making Trial and Evaluation Laboratory

(DEMATEL), CODAS and Preference Ranking Organisation Method (PROMETHEE) methods are mostly used to solve these problems [11,12].

The most commonly used CM in the literature is the maintenance activity performed in the event of a machine breakdown. CM is used in systems where the failure of a machine does not interrupt production. It is preferred when the profit margin is high. TBM is the type of maintenance performed to increase the availability time of the equipment before the failure of the machine and equipment. It is carried out at certain intervals to reduce unexpected breakdowns according to the reliability characteristics of the TBM machine, which is often used in industry. OM is the maintenance of other machines and equipment in the system while one machine is being maintained. This type of maintenance can cause the business to stop in the specified time period. Unlike the CM strategy, the maintenance time of other machines and equipment whose maintenance time is approaching is added to the OM maintenance time. In the CBM strategy, the maintenance decision is made according to a series of measurements and collected data. In this case, unnecessary maintenance is avoided and the machine is ensured to operate until just before failure. The CBM strategy is the most appropriate strategy for complex, costly and long-term machinery. PdM is a maintenance strategy that can predict the time of equipment failure by analysing the data obtained from the machine equipment. The difference with CBM is that the analyses performed predict when the machine will exceed the parameter values. In this way, the machine is maintained at a time when the equipment needs it. The PdM strategy attempts to determine when maintenance should be performed. RCM is a systematic approach used to optimise TBM and PdM maintenance programmes to minimise maintenance costs and increase machine efficiency. The RCM strategy is a combination of CM, TBM, CBM and PdM strategies [12].

2.1. MEREC Method

Although it is a new method, MEREC is a method that provides an objective weighting of criteria [13-15]. The MEREC method is based on the concept of causality. In the MEREC Method, weights are calculated by looking at the lifting effects of each criterion on the overall performance of the alternatives. The MEREC method first uses a logarithmic measure with equal weights to determine the performance of alternatives. An absolute deviation measure is used to determine the effect of removing each criterion [16]. The first step in the MEREC method is to generate a standard decision matrix. Then, a normalised decision matrix is obtained according to the benefit and cost criteria. In the third step, the total performance value of each alternative is calculated. In the fourth step, the performance values of the alternatives are calculated as a result of removing each criterion. In the fifth step, the sum of the absolute deviations is calculated and in the last step, the weight values of the criteria are calculated.

2.2. MABAC Method

MABAC is a method introduced in the literature by Pamucar and Cirovic in 2015. The MABAC method is based on the definition of the distance of each alternative to the boundary approximation region of the criterion function. Recently, it has been used to solve many MCDM problems such as sustainable supplier selection [18], supplier evaluation [19], unmanned aircraft model selection [20], electric vehicle selection [21] and data product selection [22]. MABAC can operate with different types of criteria and alternatives. It contributes to a more objective evaluation of alternatives and criteria. The solution steps of the MABAC method begin with the construction of the decision matrix. A normalisation process is applied to the standard decision matrix, taking into account the criteria for benefits and costs. The normalised decision matrix is multiplied by weight values and a weighted normalised decision matrix is obtained. In the fourth step, the boundary proximity area matrix

is calculated and in the fifth step, the distance values to the boundary proximity area matrix are calculated. In the last step, the alternatives are ranked.

2.3. Determination of Criteria

In solving the maintenance strategy selection problem, five criteria, namely safety, cost, reliability, feasibility and added value, were determined by considering the studies in the literature and the opinions of experts in the field. The safety criterion expresses the conditions for avoiding accidents, errors and undesirable situations. It also refers to the minimisation of safety hazards. The safety criterion includes personal, enterprise and environmental safety. Cost refers to all expenses that must be incurred to implement the maintenance strategy. Every maintenance strategy consists of different costs. Maintenance costs consist of hardware, software, personnel training and maintenance costs. Reliability is the ability of a machine or equipment to perform its expected functions within certain limits. In other words, it can be expressed as the ability to perform expected tasks without failure. Feasibility is defined as the acceptance of the maintenance strategy by personnel and management, the ease of maintenance and repair activities, and its suitability to the organization in terms of financial resources. The maintenance strategy, which cannot cover the costs of the enterprise, is not suitable for the enterprise. The criterion of added value expresses the benefits of maintenance activities for the enterprise. Low production losses, low spare parts inventory, and the ability to quickly detect failures will add value to the enterprise.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the problem of selecting the most appropriate maintenance strategy in a flow shop production company is considered. In order to determine the criteria and alternatives for the problem, the opinions of experts and studies in the literature were taken into account. The experts in this area consisted of three managers, who had been working in the enterprise for at least five years. Five criteria were determined to be used in the solution of the problem: safety, cost, reliability, feasibility and added value. In the study conducted by the experts, CM, TBM, OM, PdM and CBM were selected as the alternatives for the selection of the maintenance strategy, taking into account the general situation of the enterprise and the studies conducted in the literature. The decision making process carried out in 5 stages. The decision making steps are as follows:

Step 1: Selection of criteria. It has been determined which criteria will be used in finding the maintenance strategy. For this, 5 criteria are determined by taking a comprehensive literature review and expert opinions. These criteria are: safety, cost, reliability, feasibility and added value.

Step 2: Selection of alternatives.

CM, TBM, OM, CBM, PdM and RCM were selected as the alternatives for the selection of the maintenance strategy. For each of these alternatives, costs and technical specifications have been determined according to the selected criteria in Step 1.

Step 3: Weighting the criteria with MEREC method. The criteria belonging to the alternatives determined in Step 2 are weighted in order of importance using MEREC method.

Step 4: Application of MABAC method.

At this stage, the alternatives determined in Step 2, according to criteria weights determined in Step 3 and are ranked with MABAC method.

Step 5: Ranking. The alternatives are ranked with the proposed hybrid method.

In order to determine the criteria weights with the MEREC Method, a decision matrix was created in the first step. Then, the decision matrix is normalised using a simple linear normalisation. In the third step, the overall performance of the alternatives is calculated. For this purpose, a logarithmic measure with equal criteria weights was applied. In the fourth

step, the performance of the alternatives was calculated by removing each criterion. In the fifth step, the sum of the absolute deviations and in the last step, the weight values of the criteria were calculated. Criteria weights obtained by MEREC method are given in Table 1. According to these results, the criterion with the highest importance value was safety with 0.2270. Criteria weights were close to each other. Then, according to their importance values, the criteria were ranked as Feasibility with 0.2070, Reliability with 0.2021, Cost with 0.1978 and Added value with 0.1661.

Table 1. Criterion Weights

	Feasibility	Added Value	Cost	Safety	Reliability
MEREC	0.2070	0.1661	0.1978	0.2270	0.2021

In this study, a hybrid method obtained by combining MEREC and MABAC methods is proposed to solve the maintenance strategy selection problem. According to the criteria weights obtained by the MEREC method, 6 alternative maintenance strategies are ranked by the MABAC method. In order to solve the problem with MABAC, a standard decision matrix is first constructed. In the second step, a normalisation process is applied to the standard decision matrix by considering the benefit and cost criteria. In the third step, the normalised decision matrix is multiplied by weight values and a weighted normalised decision matrix is obtained. In the fourth step, distance values are added to the boundary proximity area matrix and in the fifth step, distance values are added to the boundary proximity area matrix. In the last step of the solution, total distance values (S_i) and the ranking values of the alternatives were found.

Table 2 shows the distance matrix, the total distance values (S_i) and rankings obtained by the MABAC method. In this case, OM strategy has the highest value with 0.6330 points and ranked first in the ranking. CM strategy ranked second with 0.5286 points, TBM ranked third with 0.1639 points, CBM ranked fourth with 0.0232 points, RCM ranked fifth with -0.2731 points and PdM ranked last with -0.4833 points.

Table 2. Distance Matrix to the Boundary Proximity Area, Total Distance (S_i) and Rankings

	Feasibility	Added Value	Cost	Safety	Reliability	S_i	Rankings
CM	-0.0267	0.0984	0.2870	-0.1035	0.2734	0.5286	2
TBM	0.1112	0.0652	-0.0426	0.0262	0.0039	0.1639	3
OM	0.1112	0.0984	0.2211	-0.0711	0.2734	0.6330	1
CBM	-0.0957	0.0652	-0.1085	0.0910	0.0712	0.0232	4
PdM	-0.2337	-0.0677	-0.1745	0.1235	-0.1309	-0.4833	6
RCM	0.0422	-0.1341	0.0233	-0.0062	-0.1983	-0.2731	5

4. CONCLUSIONS

Maintenance is a set of activities that must be carried out in order to keep machinery and equipment operating at the desired performance throughout the production of an enterprise. Maintenance activities are an important technical parameter that ensures the uninterrupted operation of production systems. The maintenance strategy selection problem, which is of strategic importance to enterprises, involves both quantitative and qualitative criteria [2]. There are many studies on maintenance strategy selection in the literature. However, the

optimal maintenance strategy selection problem is still a difficult problem to solve due to the large number of alternatives and criteria and their uncertainty [12].

In this study, the problem of selecting a maintenance strategy for an enterprise is considered. As a result of expert interviews, 6 alternative maintenance strategies were evaluated according to 5 criteria. The 6 alternative maintenance strategies, namely CM, TBM, OM, CBM, PdM and RCM were evaluated according to 5 criteria: Feasibility, Added Value, Cost, Safety and Reliability. A hybrid model was developed by combining MEREC and MABAC methods to solve the problem. The MEREC method was preferred for weighting the criteria. For ranking the alternatives, a hybrid method was proposed by combining MABAC method with MEREC method. According to the data obtained as a result of the study, the weights of the criteria were close to each other. The criteria were ranked according to their importance as safety, feasibility, reliability, cost and added value. It was found that the most suitable maintenance strategy for the enterprise is OM strategy in the first place, and CM strategy in the second place. Each company has its own criteria and alternatives for the maintenance strategy. In this situation, it can be seen that each enterprise has its own specific maintenance strategy in solving these problems. Due to the fact that the enterprises have different criteria, the maintenance strategy that is suitable for one enterprise is not suitable for the other enterprise.

In the next study, we plan to solve this real-world problem in different sectors. After solving this problem using the new hybrid methods that we will develop, we also plan to perform consensus solutions. In addition, we plan to new develop hybrid solution methods using the other MCDM methods used in the literature.

6. REFERENCES

- [1] Shafiee, M., (2015), *Maintenance strategy selection problem: An MCDM overview*, Journal of Quality in Maintenance Engineering, 21(4), 378–402.
- [2] Wang, L., Chu, J. ve Wu, J., (2007), *Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process*, International Journal of Production Economics, 107(1), 151–163.
- [3] Ding, S. H. and Kamaruddin, S., (2014), *Maintenance policy optimization—literature review and directions*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76(5–8), 1263–1283.
- [4] Cayir Ervural, B., Evren, R. ve Delen, D., (2018), *A multi-objective decision-making approach for sustainable energy investment planning*, Renewable Energy, 126, 387–402.
- [5] Bevilacqua, M. and Braglia, M., (2000), *The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection*, Reliability Engineering & System Safety, 70(1), 71–83.
- [6] Pariazar, M., Shahrabi, J., Zaeri, M. S. ve Parhizi, S., (2008), *A combined approach for maintenance strategy selection*, Journal of Applied Sciences.
- [7] Shyjith, K., Ilankumaran, M. ve Kumanan, S., (2008), *Multi-criteria decision-making approach to evaluate optimum maintenance strategy in textile industry*, Journal of Quality in Maintenance Engineering, 14(4), 375–386.
- [8] Emovon, I., Norman, R. A. ve Murphy, A. J., (2018), *Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems*, Journal of Intelligent Manufacturing, 29(3), 519–531.
- [9] Panchal, D., Chatterjee, P., Shukla, R. K., Choudhury, T. ve Tamosaitiene, J., (2017), *Integrated Fuzzy AHP-CODAS Framework for Maintenance Decision In Urea Fertilizer Industry*, Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research, 51(3), 179–196.
- [10] Akgönül, R., Özcan, E., & Eren, T. (2021), *Medikal İşletmesi İçin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Bakım Stratejisi Seçimi*, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 13(2), 448–461. <https://doi.org/10.29137/umagd.865866>

- [11] Syan, C. S., & Ramsoobag, G. (2019), *Maintenance applications of multi-criteria optimization: A review*, Reliability Engineering & System Safety, 190, 106520. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106520>
- [12] Gedikli, T., (2019), *Pisagor Bulanık Topsis Ve Bulanık Topsis Yöntemleri İle En Uygun Bakım Stratejisinin Seçilmesi: Bir Gıda İşletmesinde Uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya Gıda Ve Tarım Üniversitesi, KONYA.
- [13] Ecer, F. ve Zolfani, S. H., (2022), *Evaluating economic freedom via a multi-criteria MEREC-DNMA model-based composite system: case of OPEC countries*, Technological and Economic Development of Economy, 28(4), 1158–1181.
- [14] Hezam, I. M., Mishra, A. R., Rani, P., Cavallaro, F., Saha, A., Ali, J., Strielkowski, W. ve Štreimikienė, D. (2022), *A hybrid intuitionistic Fuzzy-MEREC-RS-DNMA method for assessing the alternative fuel vehicles with sustainability perspectives*, Sustainability, 14(5463), 1-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su14095463>
- [15] Rani, P., Mishra, A. R., Saha, A., Hezam, I. M. ve Pamucar, D. (2022), *Fermatean fuzzy Heronian mean operators and MEREC-based additive ratio assessment method: An application to food waste treatment technology selection*, International Journal of Intelligent Systems, 37(3), 2612-2647. <https://doi.org/10.1002/int.22787>
- [16] Keshavarz-Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z. ve Antucheviciene, J. (2021), *Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria (MEREC)*, Symmetry, 13(4), 525. <https://doi.org/10.3390/sym13040525>
- [17] Pamucar, D. ve Cirovic, G., (2015), *The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison (MABAC)*, Expert Systems with Applications, 42(6), 3016-3028. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.057>
- [18] Mishra, A. R., Saha, A., Rani, P., Pamucar, D., Dutta, D. ve Hezam, I. M. (2022), *Sustainable supplier selection using HF-DEA-FOCUM-MABAC technique: a case study in the Auto-making industry*, Soft Computing, 26(17), 8821-8840. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07192-8>
- [19] Komatina, N., Tadić, D., Aleksić, A., & Jovanović, A. D. (2023), *The assessment and selection of suppliers using AHP and MABAC with type-2 fuzzy numbers in automotive industry*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 237(4), 836-852.
- [20] Pamucar, D., Petrovic, I., Cirovic, G. ve Stevic, Z. (2022), *An extension of the MABAC and OS model using of unmanned aircraft for fighting forest fires*, Transport, 37(2), 73-97. <https://doi.org/10.3846/transport.2022.16645>
- [21] Sonar, H. C. ve Kulkarni, S. D. (2021), *An Integrated AHP-MABAC Approach for Electric Vehicle Selection*, Research in Transportation Business and Management, 41. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100665>
- [22] Luo, S. Z., Pedrycz, W. ve Xing, L. N. (2022), *Selection of data products: a hybrid AFSAMABAC approach*, International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 13(4), 1079-1097. <https://doi.org/10.1007/s13042-021-01436-z>

SUPPLIER SELECTION WITH MULTI CRITERIA DECISION MAKING METHODS IN AUTOMOTIVE MAINTENANCE SERVICES

Serkan Kaya,
Harran University, Engineering Faculty, Department of Industrial Engineering
Osmanbey Campus, Şanlıurfa, Turkey

ABSTRACT

In the contemporary era, when the issue of supply chain management has become a global concern, it is imperative for enterprises to implement effective supply chain management strategies to ensure the uninterrupted functioning of their operations. The selection of suppliers represents a critical aspect of the supply chain. As there are numerous alternatives and criteria involved in the process of supplier selection, the problem is classified as multi criteria decision making. This study considers the supplier selection problem for maintenance activities of an automotive manufacturing company. A hybrid method is proposed, combining the MEREC and CODAS methods, to address the aforementioned issue. Initially, five criteria were identified through interviews with experts in the field and literature. These were then weighted using the MEREC method. Subsequently, seven alternative suppliers were evaluated using the CODAS method. The results obtained have enabled the company to make more effective decisions in supply chain management and to carry out more effective maintenance and repair activities.

Keywords: Supplier Selection, Multi Criteria Decision Making, MEREC, CODAS.

1. INTRODUCTION

Supply process management is an important factor for enterprises to create sustainable competition. Today, Industry 4.0 technology has brought the concepts of Internet of Things, blockchain technology, big data, cloud computing, and sustainable supply chain [1]. These evolving technologies have provided companies with an opportunity to effectively manage the supply process [2]. Supplier selection is the most important element of supply process management. An effective supply process network ensures that all required materials are delivered on time, in the desired quality and at the lowest possible cost. Many factors must be considered in this selection process, such as cost, quantity, quality, delivery process, and post-delivery warranty services. The multiplicity of these factors makes the problem a multi criteria decision making problem. The evaluation of multiple alternatives according to multiple criteria is referred to as a multi criteria decision making (MCDM) problem.

In the literature, Resende et al. (2021) conducted a systematic review of supplier selection studies. They drew conclusions from different perspectives on the construction, implementation, and validation of decision models. They concluded that most of the decision models in the field of supplier selection have been developed in the field of MCDM and artificial intelligence. Forouzesh-Nejad (2023) evaluated the problem of sustainable supplier selection by evaluating 15 alternatives according to 4 main criteria and 27 subcriteria. They

used RBWM and IR-MABAC methods to solve the problem. Hosseini Dolatabad et al. (2023) solved the supplier selection problem using fuzzy cognitive map and hesitant fuzzy linguistic VIKOR method. In the study, 4 alternatives were ranked according to 3 main criteria and 13 sub-criteria. Karakaş (2022) used Method Based on The Removal Effects of Criteria (MEREC) method to solve the sustainable supplier selection problem and ranked the alternatives using MAIRCA method. Toslak et al. (2022) used MEREC to weight the criteria and WEDBA to evaluate the alternatives to evaluate the performance of logistics companies. In this study, the supplier selection problem of a company operating in the automotive sector is considered. In addition to favourable price and delivery conditions, quality criteria, customer satisfaction, increase in profit and prestige of the company are prioritized in the problem. The criteria to be used in the selection of suppliers were determined by taking into account the opinions of literature and experts in the field. The weights of these criteria were determined using the MEREC method. MEREC method is a method used for objective weighting of criteria [8]. Then, the Combinative Distance-based Assessment (CODAS) method was combined with the MEREC method used to determine the criteria weights, and the alternatives were ranked using a hybrid method. In the CODAS method, alternatives are evaluated according to Euclidean and taxicab distances. In addition, the method ranks the alternatives according to their distance from the negative ideal solution [9]. At the end of the study, the results obtained with both methods are presented. In the second part of the study, the material method is presented. The problem data and the proposed solution method are presented. In the third part, the solution of the supplier selection problem and the steps of the proposed algorithm are given. The results obtained are discussed. In the last part, the obtained results and the future work plan are presented.

2. MATERIAL AND METHODS

The process of decision-making occurs at each stage of the life cycle. The decisions made by businesses have a direct impact on the efficiency of the business. The supplier selection problem can be defined as the determination of the optimal time, quantity, and source for the purchase of raw materials, semi-finished products, and auxiliary materials required by the enterprise. This process is the procurement of all the materials that the enterprise will require at the most favourable price, at the desired quality, at the desired time, and in the desired quantity. The simultaneous optimization of these conflicting objectives and the selection of a supplier is classified as a MCDM problem. Decision-makers must select the most suitable supplier among the alternatives according to the criteria. The solution to the supplier selection problem, which is a real-life problem, was carried out using MEREC for criteria weights and CODAS for ranking the alternatives.

2.1. MEREC Method

The MEREC method for objective weighting of criteria was first presented in the academic literature by Keshavarz-Ghorabae et al. (2021). In this study, the authors employed the MEREC method to assign relative weights to the criteria involved in the selection of a renewable energy power plant in India. In contrast to alternative methodologies, the calculation of criterion weights considers the impact of each criterion on the overall performance of the alternatives. In applying the MEREC method, one must first create a standard decision matrix. In the second step, a normalized decision matrix is obtained by considering the benefit and cost criteria. In the third step, the overall performance value of each alternative is calculated. Subsequently, the performance values of the alternatives are calculated by removing each criterion. In the fifth step the sum of the absolute deviations is calculated. In the final step, the weight values of the criteria are determined.

2.2. CODAS Method

The CODAS method, developed by Keshavarz-Ghorabae et al. (2016), is a technique for ranking alternatives. In the CODAS method, alternatives are evaluated in accordance with the principles of Euclidean and Taxicab distances. The degree of proximity of the alternatives according to the Euclidean distance criterion influences their preferability. In calculating distances, the alternatives are evaluated in relation to the negative ideal point. The alternative with a larger negative distance is to be preferred over the alternative with a smaller negative distance. In this method, all alternatives must be compared with one another.

In the CODAS method, the decision matrix is constructed initially. In the second step, a normalized decision matrix is constructed according to the benefits and costs associated with the criteria. Subsequently, the negative ideal solution points are calculated following the creation of the weighted normalized decision matrix. Subsequently, the Euclidean and Taxicab distances are calculated, thereby enabling the creation of the relative evaluation matrix. In the final step, the values for all alternatives are calculated and ranked in descending order.

2.3. Determination of Criteria

In light of the findings presented in the literature and the insights offered by experts in the field, five evaluation criteria were identified as price, quality, deadline, past performance, and flexibility. The five aforementioned criteria were employed to evaluate seven supplier companies. The price criterion was evaluated in accordance with the cost of the purchased product. The quality criterion is defined as the quality standards of the purchased product. It is anticipated that the product will exhibit a minimal error rate and demonstrate reliability. The quality criterion was calculated based on the mean annual percentage of rejected products as recorded in the relevant documentation. The deadline criterion is defined as the product being delivered in a timely manner, in its entirety, and without any issues. The data were obtained from historical records. This is defined as the number of instances where orders have been delayed. The past performance criterion is defined as the rate of order fulfillment by the supplier company in previous periods. This data is derived from historical records. As final criterion, flexibility is defined as the capacity of suppliers to provide suitable alternatives in accordance with the expectations of the enterprises. This refers to the capacity to provide products to the business in situations and at times that are not foreseen. This is gauged by the time taken to resolve issues pertaining to the order.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In the automotive sector where intense competition is experienced, businesses have to ensure that customer satisfaction is continuous. It is therefore crucial that any maintenance activities carried out on the automotive product are completed without any issues following the sale. This study addresses the issue of supplier selection for maintenance activities within the context of an automotive company. The material to be purchased is a material that is necessary for the prevention of damage to the mechanical parts of the automobile, the assurance of continuous performance, and the reduction of the number of failures. Therefore, the material to be supplied is of great importance for the enterprise.

This study addresses the issue of procuring materials for the periodic maintenance of automobiles sold by an enterprise. A total of five criteria, including price, quality, deadline, past performance, and flexibility, are evaluated using the MEREC method, with each criterion assigned a specific weight. The initial step involved the creation of a standard decision matrix. Subsequently, a normalized decision matrix was generated in accordance with the cost-benefit criteria. Subsequently, the overall performance of each alternative was calculated, and the performance values of the alternatives were determined by removing each

criterion. In the fifth step, the final weight values of the criteria were determined after the removal effect of each criterion was identified. The resulting weights for the criteria, obtained through the application of the MEREC method, are presented in Table 1. According to these results, the criterion with the highest importance is deadline with a value of 0.27605. Then, past performance with 0.24153, product quality with 0.21131, flexibility with 0.17200 and product price with 0.09912.

Table 1. Criterion Weights

Price	Quality	Deadline	Past Performance	Flexibility
0.09912	0.21131	0.27605	0.24153	0.17200

In this study, a hybrid method, derived from the integration of the MEREC and CODAS methodologies, is proposed as a solution to the supplier selection problem. In the proposed method, criteria are weighted by MEREC method and alternatives are ranked by CODAS method. In order to solve the problem with CODAS, a standard decision matrix was initially constructed. In the second step, a normalized decision matrix was constructed in accordance with the benefit-cost criteria. In the third step, a weighted decision matrix was constructed according to the criteria weight values obtained with the MEREC method. Subsequently, the negative-ideal solution points were identified for each criterion. Subsequently, the Euclidean and Taxicab distance values were calculated in order to ascertain the distance of the alternatives to the negative-ideal solution. In the subsequent phase, a comparative evaluation matrix was constructed through a comparison of the performance of the alternatives with respect to each criterion. Subsequently, the comparative evaluation matrix was obtained according to the parameter value $\tau=0.02$ [10,11]. In the final stage of the solution, the evaluation scores (H_i) of the alternatives were determined. According to the results obtained, the alternative with the highest H_i value is preferred.

Table 2 illustrates the relative evaluation matrix obtained through the CODAS method, the evaluation scores of the alternatives, and the resulting rankings. In this instance, alternative A1 has the highest value, with a score of 0.7129, and is therefore ranked first. The resulting ranking, according to the CODAS method, is as follows: A1, A6, A4, A5, A3, A7, and A2.

Table2. Relative Assessment Matrix and Rankings

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	H_i	Rankings
A1	0.0000	0.1840	0.1253	0.0942	0.0938	0.0825	0.1330	0.7129	1
A2	-0.1318	0.0000	-0.0404	-0.0676	-0.0619	-0.0794	-0.0357	-0.4167	7
A3	-0.1036	0.0465	0.0000	-0.0228	-0.0214	-0.0344	0.0056	-0.1301	5
A4	-0.0865	0.0676	0.0254	0.0000	0.0035	-0.0120	0.0316	0.0296	3
A5	-0.0938	0.0663	0.0199	-0.0035	0.0000	-0.0141	0.0256	0.0003	4
A6	-0.0744	0.0794	0.0375	0.0118	0.0166	0.0000	0.0415	0.1125	2
A7	-0.1070	0.0401	-0.0055	-0.0277	-0.0268	-0.0415	0.0000	-0.1685	6

4. CONCLUSIONS

This study addresses the issue of supplier selection for the purchase of materials utilized in the maintenance activities of an automotive company. A hybrid method is developed to address the issue of multiple conflicting criteria. The criteria were identified through an analysis of the literature and input from experts in the field. The aforementioned criteria are then weighted using the MEREC method. A hybrid method, derived from the integration of

the MEREC and CODAS methodologies, was employed to prioritize the alternatives and identify the optimal supplier selection that aligns with the enterprise's requirements. In this study, which addresses a real life problem, a hybrid method that combines the strengths of two existing methods is presented. In the literature review, we did not find a hybrid solution method combining MEREC and CODAS methods in solving supplier selection problems in the automotive industry related to maintenance activities. The next stage of this research will involve the application of the proposed method to a further case study in a different sector. We also plan to develop new hybrid solution methods by using other MCDM methods used in the literature.

5. REFERENCES

- [1] Paksoy, T., & Demiralay, E. (2022), *Strategy development for supplier selection process with smart and sustainable criteria in fuzzy environment*. Cleaner Logistics and Supply Chain, 5, 1-22.
- [2] Chen, Z., Ming, X., Zhou, T., & Chang, Y. (2020), *Sustainable supplier selection for smart supply chain considering internal and external uncertainty: An integrated rough-fuzzy approach*, Applied Soft Computing, 87, 106004.
- [3] Resende, C.H.L., Geraldes, C.A.S., & Lima, F.R. (2021), *Decision models for supplier selection in Industry 4.0 era: a systematic literature review*, Procedia Manufacturing, 55, 492–499.
- [4] ForouzeshNejad, A.A. (2023), *Leagile and sustainable supplier selection problem in the Industry 4.0 era: a case study of the medical devices using hybrid multi-criteria decision making tool*, Environ Sci Pollut Res 30, 13418–13437. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22916-x>
- [5] Hosseini Dolatabad, A., Heidary Dahooie, J., Antucheviciene, J. et al (2023), *Supplier selection in the Industry 4.0 era by using a fuzzy cognitive map and hesitant fuzzy linguistic VIKOR methodology*, Environ Sci Pollut Res 30, 52923–52942. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26004-6>
- [6] Karakaş, A. (2022), *Sürdürülebilir ve yılmaz tedarikçi seçimi probleminin MEREC tabanlı MAIRCA yöntemi ile çözümü*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- [7] Toslak, M., Aktürk, B., & Ulutaş, A. (2022), *MEREC ve WEDBA yöntemleri ile bir lojistik firmasının yıllara göre performansının değerlendirilmesi*. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (33), 363-372.
- [8] Keshavarz-Ghorabae Mehdi, Amiri Maghsoud, Zavadskas Edmundas Kazimieras, Turskis Zenonas and Antucheviciene Jurgita (2021), *Determination of Objective Weights Using a New Method Based on the Removal Effects of Criteria (MEREC)*, Symmetry,13 (4), 525.
- [9] Wang, P. Wang, J. Wei, G. Wu, J. Wei, C. ve Wei, Y. (2020), *CODAS method for multiple attribute group decision making under 2-tuple linguistic neutrosophic environment*, Informatica, 31(1): 161-184.
- [10] Keshavarz Ghorabae, M. Zavadskas, E. K. Turskis, Z., Antucheviciene, J. (2016), *A new combinative distance-based assessment (CODAS) method for multi-criteria decision-making*, Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research, 50(3), 25-44.
- [11] Badi, I., Abdulshahed, A. M., & Shetwan, A. (2018), *A case study of supplier selection for a steelmaking company in Libya by using the Combinative Distance-based Assessment (CODAS) model*, Decision Making: Applications in Management and Engineering, 1(1), 1-12.

SEKCIJA 5
SESSION 5

ODRŽAVANJE ŽELJEZNIČKIH LOKOMOTIVA U KOMPANIJ ARCELORMITTAL ZENICA

MAINTENANCE OF RAILWAY LOCOMOTIVES IN ARCELORMITTAL ZENICA COMPANY

Prof. dr. Sabahudin Jašarević
Univerzitet u Zenici, Politehnički
fakultet, Fakultetska 1, 72000 Zenica
Bosna i Hercegovina

Edin Karić, dipl.inž.maš.
Neldina Zulić, proiz. inž.
Arcelor Mittal Zenica
Bulevar Kralja Tvrtka I 17
72000 Zenica, Bosna i Hercegovina

REZIME

Održavanje željezničkih lokomotiva za kompanije kao što je Arcelor Mittal je od velike važnosti zato što se sav unutrašnji saobraćaj, koji nije mali, obavlja upravo željeznicom. Isto je vrlo odgovaran posao koji zahtjeva dobru organizaciju i strogo propisane odredbe koje su postavljene od strane kompanije ArcelorMittal u svrhu sigurnog prometovanja i pouzdanosti.

Kompanije Arcelor Mittal je 2007 godine je u saradnji sa kompanijom Gredelj uspješno realizirala isporuku šest dizel hidrauličnih lokomotiva i dvije dizel električne lokomotive za kompaniju ArcelorMittal, čime je povećana pouzdanost, a troškovi i vrijeme održavanja su smanjeni. Lokomotive su u potpunosti usklađene propisima o zaštiti okoliša (smanjena razina buke, potrošnja goriva).

U radu će biti prikazan izabrani pristup održavanju ovih lokomotiva kao i samo planiranje izvršenja pojedinih aktivnosti te resurski, kako fizički tako i ostali koji se korsite za provođenje planiranih aktivnosti.

Ključne riječi: željezničke lokomotive, održavanje, planiranje održavanja, pokazatelji

ABSTRACT

The maintenance of railway locomotives for companies such as Arcelor Mittal Zenica is of great importance because all internal traffic, which is not small, is carried out by rail. It is also a very suitable job that requires good organization and strictly prescribed provisions set by the company ArcelorMittal for the purpose of safe traffic and reliability.

In 2007, the company ArcelorMittal, in cooperation with the company Gredelj, successfully realized the delivery of six diesel hydraulic locomotives and two diesel electric locomotives for the company ArcelorMittal, which increased reliability, and reduced maintenance costs and time. The locomotives are fully compliant with environmental protection regulations (reduced noise level, fuel consumption). The paper will show the chosen approach to the maintenance of these locomotives, as well as the planning of the execution of certain activities and the resources, both physical and other, that are used to carry out the planned activities.

Keywords: railway locomotives, maintenance, maintenance planning, indicators

1. UVOD - OPĆENITO O ODRŽAVANJU ŽELJEZNIČKIH VOZILA

Održavanje željezničkih vozila je kombinacija tehničkih, administrativnih, finansijskih i upravljačkih aktivnosti s ciljem zadržavanja ispravnog stanja vozila i njegove opreme ili

vraćanja u stanje u kojem može izvršavati temeljnu zadaću. [1, 2] Pod održavanjem se smatraju svi zahvati koji omogućuju rad vozila kao sistema i njegovih podsistema. Obuhvata aktivnosti koje se provode sa zadaćom otklanjanja neispravnosti odnosno sprečavanja njihovog nastanka, a obilježavaju ga odnosi između pojedinih postupaka i vremena u kojima se navedeni postupci provode. O tome govore i brojne definicije FOD od strane mnogih autora. Održavanje je funkcija u preduzeću čija je nadležnost konstantna kontrola nad postrojenjima i vršenje određenih popravaka i revizija, čime se omogućava stalna funkcionalna sposobnost i očuvanje proizvodnih postrojenja, pomoćnih postrojenja i ostale opreme. [3]

Sistem održavanja je funkcija koja čuva i vodi brigu o pogonima od trenutka kada se rodi ideja o njihovoj izgradnji, pa sve do njihovog opisivanja. [1,3]

Održavanje je jedno od mogućnosti kojima raspolaže preduzeće za ostvarivanje ciljeva u području održavanja i očuvanju opreme.

Zajedničko svim definicijama održavanja je da je to skup aktivnosti ili dio poslovnog sistema koji obezbjeđuje funkcionalnost sredstava za rad. (3)

Održavanje željezničkih vozila može biti redovno i vanredno. U redovno održavanje spada [2]:

- pranje, čišćenje i dezodoracija,
- dezinfekcija, dezinsekcija i deratizacija putničkih vagona i motornih vlakova,
- servisni pregledi vučnih vozila,
- kontrolni pregledi,
- redoviti popravci.

U vanredno održavanje spada [2]:

- pranje i čišćenje teretnih vagona,
- dezinfekcija, dezinsekcija i deratizacija putničkih vagona i motornih vlakova,
- vanredni popravci zbog kvarova, istrošenosti i nasilnih oštećenja,
- vanredni popravci nakon vanrednog događaja.

Održavanje željezničkih vozila, pa time i lokomotiva, je vrlo širok i odgovoran posao koji zahtjeva dobru organizaciju te jasno i strogo propisane odredbe koje se postavljaju u svrhu sigurnog prometovanja i eksploatacijske pouzdanosti.

Ono je direktno povezano sa korištenjem vozila u eksploataciji. Vijek trajanja u eksploataciji značajno ovisi o njegovom održavanju. Planirani vijek trajanja željezničkih vozila poprilično je dug, iznosi od 30 do 40 godina, a troškovi korištenja vozila (održavanje, pogonska energija, logistika i dr.) najčešće višestruko premašuju nabavnu vrijednost vozila [1,4]. Kako bi se vozilo što duže zadržalo u ispravnom stanju odnosno djelovalo u što duljem vremenskom razdoblju neophodno ga je održavati. Ovo je posebno važno kod sistema kod kojih se često mogu pojavljivati kvarovi koji onemogućavaju ispravan rad sistema ali se odgovarajućim postupcima održavanja mogu otkloniti ili popraviti. Kod željezničkih vozila održavanje predstavlja neophodan i značajan dio u vijeku trajanja vozila, a obaveza održavanja sa sigurnog motrišta određena je odgovarajućim propisima i uputama (proizvođača vozila, internim pravilnicima i uputama željezničkog prometa, Međunarodne željezničke unije, Europske agencije za željeznicu ili nadležnog ministarstva za željeznički promet) [2].

S obzirom da nije moguće odrediti univerzalan način i cikluse održavanja, potrebno je prilagoditi zahvate održavanja po veličini, raspoloživosti i starosti voznog parka.

Održavanje željezničkih lokomotiva, kao pokretačkog dijela, je skup unaprijed planiranih radova u sklopu preventivnog održavanja kao i neplaniranih radova u sklopu korektivnog održavanja. Zadatak održavanja je da održava željezničke lokomotive u ispravnom stanju za bezbjedan, uredan i ekonomičan rad u eksploataciji.

Održavanje željezničkih lokomotiva se može podijeliti u dvije kategorije:

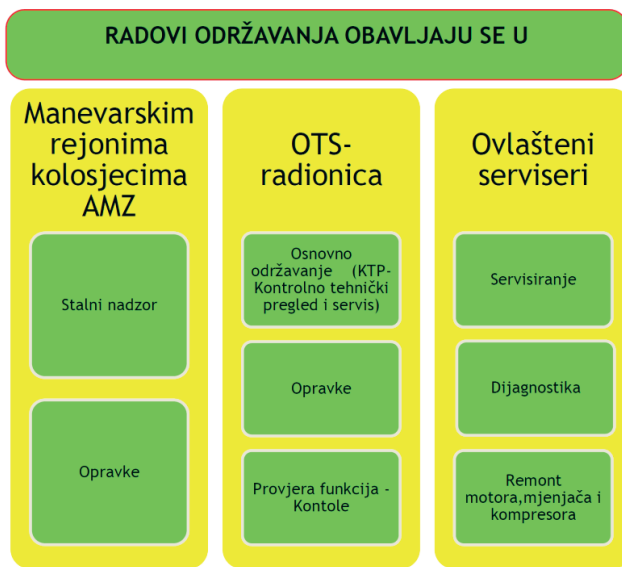
- Preventivno (redovno) održavanje,
- Korektivno (izvanredno) održavanje.

Održavanje željezničkih sredstava u Departментu Saobraćaj ima preventivni karakter, pri čemu

se radovi i održavanje unaprijed predviđaju u okviru redovnih pregleda i servisa o tome u nastavku) [1].

Održavanje, u ArcelorMittalu, zavisno od značaja i obima, vrši se u remontnim radionicama, lokomotivskim radionicama, kolskim radionicama i manevarskim rejonima, Slika 1 [1,6].

Pravilno održavanje lokomotiva direktno je povezano sa proizvodnjom, na način da korištenjem ispravnih vučnih vozila u eksploatacij, dovodi do smanjenja zastoja u proizvodnji.



Slika 1. Mjesta za obavljanje preventivnog održavanja [1,6]

- **Stalni nadzor** - predstavlja skup najjednostavnijih vidova održavanja. Izvodi ga sam rukovalac šinskog vozila. Npr: tokom vožnje mašinovođa prati pokazatelje na instrument tabli, osluškuje rad motora i svih drugih komponenti lokomotive. Sve nedostatke upisuje u knjigu primopredaje kao što se može vidjeti na Slici br.1. Postupci nadzora imaju isključivo zaštitni ili preventivni karakter i odnose se na cijeli sistem vozila.
- **Osnovno održavanje** - (priprema za rad – pranje, čišćenje, snabdijevanje gorivom, priprema filtera i ulja za servis, pregledi – radi ocjene stanja ili preventivne zamjene nekih dijelova, podešavanja i servisi). Karakterišu ga planska obilježja i redovnost izvršavanja (vrijeme rada motora, pređeni put,..). Postupci su izrazito preventivnog karaktera, i odnose se na cijeli sistem lokomotive.
- **Opravke** (dorade, zamijene) - obuhvataju sve one postupke pomoću kojih se sistem iz stanja otkaza vraća u radno stanje. Otklanjaju se neispravnosti dijelova (iznenadno napuknuće osovine lokomotive, pucanje gibnjeva i vješalica gibnja), a postupci su korektivnog karaktera. Najskuplje je održavanje onog sistema koji je otkazao.
- **Provjera funkcija - Kontrole**
 - formalne - osnovne zakonske norme, npr. tehnički pregled
 - neformalne - kontrola izvršenih radova.

2. METODE ODRŽAVANJA ŽELJEZNIČKIH LOKOMOTIVA

Svi vlasnici željezničkih vozila žele da lokomotive što duže ispravno funkcionišu uz minimalne troškove održavanja. Troškovi održavanja prate učestalost održavanja pa samim tim nedostatak održavanja uzrokuje veće troškove zastoja, odnosno troškove zbog isključenosti lokomotiva iz voznog parka. Zbog toga pri planiranju održavanja voznog parka osim troškova održavanja

treba predvidjeti i moguće troškove zastoja i odrediti ekonomičnost održavanja za svako pojedino sredstvo.

Ekonomičnost i kvalitet održavanja lokomotiva ovise o izboru metoda održavanja koje se temelje na šest načela, a to su [4,6]:

- pridržavati se propisanih rokova pri izvršenju pojedinih vrsta preventivnog održavanja,
- garantovati kvalitet i odgovornost za izvršene radove pri održavanju vozila,
- trošiti minimum radog vremena i materijala za izvršenje radova održavanja,
- obezbijediti potrebne rezervne dijelove za zamjenu istošenih,
- pri održavanju za zamjenu istrošenih i oštećenih dijelova upotrebljavati originalne dijelove ili
- proizvedene dijelove na osnovu tehničke dokumentacije,
- izvođači pri remontu vozila da primjenjuju tehničke uslove i tehnička uputstva koja propisuju proizvođači vozila.

Na temelju predhodno navedenih načela nastale su različite metode održavanja u području održavanja lokomotiva (vučnih) i vagona (vučenih) vozila, a neke od metoda su:

- Održavanje prema izvoru financijskih sredstava,
- Održavanje prema vremenu nastanka kvara,
- Održavanje prema tehnološkoj namjeni.

Za nam je posebno interesantna podjela prema vremenu nastanka kvara gdje se prema ovoj podjeli razlikuje tri oblika održavanja [3]:

- Preventivno plansko održavanje,
- Preventivno održavanje prema stanju,
- Korektivno održavanje.

Preventivno plansko održavanje jest takav oblik održavanja kojim se sprječava nastanak kvara. Unaprijed se planiraju popravci vozila, a Sekcija Održavanja Transportnih Sredstava u Departmentu Saobraćaj propisuje vremenske termine za obavljanje svih KONTROLNO TEHNIČKIH PREGLEDA (KTP) i za zamjenu potrošenih dijelova.

Preventivno održavanje prema stanju [3] je oblik preventivnog održavanja pri kojem se kontrolišu: rashladni sistem, kočioni sistem, pjeskare, budnik vozača, elektro mjerni instrumenti sa instalaciom, signalni uređaji sa rasvjetom, akumulatori, protivpožarni aparati, alat sa opremom, motor, prenosnik snage, kompresor, pumpa za ubrizgavanje goriva, regulator, prečistač vazduha za sagorijevanje, osovinski prenosnik, hidrostatički pogon i davač impulsa uređaja za podmazivanje vijenca obruča točkova. Kontrola se vrši od strane mašinovođe prije pokretanja lokomotive i vrši stalan nadzor određenih parametara u toku vožnje.

Sve nedostatke i primjedbe na lokomotivi upisuje mašinovođa u knjigu primopredaje koja se nalazi na upravljačkom stolu lokomotive.

Korektivno održavanje je održavanje hitnog karaktera, gdje se vozilo popravljalo izvan radionica, na kolosijecima – mjestu kvara, a detaljnije opravke obavljaju se kada se željezničko vozilo dovede u radionicu „Dizel depo“.

Radovi održavanja na željezničkim lokomotivama prema tehnološkoj namjeni su [2]:

- popravci iznenadnih kvarova,
- preventivni pregledi,
- periodični tehnički pregledi,
- mali popravci,
- srednji popravci i
- veliki popravci.

Preventivno održavanje lokomotiva se pokazalo kao najbolji način održavanja lokomotiva. Temelji se na obavljanju radova održavanja prema zacrtanom planu, prije nego se kvar dogodi. Za ovu vrstu održavanja potrebno je angažovanje velikih sredstava (materijali, rezervni dijelovi, ali i stručnjaci koji se bave angažiranjem).

3. OPĆE KARAKTERISTIKE DIZEL LOKOMOTIVA U KOMPANIJI ARCELOR MITTAL ZENICA

U kompaniji ArcelorMittal u upotrebi su dvije serije lokomotiva, Tabela 1 [1,6]:

- **Dizel hidraulična lokomotiva DHL 732,**
- **Dizel električna lokomotiva DEL 642.**

Lokomotive se koriste samo za maneverski rad. Rad ovih lokomotiva se odvija u industrijskoj zoni za prijevoz sirovina, poluproizvoda i gotovih proizvoda internog željezničkog transporta u krugu ArcelorMittala.

Tvornica željezničkih vozila Gredelj je uspješno realizirala isporuku šest dizel hidrauličnih lokomotiva i dvije dizel električne lokomotive za kompaniju ArcelorMittal 2007.godine, čime je povećana pouzdanost, a troškovi i vrijeme održavanja su smanjeni. Lokomotive su u potpunosti usklađene propisima o zaštiti okoliša (smanjena razina buke, potrošnja goriva).

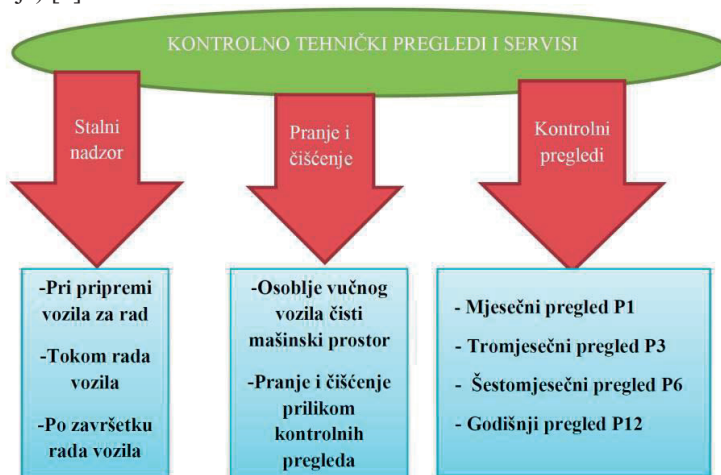
Ukupna dužina kolosijeka u kompaniji ArcelorMittal je cca 48 km, koju održava Sekcija Održavanje Kolosijeka u Departmentu Saobraćaj. Ukupan broj skretnica 222 komada, raznih tipova. Postoje dvije vrste kolosijeka, Evropski dužine 35 km i ostatak kolosijeka koji je Ruski.

Tabela br. 1 Osnovne karakteristike dizel-lokomotiva Arcelor Mittala Zenica [1,6]

R.b.	Vrsta i serija lokomotive	Proizvođač	Remont i modernizacija	Masa (t)	Godina proiz.	Godina rekonstr.	Snaga (kW)
1	DEL-642-001	Đ.Đ.Slav.Brod	Gredelj-Zagreb	64	1960	2007	820
2	DEL-642-002	Đ.Đ.	Gredelj-Zagreb	64	1960	2007	820
3	DHL-732-001	Đ.Đ.	Gredelj-Zagreb	44	1960	2007	478
4	DHL-732-002	Đ.Đ.	Gredelj-Zagreb	44	1960	2007	478
5	DHL-732-003	Đ.Đ.	Gredelj-Zagreb	44	1960	2007	478
6	DHL-732-004	Đ.Đ.	Gredelj-Zagreb	44	1960	2007	478
7	DHL-732-005	Đ.Đ.	Gredelj-Zagreb	44	1960	2007	478
8	DHL-732-006	Đ.Đ.	Gredelj-Zagreb	44	1960	2007	478

4. PREVENTIVNO ODRŽAVANJE ŽELJEZNIČKIH LOKOMOTIVA

Održavanje lokomotiva odvija se po sljedećoj proceduri kao što je prikazano na Slici 2. Lokomotive se podvrgavaju stalnim pregledima (nadzoru) pri samoj pripremi za rad, tokom rada i po završetku rada od strane osoblja vučnog vozila (stalni pregledi (nadzor) i ostale vrste objašnjeno ranije) [6].



Slika 2. Preventivno održavanje lokomotiva [1,6]

4.1. Pranje i čišćenje lokomotive

Pored toga što osoblje vučnog vozila tj. mašinovođa ima zadatak da pazi i čisti svoj radni prostor unutar upravljačkog prostora lokomotive, detaljno pranje i čišćenje se vrši na platou ispred radionice OTS-a. Pranje i čišćenje lokomotive je neophodno prije ulaska lokomotive u radionicu isključivo zbog lakšeg pregleda, a obavljaju ga zaposlenici jedinice za održavanje lokomotiva na izgrađenoj platformi za pranje lokomotiva tj. mjestu predviđenom za pranje. Pranjem lokomotive se uklanjaju nečistoće i masti koje se stvore na vanjskom i unutrašnjem prostoru lokomotive s ciljem lakšeg uočavanja napuknuća, oštećenja i curenja ulja iz motornog prostora, curenja antifrizna iz rashladnog sistema. Vizuelnim pregledom se lakše ustanove oštećenja, prignječenja i napuknuća hidrauličnih crijeva kada se unutrašnji mašinski prostor lokomotive dobro očisti i opere od raznih nečistoća i prašine. Na slici br.3 je dat izgled platforme za pranje lokomotiva.

Otpadne vode se skupljaju u kolektor gdje se talog zadržava na filterima, a prečišćena voda odvodi u kanalizaciju. Zamjena filtera se vrši svaka tri mjeseca.



Slika 3. Platforma za pranje lokomotiva [8]

4.2. Planiranje održavanja željezničkih lokomotiva

Održavanje lokomotiva u ArcelorMittalu ima općenito preventivni značaj i on je stalan proces koji mora osigurati sigurnu, pouzdanu i ekonomičnu eksploataciju voznog parka internog željezničkog saobraćaja. Preventivno održavanje lokomotiva u AMZ-u se planira na godišnjem nivou, jer se ne radi samo o popravci kvarova, kada je on daleko nastao, pa samim tim je potrebno unaprijed planirati i spriječiti njegovu pojavu.

Ovaj značaj ukazuje na potrebu izrade planova preventivnog održavanja lokomotiva u određenim vremenskim periodima kao što su zamjena dotrajalih dijelova, otklanjanje zastarijelih sistema i zamjena sa novim, remont lokomotiva, pouzdanost lokomotiva za rad i slično. Jedna od bitnih aktivnosti su i kontrolno tehnički pregledi i isti se planiraju i prate na godišnjem nivou.

4.3. Kontrolno tehnički pregled (KTP) i servis lokomotiva

Održavanje lokomotiva u Departmentu Saobraćaj se zasniva na pravilniku o održavanju željezničkih vozila i upustvima za rukovanje i održavanje dobivenim od proizvođača [2]. Održavanje ima preventivni karakter, pri čemu se radovi održavanja unaprijed predviđaju u okviru periodičnih kontrolnih pregleda i redovnih servisa za predstojeću godinu, kao što je prikazano u Tabeli 2., a na kraju godine se radi realizacija istih, što se može vidjeti iz Tabele 3.

Tabela 2. Plan održavanja lokomotiva za 2023. god. [6]

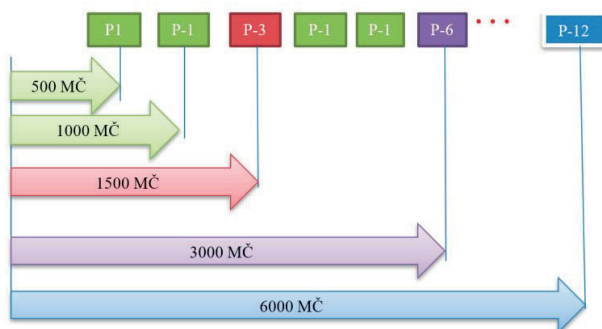
"ArcelorMittal Zenica" d.o.o.																																	
Department: Saobraćaj																																	
Sektija: Vuča		PLAN ODRŽAVANJA	Saobraćaj-Vuča	u	2023 .god.																												
Zenica,		Sektija i/ili Department																															
Vrsta vozila: DEL, DHL, KDE, TMD	Naziv vozila	Vlasnik vozila	MJESEC U GODINI ILI INTERVAL ODRŽAVANJA ILI NAZIV ODRŽAVANJA / VRSTE ODRŽAVANJA*																														
			JANUAR	FEBRUAR	MART	APRIL	MAJ	JUNI	JULI	AUGUST	SEPTEMBAR	OKTOBAR	NOVEMBAR	DECEMBAR																			
C. št.	1	DEL 642-001	VUČA	P1	P3	P6	P12	P1	P3	P6	P12	P1	P3	P6	P12	P1	P3	P6	P12	P1	P3	P6	P12	P1	P3	P6	P12	P1	P3	P6	P12		
				1					1				1					1					1						1				
2	DEL 642-002	VUČA																															
				1					1				1					1					1						1				
3	DHL 732-001	VUČA																															
				1								1						1					1										
4	DHL 732-002	VUČA																															
				1									1																				
5	DHL 732-003	VUČA																															
				1											1																		
6	DHL 732-004	VUČA																															
				1													1																
7	DHL 732-005	VUČA																															
				1																													
8	DHL 732-006	VUČA																															
				1																													

4.3.1. Ciklusi kontrolno tehničkih pregleda KTP i servisa

Prema pravilniku o održavanju željezničkih vozila br: 39/15 [2] Pod ciklusom redovnog održavanja podrazumijeva se redosljed vršenja kontrolnih pregleda, odnosno redovnih opravki vozila.

Ciklus kontrolnih pregleda lokomotiva sastoji se od više vrsta pregleda, koji se naizmjenično smjenjuju. Na Slici 4. dat je šematski prikaz ciklusa kontrolnih pregleda, gdje je ;

- P-1, P-3, P-6, i P-12 – vrste kontrolno tehničkih pregleda KTP i servisa i
- MČ- broj moto časova lokomotive (vrijeme rada motora)



Slika 4. Grafički prikaz ciklusa kontrolno tehničkih pregleda (KTP) i servisa [2,6]

Nakon što se za lokomotivu odredi odgovarajući kontrolno tehnički pregled po datom intervalu kako je prikazano u na Slici 4., onda se može pristupiti obavljanju radnih zadataka koji su detaljno opisani za svaku vrstu pregleda. Vrste kontrolno tehničkih pregleda se razlikuju po utrošenim moto satima, gdje se povećava obim posla tj. broj stavki sa povećanjem vrste KTP-a (P1, P3, P6 i P12). Pri čemu je pregled P1 prostiji za razliku od preostala tri tehnička pregleda, dok je pregled P12 najsloženiji i sadrži najveći obim opisa radova za izvršioce.

Izvođenje aktivnosti održavanja po planiranim intervalima samo je po sebi korak naprijed u odnosu na korektivno održavanje. [1,4]

4.3.2. Realizacija KTP pregleda i servisa lokomotiva

Realizacija KTP pregleda i servisa je bitan faktor i pokazatelj stvarnog stanja održavanja lokomotiva na godišnjem nivou. U Tabeli br.3 dat je prikaz realizovanih kontrolno tehničkih pregleda i servisa do novembra 2023 godine. Za sve lokomotive dat je prikaz vrste pregleda po mjesecima i ukupni radni sati lokomotive na dan servisiranja.

Tabela 3. Realizacija kontrolno tehničkih pregleda KTP i servisa do novembra 2023 god.[6]

REALIZACIJA												
servisa i kontrolno tehničkih pregleda na lokomotivama												
2023 god.												
Serija i broj lokomotive	Vrijeme i vrsta pregleda - servisa											
	jan	feb	mart	april	maj	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec
DHL 732-001	52918 P1 13.01.											
DHL 732-002		50803 P1 10.02.	51275 P3 16.03.		51762 P1 05.05.		52794 P1 26.07.			52816 P12 20.10.		
DHL 732-003	49270 P1 06.01.	49798 P3 17.02.			50284 P1 12.05.		50822 P1 05.07.	51316 P6 17.08.		51861 P1 05.10.		
DHL 732-004		46412 P1 23.02.		46922 P1 20.04.		47387 P1 23.06.			47918 P3 04.08.	48407 P1 12.09.		
DHL 732-005		50786 P1 24.02.		51283 P3 14.04.			51833 P1 20.07.		52371 P1 22.09.			
DHL 732-006		45133 P1 01.02.		45654 P3 06.04.	46139 P1 09.05.		46650 P1 12.07.	47169 P12 31.08.		47665 P1 13.10.		
DEL 642-001	53541 P6 18.01.		54062 P1 08.03.	54596 P1 12.04.		55100 P3 05.06.		55634 P1 10.08.	56119 P1 29.09.			
DEL 642-002		51600 P1 07.02.		52123 P12 26.04.		52660 P1 27.06.			53168 P1 15.09.			

REKAPITULACIJA :
 KONTROLNO TEHNIČKI PREGLED P1 = 26
 KONTROLNO TEHNIČKI PREGLED P3 = 6
 KONTROLNO TEHNIČKI PREGLED P6 = 2
 KONTROLNO TEHNIČKI PREGLED P12 = 3
 UKUPNO KTP : = 37

Osim ovoga redovno se prati i pouzdanost i produktivnost lokomotiva. Pouzdanost lokomotiva u 2022. godini je izražena u procentima (%) i data u Tabeli 4. U tabeli su dati planirani i realizovani ključni parametri za Department Saobraćaj. Podaci su dati za četiri kvartala, a ukupna pouzdanost je iznosila 83,24%, dok je planirana pouzdanost iznosila 84%, pa možemo reći da je za 2022. godinu pouzdanost bila nešto niža od planirane. Produktivnost lokomotiva iznosila je 233,47 % za istu godinu. [3,5,6]

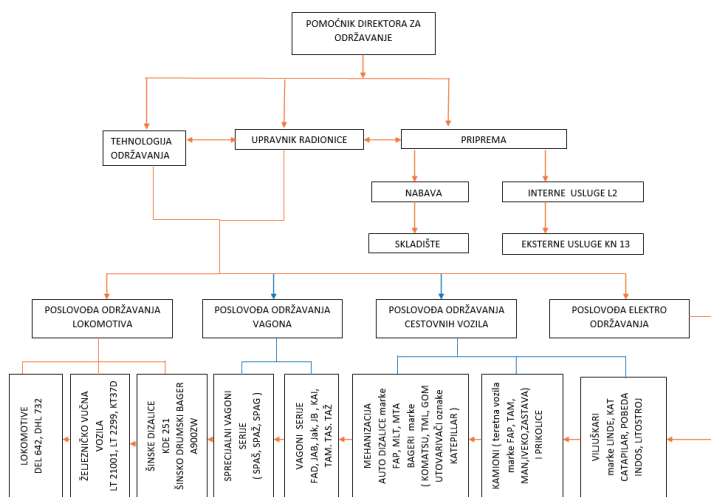
Tabela 4. Ključni parametri indikatori- KPI i plan za 2022 godinu Departarmenta Saobraćaj [1,6]

TRANSPORTATION KPI AND PLAN FOR 2022																							
No.	KPI description	unit	Act. 2020	Act. 2021	Act. Jan	Act. Feb	Act. Mar	Act. Q1	Act. April	Act. Maj	Act. Juni	Act. Q2	Act. Jul	Act. Aug	Act. Sep	Act. Q3	Act. Okt	Act. Nov	Act. Dec	Act. Q4	Act. 2022	Plan 2022	
1.	Safety - LTI	no.	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.	Level 5S		4,5	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,75	4,9
3.	Derailments	No	17	18	1	1	0	2	2	1	0	3	0	1	1	2	1	3	0	4	11	17	
4.	Locomotives Availability	%	80,9	83,8	92,5	89,3	84,5	89,0	81,7	87,1	81,9	83,6	81,5	81,1	78,7	80,4	78,2	78,7	83	80	80,24	88	
5.	Locomotives Productivity	Min/Sec/Hr	251	252,76	185	251	243	226	260	266	245	257	218	274	241	244	219	197	203	207	233,47	255	
6.	Frequency of wagons damages																						
a)	- outside	%	0,18	0,33	1,19	0,01	0,58	0,59	0,58	0,88	0,36	0,61	0,61	0,00	0,00	0,20	0,70	0,99	0,11	0,60	0,50	0,25	
b)	- inside	%	0,13	0,15	0,12	0,17	0,09	0,13	0,67	0,12	0,25	0,35	0,13	0,10	0,06	0,10	0,12	0,17	0,55	0,28	0,21	0,13	
7.	TAT of outside wagons	Hr / wagon	9,67	10,83	14	11	11	12,00	9	10	10	9,67	11	9	9	9,67	13	14	12	13,0	11	10	
8.	Wagon demurrage	EUR / tons	0,013	0,036	0,061	0,057	0,038	0,052	0,039	0,051	0,012	0,034	0,025	0,00	0,00	0,008	0,055	0,086	0,032	0,06	0,04	0,02	
9.	Road Vehicle Availability	%	88,25	91,67	89,5	87,6	83,2	86,8	81,5	86,2	88,2	85,33	88,1	88,5	85,5	87	82,8	82,11	83,49	82,79	85,57	92	
10.	Locomotives & Locotractors Fuel Consumption Indicator	L / tona	0,051	0,050	0,066	0,048	0,051	0,055	0,046	0,045	0,050	0,047	0,043	0,046	0,048	0,046	0,054	0,058	0,057	0,056	0,051	0,049	

4.4. Organizacija održavanja željezničkih lokomotiva

Organizacija održavanja lokomotiva u Departmentu Saobraćaj predstavljena na Slici 5. Da bi se ispoštovala procedura održavanja vozila potrebno je da svi departmenti u AMZ-u kao i četiri sekcije Departmenta Saobraćaj dostave svoje zahtjeve za opravku svojih vozila u Sekciju Održavanje Transportnih Sredstava.

Na osnovu praćenja odrađenih moto sati rada lokomotiva, Sekcija Vuča vrši sedmičnu najavu za servisiranje preventivnog održavanja lokomotiva, a na dnevnoj osnovi dostavljaju zahtjeve za tekuće opravke lokomotiva koje su korektivnog karaktera održavanja.



Slika 5. Shema organizacije održavanja željezničkih vozila u Departmentu Saobraćaj [6]

Svi zahtjevi za opravku lokomotiva dostavljaju se tehnologu održavanja željezničkih sredstava, gdje se oni dalje obrađuju. Tehnolog ima zadatak da izvrši realizaciju i raspíše tehnologiju za opravke na način da sa predstavnikom radionice (poslovođom) i kontrolno prijemnim organom (KPO) izvrše pregled lokomotive i sve uočene nedostatke upiše u radni list i radni nalog (interno propisani u ArcelorMittal Zenica). Definisane radne naloge tehnolog dostavlja upravniku, pri čemu upravnik iste dostavlja poslovođama radionice. Tehnolog vrši praćenje i definisanje rezervnih dijelova za lokomotive, pa za nedostajuće rezervne dijelove (r/d) pravi sastavnicu materijala i istu dostavlja pripremi održavanja.

Priprema održavanja ima zadatak da vrši trebovanje materijala na osnovu sastavnice materijala koja je predhodno odobrena i potpisana od strane pomoćnog direktora održavanja, a izuzeti materijal sa skladišta priprema dostavlja u radionicu OTS-a. Zadatak pripreme pored navedenog je da vrši narudžbu r/d i drugih repromaterijala za potrebe Departmenta Saobraćaj. Takve narudžbe se unose u sistem aplikacija i proizvoda u obradi podataka, skraćenica SAP (Sistem Application and Product).

Po završetku opravke ili servisa lokomotive, poslovođa ima zadatak da na zahtjevu za opravku upiše kratak opis urađenih poslova, ugrađenih rezervnih dijelova i utrošeni materijal. Također, poslovođa ima zadatak da upiše na radni nalog utrošene radne sate pri opravi tj. efektivno vrijeme rada zaposlenika. Nakon opravke ili servisiranja lokomotive, kontrolno prijemni organ KPO vrši vizuelni pregled i ispravnost vozila i nakon utvrđene ispravnosti vozilo pušta u rad i time se procedura planirane opravke u potpunosti završava.

4.5. Mjesto održavanja lokomotiva

Održavanje lokomotiva vrši se u radionici za održavanje transportnih sredstava Dizel depo koji se u suštini sastoji od:

- kolosječne mreže,
- glavne hale za pregled i servisiranje vozila,
- prostorije za poslovođu radionice,
- prostorije za izvršioce radova.

Kolosječna mreža se sastoji od:

- ulaznog i izlaznog kolosijeka,
- kolosijeka za pregled i servisiranje lokomotiva, (Slika 6.),
- kolosijeka prenosnice za prenos lokomotiva, (Slika 7.),
- kolosijek za vanjsko pranje i čišćenje lokomotiva, (Slika 3.).



Slika 6. Kolosijek za pregled i servisiranje lokomotive *Slika br. 7 Kolosijek prenosnice za prenos lokomotiva*

5. ZAKLJUČAK

Da bi lokomotiva, što je moguće duže vremena bila u dobrom radnom stanju, treba je koristiti u skladu sa uputstvima i preporukama. Kakvo će biti tehničko stanje lokomotive zavisi od kvalitete održavanja. Ako je loša organizacija i ne poštuju se osnovna pravila održavanja u zadanim vremenskim rokovima dolazi do pogoršanja eksploatacijskih kvaliteta lokomotive.

Veoma je važno pravovremeno otklanjanje manjih kvarova kako ne bi došlo do pojave većih, za čije otklanjanje je potrebno puno više vremena, ali i sredstava kako bi se sve vratilo u ispravno stanje. Upravo zbog toga je velika važnost preventivnog načina održavanja lokomotiva, koji je najsloženiji i najodgovorniji proces održavanja lokomotiva. Cilj održavanja željezničkih vozila je izbjeći odnosno smanjiti kvarove, jer se prilikom kvara vozila na pruži blokira ostatak prometovanja što uzrokuje velike probleme u voznom redu. Takva vrsta kvara stvara višestruke troškove, u zavisnosti o tome može li se kvar otkloniti na mjestu nastanka ili je potrebna vuča do radionice.

ArcelcoMittal ima sve predpostavke, kako u pogledu ljudskih resursa tako i prostornih za uspješno obavljanje pregleda i popravki koje se dese na lokomotivama sa kojima raspolažu. U radu su prikazani kontrolno tehnički pregledi iz kojih se vidi obim poslova i opis radova, koji trebaju biti izvršeni u zadanim vremenskim intervalima, kao i neki pokazatelji uspješnosti tog posla.

6. LITERATURA

- [1] Zulić, Neldina: *Održavanje željezničkih lokomotiva u kompaniji ArcelorMittal Zenica*, Diplomski rad, Politehnički fakultet u Zenici, Zenica 2023. godine
- [2] *Pravilnik o održavanju željezničkih vozila u željezničkom sistemu BiH*, Službeni glasnik BiH, broj 39/15
- [3] Brdarević, Safet: *Uspješnost održavanja*, OMO Beograd, 1988.
- [4] Mičić, Igor: *Održavanje željezničkih vozila*, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb 2012. godine
- [5] Thomas Åhrén: *A study of maintenance performance indicators for the swedish railroad system*, doctoral thesis, Luleå University of Technology. 2005., ISSN: 1402-1757
- [6] Dokumentacija Departamenta Saobraćaj kompanije Arcelor Mittal Zenica

KONCEPCIJA PREVOZA LJUDI TRAKASTIM TRANSPORTEROM

CONCEPT OF TRANSPORTING PEOPLE BY BELT CONVEYOR

Doc.dr.sc. Kasim Bajramović, dipl. inž. rud.
Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet Zenica

Irfan Bajramović, BA ing. cestovnog prometa
J.P. Elektroprivreda BiH d.d. Sarajevo - Termoelektrana Kakanj

REZIME

Trakasti transporteri čine najveću skupinu uređaja za realizaciju prevoza ljudi i materijala u aktivnim jamama, a koncepcija takvog načina prevoza direktno zavisi od zatečenog stanja, a kod projektovanja novih jama, otvaranje i razrada nekad su u direktnoj vezi sa rješenjem prevoza.

Danas se rješavanju problema prevoza ljudi i materijala u rudnicima ne pristupa samo sa aspekta rentabilnosti proizvodnje mineralnih sirovina. U pitanju je i humanizacija rada i zaštita radnika, što se rješavanjem ovog problema u velikoj mjeri postiže.

U ovom radu će se prikazati način prevoza ljudi trakastim transporterima u jami „Begići-Bištrani“ Rudnika Kakanj sa akcentom na sigurnost i održavanje sigurnosti radnika pri prijevozu.

Ključne riječi: sigurnosni uređaji, prevoz, platforma, trakasti transporteri

ABSTRACT

Belt conveyors make the largest group of devices for the realization of the transportation of people and materials in active pits, and the conception of such a mode of transportation directly depends on the situation at-site, and when designing new pits, opening and development are sometimes directly related to the transportation solution.

Today, solving the problem of transporting people and materials in mines is not approached only from the aspect of profitability of mineral raw material production. It is also about the humanization of work and the protection of workers, which is largely achieved by solving this problem.

This paper will show the method of transporting people by belt conveyors in the "Begići-Bištrani" pit of the Kakanj Mine with an emphasis on safety and maintaining the safety of workers during transportation.

Keywords: safety devices, transport, platform, belt conveyors

1. UVOD

Predmet rada jeste prikaz i pojašnjenje koncepcije prevoza ljudi (radnika) trakastim transporterom u jami „Begići-Bištrani“, Rudnika Kakanj, sa akcentom na sigurnost i održavanje sigurnosti pri prevozu. Prevoz ljudi u jami transporterima sa gumenom trakom vrši se u horizontalnim ili kosim prostorijama sa nagibom do 18°. Kod nagiba većih od 5° transporter sa trakom mora imati uređaj za kočenje u slučaju prekida električne energije.

Na bočnim ulaznim i izlaznim mjestima nagib transportne trake ne smije biti veći od 10°.

Stupanje na traku ili silazak sa trake dozvoljen je na posebno određenim mjestima - stanicama i sa specijalno izgrađenim platformama za tu svrhu.

Minimalna širina od bokova stanice do transporterera sa gumenom trakom sa strane ulaza i izlaza mora biti najmanje 1,5 m, a sa druge strane najmanje 0,5 m. Širina od 1,5 m uključuje i širinu 0,7 m za prolaz ljudi.

Ulaz ljudi na trakasti transporter u jami obezbijeduje se pomoću čeonu ulazne platforme. Obzirom da je nagib transporterera na mjestu ulaza radnika na gornju stranu transporterera 12,5°, a zbog zakonskih propisa o prevozu ljudi trakastim transporterima, na mjestu ulaza na transporter postaviti će se pomična čeonu ulazna platforma. Da bi se obezbijedilo međusobno rastojanje ljudi na transportnoj traci od 5,0 m, frekvencija ukrcavanja na transporter mora biti 3,84 sek. Ulaz na sve platforme je pomoću stepenica, da bi se ljudi popeli u nivo transportne trake. Prvi korak je desnom nogom u stojećem stavu.

Prilikom izvoza iz revira boravak ljudi na transporteru je u ležećem stavu potrbuške sa glavom i pogledom u smjeru transporta. Vrijeme izvoza transporterom je cca 4,1 minute poslije kojeg treba obaviti radnju iskrcavanja. Na 30 m prije, izlazne platforme postavlja se svjetleća tabla "IZLAZ 30 m" poslije koje nastaje vrijeme pripreme za izlaz sa transporterera. Zatim dolazi tabla "IZLAZ 15 m", kada čovjek treba iz ležećeg preći u čučajući - stojeći položaj i iskoračiti lijevom nogom na bočnu izlaznu platformu. Za ovu radnju obezbijedeno je 8 m transportnog puta ili približno 6 sekundi vremena što je sasvim dovoljno za prosječno uvježbanog čovjeka na prevozu.

Ukoliko čovjek iz bilo kojeg razloga ne izađe na bočnu platformu prolazi kroz gumenu zavjesu i transporter ga iznosi na čelnu platformu koja je u transportnom nivou.

Izlaz radnika sa transporterera u jami, prilikom odlaska na radno mjesto, obezbijeden je preko čeonu izlazne platforme čija dužina iznosi 4,5 m što je dovoljno za bezbjedan silazak radnika sa transporterera.

Kraj radne smjene, je specifičan po tome što uslijed zamora poslije rada u jami, postoji mogućnost da čovjek u toku prevoza ležeći u koritu transporterera zaspi. Zbog toga se na presipu transporterera treba ugraditi obrtna platforma. Njen rad, spuštanje - zatvaranje ili otvaranje presipa treba regulisati na komandnom pultu transportnog sistema "VOŽNJA LJUDI" odnosno "VOŽNJA MATERIJAL", [1, 2].

2. SIGNALIZACIJA, UPRAVLJANJE I OSIGURANJE TRAKASTIH TRANSPORTERA

Rasvjetno - signalna mreža transporterera bit će napojena sa rasvjetne stanice smještene u izvoznom pultu. Signalizacija pokretanja, zaustavljanja transporterera kao i drugih različitih stanja vršiti će se preko signalnih truba koje se nalaze pored pogonske i povratne stanice transporterera. Stepenn osvjetljenosti trase transporterera je takav da su svjetiljke instalirane na svakih cca 20 m duž transporterera. U neposrednoj blizini pogonske i povratne stanice postaviti će se telefonski aparati.

Upravljanje transporterom će se vršiti iz komandnog pulta. Prilikom prevoza ljudi ne može se vršiti izvoz uglja i vrijeme promjene režima rada određeno je iz dužine transportnog puta i brzine kretanja te iznosi:

$$T = \frac{L}{v} = \frac{345}{1,30} = 265,38 \text{ s} = 4,4 \text{ min} \quad \dots (1)$$

gdje su: L → dužina trakastog transporterera (m),
v → brzina trake (m/s).

Izmjena režima rada sa "VOŽNJA MATERIJALA" na "VOŽNJA LJUDI" automatski zaustavljaju sve transportere koji presipaju ugalj na transporter za prevoz ljudi, a ugrađeni

semafori na presipnim mjestima i ulaznoj platformi gase crveno svjetlo "VOŽNJA MATERIJAL" da bi se poslije isteka prelaznog vremena od 4,4 min, automatski spustila obrtna platforma na presipu dotičnog transprotera i upalilo zeleno svjetlo semafora "VOŽNJA LJUDI" na presipima i ulaznoj platformi transprotera. Signalizacija je podijeljena na radnu i havarijsku sa registracijom podataka:

- puštanje sistema u rad registruje se pomoću zvučne vremenske signalizacije,
- kontrola rada i havarijska isključenja registruju se svjetlosnom signalizacijom i telefonskim vezama,
- centričnost kretanja transportne trake i isključenje poteznim užetom vrši se pomoću sklopki,
- signalizacija podizanja obrtne platforme, kočnice i krajnjeg položaja nateznog uređaja transprotera reguliše se pomoću krajnjih prekidača.

2.1. Signalno - sigurnosni uređaji

Duž transporter sa trakom postavljeni su uređaji kojim se u slučaju nužde transporter može zaustaviti s bilo kojega mjesta. Montaža se izvodi tako da je uže ili drugi uređaj uvijek pri ruci radniku koji se vozi trakom. U slučaju zaustavljanja trake osigurano je ponovno pokretanje trake tek nakon otklanjanja uzroka zbog kojeg je traka bila zaustavljena. Na svim ulaznim i izlaznim stanicama mora se obezbijediti telefonska ili druga veza za govorno sporazumijevanje. Cijela trasa transporter sa trakom mora biti osvijetljena. Prije početka prevoza ljudi moraju se dati zvučni ili svjetlosni signal koji se mora čuti, odnosno vidjeti duž cijele trase trake.

U cilju veće bezbjednosti i sigurnosti eksploatacije projektovanog sistema predviđeno je:

1. Duž trakastog transprotera - trase prevoza, postavljanje konstrukcije istog, potezno uže koje obezbijeduje automatsko isključenje - zaustavljanje trake u slučaju nužde,
2. Držanje trake na usponu obezbijedeno je pomoću zadržaća postavljenih na kućištu prvog stepena prenosa reduktora,
3. Osiguranje transporta od preopterećenja riješeno je pomoću hidrodinamičkih spojnice između motora i reduktora,
4. Regulacija ravnomjernosti opterećenja pogonskih elektro motora postiže se pomoću HD - spojnice.
5. Funkcionisanje nateznog mehanizma transporta pomoću krajnjih (graničnih) sklopki.

U slučaju kvara signalnih uređaja, prevoz ljudi transporterom sa trakom se ne dozvoljava.

3. KONCEPCIJA PREVOZA LJUDI TRAKASTIM TRANSPORTEROM

Kod prevoza ljudi transporterima sa trakom, platforme, signali i osiguranje su najvažniji elementi prevoza.

Slobodna visina prometnice iznad transportne trake za prijevoz ljudi od najizbočenijeg dijela transportne trake do krova hodnika mora iznositi najmanje 1 m. Iznad platforme za stupanje na traku ili silazak s trake na duljini najmanje 8 m u smjeru prevoza slobodna visina iznad trake mora biti najmanje 1,8 m. Jednaka slobodna visina potrebna je i na silaznim platformama, ali samo u smjeru prevoza prema platformi.

Stupanje na traku ili silazak s trake dopušten je na posebno određenim mjestima-stajalištima, sa specijalno izrađenim platformama u tu svrhu.

Najmanja širina od bokova jamske prostorije u kojoj je stajalište do transporterera s gumenom trakom na strani na kojoj se ulazi i izlazi mora biti najmanje 1,5 m, a s druge strane najmanje 0,5 m. Širina od 1,5 m uključuje i širinu 0,7 m za prolaz ljudi, [3].

3.1. Platforme

Platforma se mora ograditi čvrstom ogradom visokom najmanje 1m. Za penjanje ljudi na platformu i silazak s nje postaviti stepenice s rukohvatima, slika 1. Na platformu se postavlja uređaj za isključenje trake.

Platforma se osvjetljava tako da ne zaslijepljuje ljude koji čekaju na prevoz ili silaze s trake.

Platforma mora biti čista i na nju se ne smije stavljati materijal.

Za prevoz ljudi transporterima s trakom platforma mora biti čvrsta, ravna, bez otvora i ispusta. Koeficijent sigurnosti mora biti najmanje 3, prema najvećem mogućem statičkom opterećenju. Nagib bočne platforme mora biti usklađen s nagibom trake i ne smije biti veći od 10^0 .

Prostor između platforme i trake mora biti prekriven.

Iza silazne platforme postavljaju se granične brane. Ovim uređajem mora se osigurati zaustavljanje trake ili prisilno silaženje bez opasnosti od ozljeda, ako se traka ne zaustavlja.

Zelenim signalima na platformama, presipima i pogonskoj stanici, mora se naznačiti da se trakom prevoze radnici, slika 2.

Pred izlaznom platformom, na odstojanju 8-10 m, postaviti upozorenja, svjetlosna ili fluorescentna, da dolazi platforma i da slijedi iskrcavanje. Što se tiče osiguranja radnika, ako produži vožnju, na traci moraju biti, pored poteznih prekidača, i kapije s prekidačima rada trake, kao i odstranjivač radnika s trake ako se ne iskrca sa trake na platformu.

Platforme za ulazak i silazak su bočne, slika 3.

U pravcu izlazne platforme, na donjoj traci, postaviti odbojnu zaštitnu mrežu, kako se manje vješti radnici, pri silasku s trake, ne bi ozlijedili od konstrukcije transporterera, prostorije, pa i rukohvata. Kod bočnog ulaženja i silaženja dužine platforme su najmanje 3,0 m. Bočne ulazne platforme su računane i na osnovu sposobnosti radnika da se stabilizira na traci poslije uskakanja, što obično traje 2-3 sekunde.

Kod bočnih ulaznih platformi potrebno je rukohvatima pratiti traku 6-9 m, obojenu upadljivom bojom. Svako produženje vožnje mimo silazne platforme može biti kobno po radnika. Da bi se ovo izbjeglo, iza izlaznih bočnih platformi, na jedan do dva metra, postaviti dvostruke brane (dvostruko kao faktor sigurnosti 2) sa prekidačima rada motora pogona trake.

Kada radnik naiđe na ove brane, a ne iskoči s trake na platformu, moraju se aktivirati krajnji prekidači da bi se traka zaustavila.

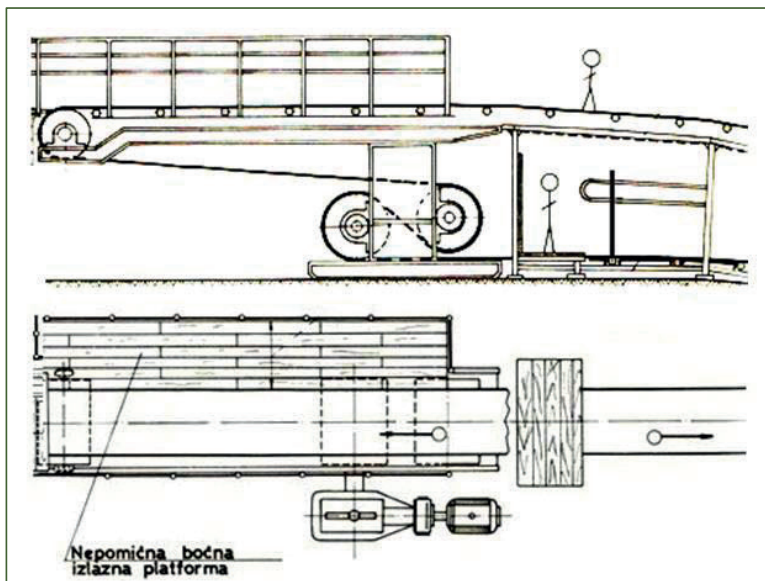
U slučaju kvara na ovim uređajima, pored ovih brana postaviti i otklonske stabilne brane, koja će zbaciti radnika s trake ako prođe kroz prve dvije brane, odnosno kapije. Ova otklonska brana je iza prvih u dužini kočionog puta trake.

Otklonsku branu postaviti da bude bliže nekom otklonskom bubnju trake radi korištenja dijela transporterera sa ravnom trakom. Na ravnoj traci manja je mogućnost da otklonski uređaj podvuče radniku neki dio opreme ili tijela, slike 5., 6. i 7., [4-5].

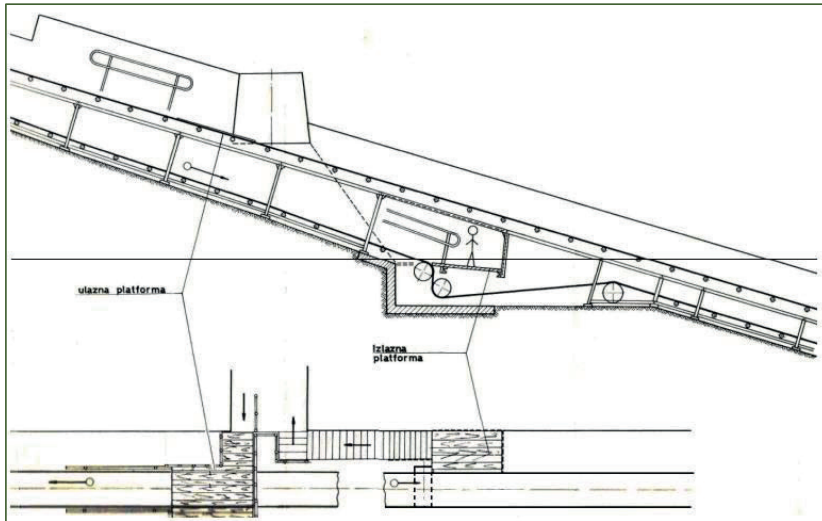


Slika 1. Otklonska brana u jami

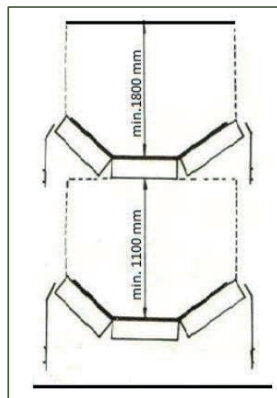
Platforma mora biti besprijekorno osvijetljena. Platforme se s pristupnim putem moraju povezati stepeništem, tako da se onemogućava miješanje radnika koji idu na traku i onih koji silaze sa trake (ulazno i silazno stepenište). Duž transportera treba postaviti potezno uže sa krajnjim prekidačima. U slučaju potrebe zaustavljanja trake u toku rada, povlači se uže i motori staju pod djelovanjem krajnjih prekidača.



Slika 2. Šematski prikaz trakastog transportera sa bočnom izlaznom platformom



Slika 3. Šematski izgled platformi trakastog transportera



Slika 4. Slobodna visina transportne trake kojom se prevoze ljudi

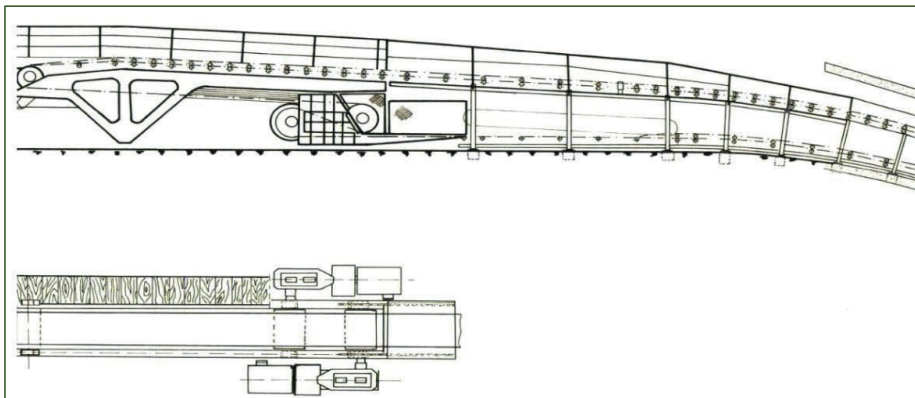
Iznad platforme za stupanje na traku ili silazak s trake na duljini najmanje 8 m u smjeru prevoza slobodna visina iznad trake mora biti najmanje 1,8 m, slika 4.



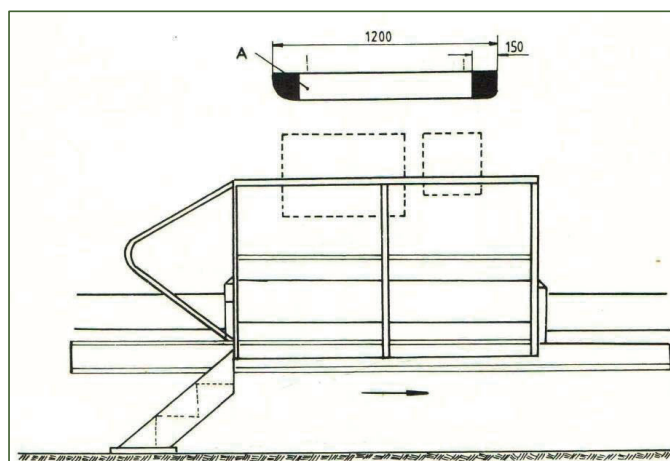
Slika 5. Stepenice i platforma trakastog transportera



Slika 6. Platforma bočna trakastog transportera



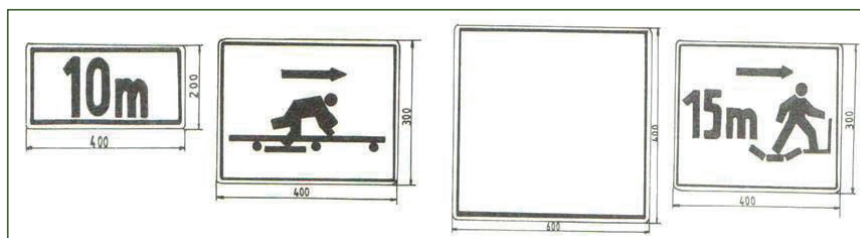
Slika 7. Šematski prikaz ulazno-silazna platforme trakastog transportera



Slika 8. Šematski prikaz ulazne platforme trakastog transportera sa upozoravajućim pločama

3.2. Nailazeća upozorenja

Upravnik pogona, na pogonskim, povratnim i nateznim stanicama je dužan postaviti uputstva, table upozorenja i zabrane, tablu sa tehničkim karakteristikama pogona shodno odredbama Pravilnika o prevozu ljudi i materijala gumenom trakom u podzemnoj eksploataciji (rudarstvu), slike 8. i 9.



Slika 9. Nailazeća upozorenja kod trakastih transportera

3.3. Kontrola i provjera prevoza ljudi trakastim transporterima u Rudnicima s podzemnom eksploatacijom

Transporteri sa trakom moraju se redovno kontrolisati i održavati. Neispravan transporter se ne smije staviti u pokret. Kontrola transporterera vrši se jedanput dnevno prije svakog redovnog prevoza i jedanput nedjeljno. Prije svakog redovnog prevoza moraju se pregledati: trasa po kojoj se prevoze ljudi; traka (da nije oštećena ili da na njoj nema materijala); funkcionisanje svih signalnih uređaja. Jedanput nedjeljno moraju se pregledati: stanje konstrukcije transporterera; pogonska, povratna i zatezna stanica; kočnice, platforme; signalni uređaji. Detaljna kontrola transporterera sa trakom vrši se jedanput godišnje. Svi nalazi pri kontrolnom pregledu unose se u knjigu pregleda, [6, 7].

4. ZAKLJUČAK

Rad je imao za cilj ispitivanje mogućnosti prevoza ljudi u rudnicima sa podzemnom eksploatacijom, sa osvrtom na Jamu „Begići-Bištrani“ Rudnika Kakanj, sa akcentom na sigurnost pri prevozu. Pored samog prevoza ljudi, u pitanju je humanizacija rada i zaštita ljudi-radnika. Najrasprostranjeniji uređaji neprekidnog transporta su trakasti transporteri. Transportne trake moraju ispuniti sljedeće uslove: da su konkavnog oblika, da su široke najmanje 800 mm, da su pojedini djelovi trake spojeni vulkanizacijom, da su bez poprečnih i uzdužnih prslina, da koeficijent sigurnosti prema maksimalnoj sili zatezanja iznosi najmanje 12, računajući razmak ljudi od 5 m i opterećenja 90 kg po osobi. Cijela trasa transporterera sa trakom mora biti osvijetljena. Transporteri sa trakom za prevoz ljudi moraju imati ugrađen uređaj za kontrolu proklizavanja trake na pogonskom bubnju.

5. LITERATURA

- [1] Atić E.: *Prevoz radnika i materijala u rudnicima sa podzemnom eksploatacijom*; Tuzla, Rudarsko-geološki institut i fakultet, 1988.
- [2] Ahmić A.: *Pretovarna i transportna mehanizacija*; Ministarstvo obrazovanja, nauke i sporta R BiH, 1996.
- [3] RP glavnog izvoznog transporterera revira “Begići-Bištrani” ZD RMU “Kakanj” d.o.o., Kakanj, april 2014.
- [4] Pravilnik o tehničkim normativima pri prijevozu ljudi u rudnicima sa podzemnom eksploatacijom mineralnih sirovina horizontalnim i kosim prostorijama (“Službeni list SFRJ”, br. 34/89);
- [5] Pravilnik o tehničkim normativima za prijevoz transporterima sa trakom u rudarstvu (“Službeni list SFRJ”, br. 5/73, 12/74, 4/86 i 4/89) sa izuzetkom odredbi čl. od 23. do 85. i čl. od 90. do 112.;
- [6] https://meh.mas.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2020/03/P2_Trakasti-transporteri-1-2017.pdf,
Pristupljeno 25.09.2024.
- [7] <https://mf.unze.ba/wp-content/uploads/2023/06/PRORACUN-I-PRIMJENA-TRAKASTOG-TRANSPORTERA-U-RUDNIKU-%E2%80%9EKAKANJ-Bajramovic-K.-Bajramovic-I..pdf>,
Pristupljeno 25.09.2024.

UPRAVLJANJE RIZICIMA U ORGANIZACIJI IT SEKTORA

RISK MANAGEMENT IN THE ORGANIZATION OF THE IT SECTOR

Venan Hadžiselimović, prof.dr
Edin Alić, Mr.sc
HIIFA -OIL d.o.o. Tešanj
Bukva br: 10, Tešanj

REZIME

Tehnološki razvoj i fluktuacija zaposlenika predstavljaju izazove i rizike u upravljanju i organizovanju IT sektora u svakoj organizaciji. Tehnološki razvoj sam po sebi donosi brojne prednosti, ali istovremeno i rizike za IT sektor. Zastarjelost tehnologije, složenost novih sistema i problemi sa kompatibilnošću opreme mogu negativno uticati na poslovne procese. Osim toga, nove tehnologije često donose nove sigurnosne rizike jer dovode do novih vrsta cyber napada i ranjivosti novih sistema. Upravljanje rizikom (eng. Risk management), ključni je element poslovnog uspjeha u modernim organizacijama, posebno u IT sektoru, gdje se tehnologije brzo razvijaju, a informacije su ključna imovina. IT sektor se suočava sa raznim izazovima, kao što su sigurnosne prijetnje i potreba za ispunjavanjem zakonskih zahtjeva. To može negativno uticati na stabilnost poslovanja organizacije, učinkovitost procesa, informacionu sigurnost i ukupnu produktivnost. Upravljanje rizicima zahtjeva sveobuhvatan i proaktivan pristup, sa fokusom na fleksibilnost, kontinuirano učenje, i strateško planiranje kako bi se osigurala stabilnost i efikasnost IT sektora. Promjene zaposlenih u IT sektoru predstavljaju još jedan izazov. Odlazak ključnih stručnjaka može rezultirati gubitkom bitnih znanja i vještina, što može narušiti kontinuitet poslovanja i dovesti do kašnjenja projekata. Osim toga, velika fluktuacija može povećati troškove zapošljavanja i obuke te smanjiti ukupnu produktivnost tima. Mjere upravljanja rizicima u IT sektoru podrazumijevaju prepoznavanje, procjenu i kontrolu rizika koji mogu uticati na poslovanje. Proces počinje identifikacijom rizika, koji mogu uključivati tehnološke, sigurnosne, operativne i ljudske resurse. Nakon identifikacije, procjenjuje se vjerojatnost i potencijalni uticaj svakog rizika, što omogućuje njegov prioritet i određivanje odgovarajućih mjera upravljanja. Organizacija i njezino okruženje podložni su stalnim promjenama, rizici se javljaju na operativnoj i strateškoj razini. Posao menadžera je identifikovati i razumjeti rizike kako bi se njima moglo ispravno upravljati. Strategije upravljanja rizikom mogu uključivati izbjegavanje rizika (npr. napuštanje određenih tehnologija), smanjenje rizika (npr. provedba sigurnosnih mjera), prenos rizika (npr. osiguranje ili ugovaranje) i prihvatanje rizika kada su troškovi upravljanja veći od potencijalne štete.

Ključne riječi: rizik, upravljanje rizicima, cyber prijetnje, tehnike upravljanja rizicima, integrirano upravljanje rizicima, strateško planiranje, sigurnost informacija, kontinuitet poslovanja, IT sektor.

SUMMARY

Technological development and employee turnover pose challenges and risks in the management and organization of the IT sector within any organization. Technological advancement brings numerous advantages, but at the same time, it also introduces risks to the IT sector. The obsolescence of technology, the complexity of new systems, and compatibility issues with equipment can negatively impact business processes. Additionally, new technologies often bring new security risks, leading to new types of cyber-attacks and vulnerabilities in new systems. Risk management is a key element of business success in modern organizations, particularly in the IT sector, where technologies evolve rapidly, and information is a critical asset. The IT sector faces various challenges, such as security threats and the need to comply with regulatory requirements. This can negatively affect the stability of an organization's operations, the efficiency of processes, information security, and overall productivity. Risk management requires a comprehensive and proactive approach, focusing on flexibility, continuous learning, and strategic planning to ensure the stability and efficiency of the IT sector. Employee turnover in the IT sector presents another challenge. The departure of key experts can result in the loss of essential knowledge and skills, which can disrupt business continuity and cause project delays. Furthermore, high turnover can increase recruitment and training costs and reduce the overall productivity of the team. Risk management measures in the IT sector involve identifying, assessing, and controlling risks that may affect business operations. The process begins with identifying risks, which can include technological, security, operational, and human resource risks. After identification, the probability and potential impact of each risk are assessed, allowing for prioritization and the determination of appropriate management measures. The organization and its environment are subject to constant change, and risks arise at both the operational and strategic levels. The job of a manager is to identify and understand the risks so they can be properly managed. Risk management strategies may include avoiding risk (e.g., abandoning certain technologies), reducing risk (e.g., implementing security measures), transferring risk (e.g., insurance or contracting), and accepting risk when management costs exceed the potential harm.

Keywords: risk, risk management, cyber threats, risk management techniques, integrated risk management, strategic planning, information security, business continuity, IT sector.

1. UVOD

Upravljanje rizicima predstavlja organizovan proces koji uključuje identifikaciju mogućih opasnosti, procjenu njihovih potencijalnih posljedica i razvoj strategija za njihovu kontrolu. Ovaj princip se koristi u mnogim oblastima, uključujući i IT sektor. Termin "rizik", koji se odnosi na neizvjesnost koja se može kvantitativno izmjeriti, prvi je put uveo američki ekonomista Frank Knight 1921. godine. Rizik uključuje moguće opasnosti i slabosti prisutne u određenim dijelovima organizacije i IT sektora. On se opisuje kao vjerovatnoća da će prijetnja iskoristiti ranjivost organizacije i nanijeti štetu nekom dijelu ili ukupnom sistemu. Kako se broj prijetnji povećava, tako i rizik raste.

Pravilno upravljanje rizicima, posebno u IT sektoru, jedan je od ključnih procesa i na taj način možemo osigurati kontinuitet poslovanja kao i zaštitu informacija koju posjeduje organizacija. Sve počinje ispitivanjem potencijalnih prijetnji i ranjivosti koje bi mogle ugroziti sigurnost ili funkcionalnost IT sektora i organizacije. Nakon identifikacije prijetnji procjenjuje se vjerovatnost i mogući uticaj tih prijetnji na poslovanje, što omogućuje postavljanje prioriteta.

U modernom poslovanju Knightov glavni doprinos u razlikovanju rizika od neizvjesnosti i dalje je važan. Iako su rizici mjerljivi i njima se može upravljati, neizvjesnosti nisu i zahtijevaju fleksibilne strategije. U ovakvom okruženju IT sektor mora upravljati različitim prijetnjama i tehnologijama koje se svakodnevno razvijaju, što znači da upravljanje rizicima postaje sve složenije i zahtijeva proaktivne i prilagodljive pristupe.

1.1. Osnovni koraci upravljanju rizicima u IT sektoru

Osnovni koraci upravljanja rizicima u IT sektoru obuhvataju niz sistemskih aktivnosti koje pomažu organizacijama da identifikuju, analiziraju i kontrolišu rizike, s ciljem smanjenja potencijalnih negativnih posljedica po poslovanje. Ti koraci uključuju:

- **Otkrivanje rizika**

Identifikacija rizika je prvi korak koji često uključuje analizu više faktora kao što su pregled infrastrukture, procesa u organizaciji, ali i vanjskih uticaja koji uključuju promjene zakonske regulative, te procjenu prijetnji koje mogu zadesiti organizaciju.

- **Procjena rizika**

Procjena rizika je proces gdje se svaki rizik rangira prema dva ključna uslova: ozbiljnost i vjerovatnoća. Ozbiljnost (uticaj) se odnosi na štetu koju bi određeni rizik mogao izazvati ako se ostvari. Rizik može prouzrokovati finansijske gubitke, narušiti reputaciju organizacije, prekida kontinuiteta poslovanja i dovesti do pravne odgovornosti. Vjerovatnoća se odnosi na to koliko je vjerovatno da će se rizik ostvariti.

- **Analiza rizika**

Analiza je identifikacija, procjena i rangiranje rizika od kojih informacioni sistem, podaci i infrastruktura organizacije mogu biti ugroženi. Provodi se sa ciljem da se identifikuju oni rizici koji bi, ukoliko bi se ostvarili, mogli ugroziti i stvoriti najveću štetu organizaciji, zatim da se odredi kako ti rizici mogu biti tretirani na najefikasniji način.

- **Planiranje odgovora na rizike**

Planiranje odgovora na rizike je ključna faza upravljanja rizicima u IT-u, gdje se definišu smjernice i strategije koje će se primjeniti kako bi se efikasno upravljalo rizicima. Identifikuje se najbolji pristup za svaki rizik, uzimajući u obzir njegovu ozbiljnost, vjerovatnoću i potencijalni uticaj.

- **Provedba kontrolnih mjera**

Kontrolne mjere imaju za cilj da zaštite infrastrukturu, podatke i sisteme od potencijalnih prijetnji. Ove mjere su usmjerene na prevenciju, otkrivanje i reagovanje na sigurnosne incidente, a mogu uključivati instalaciju antivirus programa, primjenu sigurnosnih protokola i nadogradnje sistema, obuku zaposlenih, rezervne kopije podataka, i druge preventivne radnje.

- **Kontinuirano praćenje**

Ovi neprekidni procesi su od ključne važnosti kako bi organizacije mogle brzo reagovati na nove prijetnje, prilagoditi svoje strategije i osigurati da postojeće mjere budu efikasne u promjenljivim okolnostima. Kontinuirano ažuriranje planova za rizike omogućava organizacijama da ostanu u korak ispred potencijalnih prijetnji. Ovaj postupak omogućava otpornost IT sistema na nove i razvijajuće prijetnje i samim tim i stabilnost poslovanja.

2. KATEGORIJE RIZIKA U IT SEKTORU

Rizici u IT sektoru mogu se podijeliti u nekoliko ključnih kategorija, od kojih svaka pokriva specifične prijetnje i izazove sa kojima se organizacija može suočiti. Ključne kategorije rizika u IT sektoru:

1. **Organizacijski rizici** - neusaglašenost IT i poslovnih ciljeva, greške i prekidi u poslovanju dijela ili ukupnog sistema.
2. **Finansijski rizici** - potencijalni gubitci ili dodatni troškovi.
3. **Bezbjedonosni rizici** – cyber napadi, zlonamjerni softver, neovlašteni pristup.
4. **Tehnički rizici** – kvarovi u hardveru, softveru, mreži, nekompatibilnost.

5. **Ljudski rizici** – greške zaposlenih, nepoštivanje propisanih procedura, ucjene i unutrašnje prijetnje.
6. **Regulatorni rizici** – neusklađenost sa zakonima i standardima (GDPR, ISO)



Slika 1. Kategorije rizika u IT sektoru

2.1. Organizacijski rizici

Organizacijski rizik u IT sektoru postaje sve važniji za moderno poslovanje, posebno sa razvojem tehnologije i digitalne transformacije. Preduzeća moraju paziti na organizacijske rizike kako bi osigurala stabilnost poslovanja i uspjeh u ostvarivanju strateških ciljeva. U ovom smislu posebno su važni rizici vezani za nedovoljno upravljanje projektima, nedostatak resursa i loši planovi za oporavak i kontinuitet poslovanja. Okviri za upravljanje IT rizicima i primjena odgovarajućih strategija ključni su za usklađivanje IT poslova sa poslovnim ciljevima te smanjenje izloženosti rizicima. Jedan od najčešćih organizacijskih rizika u IT sektoru je neadekvatno upravljanje projektima.

Loše planiranje projekata, neadekvatne procjene resursa i rokova, kao i slaba koordinacija timova često dovode do kašnjenja, prekoračenja troškova i čak neuspjeha projekta. Ova vrsta rizika ima ozbiljne posljedice. Prije svega, postoji realna prijetnja stabilnosti preduzeća, jer ona prvenstveno znači ekonomske gubitke, kao i gubitak ugleda na tržištu. Osim toga, neuspješni projekti negativno utiču na povjerenje klijenata, što u konačnici dovodi do smanjenja konkurentne sposobnosti cijelog preduzeća.

Ograničeni resursi i manjak kvalificiranih stručnjaka mogu ozbiljno ugroziti pravovremenu isporuku proizvoda i usluga. Preduzeća koja ne uspiju osigurati potrebne resurse rizikuju smanjenje produktivnosti, neuspjeh projekata te pad ukupne kvalitete svojih usluga. Sposobnost organizacije da IT rizike pretvori u konkurentne prednosti ovisi o dobrim praksama upravljanja i procjenama rizika[1]. U današnjem dinamičkom IT okruženju, krize kao što su cyber napadi ili prirodne katastrofe su opasnosti koje mogu uništiti poslovanje. Organizacije bez odgovarajućih planova za oporavak i osiguranje kontinuiteta poslovanja suočit će se sa dugotrajnim prekidima rada, gubitkom podataka te ozbiljnim finansijskim

štetama. Organizacije koje se ističu u IT upravljanju mogu učinkovitije ublažiti rizike usklađivanjem prava i odgovornosti donošenja odluka u upravljanju rizikom [2].

2.2 Finansijski rizici

Finansijski rizici mogu imati dugoročne posljedice jer često proizlaze iz brzih tehnoloških promjena i složenosti projekata, koji zahtijevaju stalna ulaganja i stvaraju neizvjesnost u dugoročnim tokovima prihoda[3]. Nedostatak kapitala predstavlja jedan od glavnih finansijskih rizika koji može onemogućiti ulaganje u nove projekte, upravljanje poslovanjem ili zapošljavanje stručnjaka, što direktno može uticati na konkurentnost i sposobnost same organizacije da inovira.

IT sektor često se suočava sa finansijskim rizicima zbog kompleksnosti projekata sa nepredvidivim promjenama u veličini i trajanju. Proširenje opsega projekta, gde neočekivane promjene ili dodatni zahtjevi dovode do povećanja troškova i vremenskog okvira, što premašuje prvobitno planirani budžet predstavlja jedan od najčešćih finansijskih rizika. Ovo može otežati upravljanje jer ograničenja budžeta ili nekontrolisano širenje obima projekta dovodi do dodatnih troškova koji produžavaju rokove i povećavaju finansijski pritisak u organizaciji, koji mogu dovesti do nerealnih očekivanja menadžementa i menadžera[4].

Kako bi se smanjili finansijski rizici u IT sektoru, organizacije treba da primjene odgovarajuće strategije za upravljanje rizicima kao što su:

- **Diversifikacija prihoda:** Razvijanje različitih proizvoda i usluga, organizacija može smanjiti zavisnost od jednog izvora prihoda, što doprinosi stabilnosti.
- **Pravilno planiranje troškova:** Pažljivo upravljanje troškovim omogućava bolju kontrolu nad finansijskim tokovima.
- **Outsourcing i optimizacija:** Kada se pravilno sprovede, outsourcing može smanjiti operativne troškove i omogućiti organizaciji da se fokusira na svoje osnovne kompetencije.

Dugoročno, finansijski pritisak može ugroziti planiranje i upravljanje kapitalom, što u kombinaciji sa visokim fiksnim troškovima može izazvati poteškoće u dugoročnom održavanju likvidnosti i može uticati na donošenje strateških odluka. Finansijski rizici mogu biti značajan izazov, ali uz adekvatno planiranje, diversifikacija prihoda i pažljivo praćenje troškova, negativni efekti ovih rizika mogu biti značajno ublaženi. Organizacije mogu postići stabilnost, održivost i dugoročni razvoj kroz odgovarajuće strateško planiranje i efikasno upravljanje rizicima. Efikasno finansijsko upravljanje u IT projektima ključno je za izbjegavanje prekoračenja proračuna i osiguravanje da projekat isporučuje vrijednost proporcionalnu svojim troškovima[5].

2.3 Bezbjedonosni rizici

U savremenom digitalnom razvoju, IT sektor postaje ključan za rad kako privatnih organizacija, tako i vladinih institucija, zahvaljujući stalnom tehnološkom napretku i širokoj upotrebi informacionih sistema. Prijetnje koje mogu ugroziti sigurnost informacionih sistema, mreža, podataka i aplikacija predstavljaju bezbjedonosne rizike u IT sektoru i organizaciji. Organizacije koje ne implementiraju osnovne mjere zaštite podataka suočavaju se sa povećanim rizikom od cyber napada koji mogu ugroziti njihovu reputaciju i operativnu efikasnost [6].

Westerman i Hunter naglašavaju da sigurnosni rizici u IT-u nisu samo tehnička pitanja, već i poslovni rizici koji zahtijevaju pozornost menadžera. Oni tvrde da loše upravljanje sigurnosnim rizicima može dovesti do značajnih financijskih gubitaka i pravnih posljedica. Kako bi ublažile te rizike, organizacije moraju usvojiti sveobuhvatne sigurnosne okvire koji integriraju upravljanje rizikom sa poslovnom strategijom, osiguravajući da su sigurnosne mjere usklađene sa organizacijskim ciljevima[1]. Sigurnosni okviri u IT sektoru predstavljaju niz politika, standarda i procedura koje organizacije primenjuju za identifikaciju, procjenu i upravljanje rizicima u informacionim sistemima. Ovi okviri omogućavaju organizacijama da smanje rizike, zaštite vrijedne informacije i očuvaju kontinuitet poslovanja[7].

Među najvažnijim sigurnosnim okvirima koji se primenjuju u IT sektoru su:

- **NIST (National Institute of Standards and Technology) Cybersecurity Framework** – Okvir koji je razvijen od strane NIST-a i koristi se širom svijeta kao standard za upravljanje digitalnom bezbjednošću.
- **ISO/IEC 27001** - Međunarodni standard za upravljanje informacionom bezbjednošću. Ovaj standard postavlja zahtjeve za uspostavljanje, implementaciju, održavanje i stalno unapređenje.
- **COBIT (Control Objectives for Information and Related Technologies)** - COBIT se fokusira na postizanje ciljeva usklađenosti između IT i poslovnih ciljeva, istovremeno obezbeđujući kontrolu rizika.
- **CIS Controls (Center for Internet Security Controls)** - CIS kontrolni okviri su skup najboljih praksi za unapređenje digitalne bezbjednosti. Oni pružaju smjernice za zaštitu sistema i podataka.
- **Zero Trust arhitektura** - Zero Trust (nulta vjera - povjerenje) je relativno nov pristup bezbjednosti koji polazi od principa da nijedan subjekt, bilo unutar ili izvan organizacione mreže, ne treba automatski smatrati pouzdanim.
- **GDPR (General Data Protection Regulation)** - Opšta uredba o zaštiti podataka Europske unije, koja je stupila na snagu 25. maja 2018. godine. Cilj ove uredbe je zaštita privatnosti i ličnih podataka građana EU i EEA (Evropski ekonomski prostor) te jačanje prava pojedinaca u vezi sa njihovim podacima u digitalnom dobu.

2.4 Tehnički rizici

IT sektor predstavlja jedan od osnovnih procesa za rad velikog broja organizacija. Tehnička i programska rješenja ovog sektora služe kao infrastruktura za skladištenje, obradu i razmjenu informacija. Kao i drugi dijelovi organizacije IT sektor se suočava sa brojnim tehničkim rizicima koji mogu značajno ugroziti poslovanje. Ovi rizici mogu uticati na stabilnost, efikasno izvršavanje zadataka i sigurnost IT sistema, a njihova pojava može prouzrokovati ozbiljne posledice.

Hubbard ističe da mnoge organizacije podcjenjuju tehničke rizike zbog neadekvatnih kvantitativnih procjena. On tvrdi da se neizvjesnošću koja okružuje tehničke rizike, posebno u novim tehnologijama, može učinkovitije upravljati korištenjem kvantitativnih modela rizika. Ovi modeli omogućuju organizacijama predviđanje potencijalnih kvarova sistema, izračunavanje njihove vjerovatnosti i procjenu uticaja na poslovanje. Hubbardov pristup

naglašava potrebu za metodama koje se temelje na podacima za bolje razumijevanje i ublažavanje tehničkih rizika u IT okruženjima[8].

Najčešći tehnički rizici u IT sektoru:

- **Kvarovi tehničke opreme**
Tehnička oprema kao što su serveri, mrežna oprema, diskovi za skladištenje podataka i računari mogu doživjeti kvarove zbog starosti, lošeg održavanja ili fizičkih oštećenja.
- **Programski kvarovi**
Programi mogu imati greške u kodu, sigurnosne propuste ili probleme sa kompatibilnošću, što može prouzrokovati nefunkcionalnost sistema.
- **Sigurnosne ranjivosti**
Tehničke ranjivosti kao što su neispravne konfiguracije mreža, nedovoljna enkripcija podataka ili slaba zaštita API-ji mogu omogućiti napadačima da pristupe sistemu ili izvrše napad.
- **Kompatibilnost opreme**
Kada se vrši integracija različitih komponenti ili programa, problemi sa kompatibilnošću mogu uzrokovati greške u radu ili nemogućnost razmjene podataka.
- **Gubitak podataka**
Gubitak podatak se može sediti zbog grešaka u programskim rješenjima, neadekvatnim kopijama podataka, greškama u migraciji podataka ili samog napada.
- **Nedostatak automatizacije**
Automatizacija u održavanju, ažuriranju i nadzoru opreme i programskih rješenja može značajno smanjiti tehničke rizike dok ručno upravljanje sistemima može povećati rizik od grešaka.

2.5 Ljudski rizici

Ljudski resursi su ekonomski pojam koji se odnosi na radnu snagu u organizacijama, a obuhvataju vještine i sposobnosti zaposlenih. Iz toga proizlazi da su ljudski resursi važni za uspjeh IT sektora, nove tehnologije zavise od stručnjaka koji ih razvijaju, implementiraju i održavaju. Upravljanje ljudskim rizicima postaje sve složenije zbog tehnološkog napretka, nedostatka kvalifikovanih kadrova, fluktuacije zaposlenih u organizacijama, i potrebe za stalnim usavršavanjem. IT sektor, kao jedna od najbrže rastućih grana u organizaciji, suočava se sa ozbiljnim prijetnjama i greškama koje dolaze od zaposlenih ili drugih osoba sa pristupom IT sistemima i mrežama. Zaposlenici često predstavljaju kritični segment u IT procesima i bezbjednosti. Zaposleni u IT sektoru suočavaju se sa jedinstvenim izazovima zbog brzog tehnološkog razvoja, što značajno povećava rizike za kompanije koje neuspjevaju sa unapređenjem vještina kod zaposlenih kako bi se održao korak sa inovacijama na tržištu[9].

Najčešći ljudski rizici u IT sektoru:

- Nedovoljna obuka i edukacija zaposlenih.
- Ljudske greške u radu.
- Nepoznavanje ili zanemarivanje sigurnosnih protokola.
- Unutrašnje prijetnje.

- Preopterećenost i stres na radnom mjestu.
- Neadekvatna komunikacija među zaposlenicima.
- Neetično ponašanje.

Ljudske greške, nemar ili zlonamjerne radnje mogu dovesti do ozbiljnih sigurnosnih propusta, gubitaka podataka i prestanka kontinuiteta poslovanja. Ljudski rizici su često uzrokovani sa nekoliko faktora i kombinacijom nedostatka obuke, stresa, loše komunikacije i nepoznavanja sigurnosnih standarda. Kako bi se ovi rizici sveli na minimum, organizacije moraju ulagati u edukaciju zaposlenih, uspostaviti jake sigurnosne protokole i osigurati da zaposlenici budu svjesni posljedica svojih akcija.

2.6 Regulatorni rizici

IT sektor, poput mnogih drugih sektora, suočava se sa značajnim regulatornim rizicima. Organizacije teže uspostavljanju jedinstvenih pravila na globalnom nivou, dok lokalni i međunarodni zakoni postaju sve kompleksniji, što stvara izazove za kompanije u pogledu usklađivanja sa propisima. Posebno se odnosi na regulative o zaštiti podataka, kao što je Opšta uredba o zaštiti podataka (GDPR).

Shinde ističe da regulatorni rizici mogu značajno utjecati na organizacijske operacije, posebno za one koji rukuju osjetljivim podacima. Nepoštivanje propisa o zaštiti podataka može dovesti do istraga, pravnih postupaka i kazni koje mogu destabilizovati finansijski položaj organizacije[10]. Kršenje ovih propisa može dovesti do ozbiljnih posljedica, a mnoge velike i male kompanije su već osjetile udar ovih pravila u vidu visokih kazni. Jedan od najvećih izazova u IT sektoru je cyber sigurnost. Vlade širom zahtjevaju implementaciju strogih mjera za zaštitu informacionih sistema i podataka, kako bi se spriječili hakerski napadi. Ove odbrane nisu samo ključne za poslovanje, već i za zaštitu od potencijalno katastrofalnih posljedica, poput krađe osjetljivih podataka. Da bi se smanjili regulatorni rizici, kompanije moraju razvijati interne politike i procedure koje će usklađivati sa zakonima. Proaktivno upravljanje ovim rizicima može donijeti brojne prednosti, uključujući veću sigurnost i pouzdanost poslovanja. Pratiti zakonodavne promjene i prilagoditi poslovne modele postaje ključan korak ka dugoročnoj održivosti i uspjehu u IT sektoru.

2.7 Kategorije rizika u IT sektoru sa problemima i rješenjima

Vrsta rizika	Problemi	Rješenje
Organizacijski rizici	Loša organizacijska struktura, nejasne odgovornosti, slaba komunikacija. Nedostatak koordinacije i neefikasni procesi.	Definisanje jasne organizacione strukture, odgovornosti i unapređenje komunikacije. Optimizacija internih procesa i primjena alata za bolju koordinaciju.
Finansijski rizici	Problemi sa likvidnošću, loše planiranje budžeta. Promjene na tržištu, fluktuacija prihoda.	Razvijanje planova za upravljanje novčanim tokovima, diversifikacija prihoda, stvaranje rezervi. Osiguranje protiv tržišnih rizika i investiranje u stabilnije izvore prihoda.
Sigurnosni rizici	Fizičke prijetnje, krađa imovine, cyber napadi. Nezaštićeni podaci, neodgovarajući sigurnosni protokoli.	Implementacija sigurnosnih sistema (fizičkih i cyber), edukacija zaposlenih, redovni sigurnosni auditi. Uvođenje enkripcije, jačanje IT sigurnosti, praćenje sigurnosnih prijetnji i redovno ažuriranje zaštitnih mjera.
Tehnički rizici	Zastarjela tehnologija, tehnički kvarovi. Slaba integracija tehnoloških sistema, zastarjeli softver.	Investiranje u IT infrastrukturu, redovno održavanje i unapređenje sistema. Uvođenje modernih softverskih rješenja i sistema za automatizaciju.
Ljudski rizici	Nedostatak kvalifikovanih kadrova, visoka stopa fluktuacije zaposlenih. Loša motivacija, slaba radna kultura.	Investiranje u obuku, razvoj talenata, programi za zadržavanje zaposlenih. Stvaranje pozitivne radne kulture, jasna komunikacija ciljeva, razvoj motivacijskih sistema.
Regulatorni rizici	Nepoštivanje zakonskih regulativa, visoke kazne. Promjene zakonskih okvira, neadekvatna priprema za nove regulative.	Praćenje zakona i regulativa, angažovanje stručnjaka za usklađenost (compliance), redovno revidiranje politika i procedura. Uvođenje procedura za praćenje promjena u zakonodavstvu, proaktivno prilagođavanje promjenama.

Tabela 1. Kategorije rizika u IT sektoru sa problemima i rješenjima

Ovaj pregled omogućava jasan uvid u različite vrste rizika i njihove potencijalne posljedice po poslovanje organizacije. Svaki rizik zahtijeva poseban pristup u upravljanju kako bi se minimizovale njegove negativne posljedice.

3. ZAKLJUČAK

Organizacijski, finansijski, sigurnosni, tehnički, ljudski i regulatorni rizici predstavljaju ozbiljne izazove za IT sektor, a njihovo pravilno upravljanje ključno je za dugoročni uspjeh organizacija. Svaki od ovih rizika ima potencijal da ugrozi stabilnost poslovanja, finansijsku održivost, kao i reputaciju organizacije. Nedovoljno upravljanje projektima i loše procjene resursa mogu dovesti do kašnjenja, prekoračenja troškova i neuspjeha projekta, dok finansijski rizici, izazvani brzim tehnološkim promjenama, stvaraju pritisak na budžet i resurse.

Sigurnosni rizici, poput cyber napada, mogu prouzrokovati značajne gubitke podataka i narušiti kontinuitet poslovanja, dok tehnički rizici, kao što su kvarovi opreme i programski problemi, ugrožavaju stabilnost IT infrastrukture. Ljudski faktori, kao što su greške zaposlenih, nedostatak obuke i neadekvatna komunikacija, dodatno povećavaju izloženost organizacija potencijalnim prijetnjama.

Regulatorni rizici, posebno usklađivanje sa propisima poput GDPR-a, postavljaju dodatne zahtjeve za organizacije. Nepridržavanje ovih propisa može rezultirati visokim kaznama i značajnim posljedicama za sam ugled. Zbog toga organizacije moraju ulagati u jačanje svojih internih politika i strategija za upravljanje rizicima.

Proaktivno upravljanje rizicima omogućava organizacijama da smanje negativne posljedice, osiguraju kontinuitet poslovanja i ostvare dugoročni rast. Diversifikacija prihoda, pravilno planiranje troškova i ulaganje u edukaciju zaposlenih pomažu organizacijama da se efikasnije suoče sa rizicima. U konačnici, uspješne organizacije prepoznaju rizike kao prilike za poboljšanje i inovaciju, što ih čini otpornijima i konkurentnijima na tržištu.

4. REFERENCE

- [1] Westerman, G., & Hunter, R. (2007). *IT Risk: Turning Business Threats into Competitive Advantage*. Harvard Business Review Press, pp. 45-58, 101-120.
- [2] Weill, P., & Ross, J. W. (2004). *IT Governance: How Top Performers Manage IT Decision Rights for Superior Results*. Harvard Business Review Press, pp. 75-90.
- [3] Varian, H. R., Farrell, J., & Shapiro, C. (2004). *The Economics of Information Technology: An Introduction*. Cambridge University Press, p. 63.
- [4] Rogers, D. L. (2016). *The Digital Transformation Playbook: Rethink Your Business for the Digital Age*. Columbia Business School Publishing, p. 135.
- [5] Blackstaff, M. (2002). *Financial Management of IT Projects*. Butterworth-Heinemann, p. 89.
- [6] Schou, C. D., & Shoemaker, D. (2020). *Information Assurance for the Enterprise: A Roadmap to Information Security*, (2nd Edition), p.315.
- [7] Whitman, M. E., & Mattord, H. J. (2021). *Principles of Information Security* (7th Edition), p. 183.
- [8] Hubbard, D. W. (2020). *The Failure of Risk Management: Why It's Broken and How to Fix It* (2nd ed.). Wiley, pp. 87-105.
- [9] Michael Armstrong. (2017). *Armstrong's Handbook of Human Resource Management Practice*, (14th Edition), p. 412.
- [10] Shinde, A. V. (2021). *Cyber Risk Management: Prioritize Threats, Identify Vulnerabilities, and Apply Controls*. Apress, pp. 185-205.

MJERE ZAŠTITE I UPRAVLJANJE RIZICIMA PRILIKOM PREVOZA RADNIKA TRAKASTIM TANSPORTERIMA U JAMI

PROTECTION MEASURES AND RISK MANAGEMENT RELATING TO THE TRANSPORTATION OF WORKERS BY BELT TRANSPORTERS IN THE PIT

Doc.dr.sc. Kasim Bajramović, dipl. inž. rudarstva
Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet Zenica

Irhad Bajramović, BA ing. informacionih tehnologija
J.P. Elektroprivreda BiH d.d. Sarajevo - Termoelektrana Kakanj

REZIME

Obezbjediavanje odgovarajućih mjera zaštite podrazumijeva aktivnosti koje se mogu planirati. Svim rizicima neophodno je upravljati, od nastanka nezgoda na radu pa do kraja, prije svega zbog humanizacije rada, jer je radnik najvrjedniji resurs koji uvijek treba da bude na prvom mjestu.

Bezbjednost pri radu sa trakastim transporterima dobiva sve više na značaju, posebno uvođenjem OHSAS menadžment sistema radi smanjenja rizika od nastanka nezgoda, kako sa aspekta zaposlenih tako i cijelog Rudnika.

U radu će biti prikazani svi aspekti mjera zaštite za uspješno upravljanje rizicima prilikom korištenja trakastih transportera u jami „Begići-Bištrani“ Rudnika Kakanj.

Ključne riječi: zaštita, radnik, rizik, trakasti transporteri

ABSTRACT

Providing appropriate protection measures implies activities that can be planned. It is necessary to manage all risks, from the occurrence of accidents at work to the end, primarily due to the humanization of work, because the worker is the most valuable resource that should always come first.

Safety when working with belt conveyors is gaining more and more importance, especially with the introduction of the OHSAS management system in order to reduce the risk of accidents, both from the perspective of employees and the entire Mine.

The paper will present all aspects of protection measures for successful risk management when using belt conveyors in the "Begići-Bištrani" pit of the Kakanj Mine.

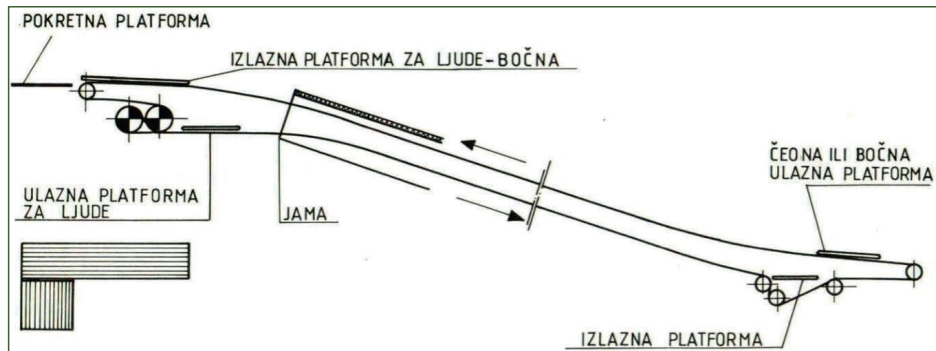
Keywords: protection, worker, risk, belt conveyors

1. UVOD

Trakasti transporteri su sredstva kontinuiranog transporta čijoj bezbjednosti se ne poklanja dovoljno pažnje, već se isključivo posmatra sama proizvodnja, koja se najčešće odvija istovremeno sa rukovanjem trakastim transporterima, zbog čega bezbjednost pada u sjenku same proizvodnje [1].

Svim rizicima prilikom prevoza radnika u jami trakastim transporterima neophodno je upravljati, od mogućnosti nastanka nezgoda na radu pa do kraja, prije svega zbog humanizacije rada, jer je radnik najvrjedniji resurs koji uvijek treba da bude na prvom mjestu. Potreba za upravljanjem rizicima nameće se i iz razloga izbjegavanja višestrukih troškova povezanih sa nezgodom na radu, od kojih mnogi ostanu zanemarljivi i nevidljivi za Rudnike, a prisutni su i odražavaju se na uspješnost poslovanja Rudnika.

Rizici od nastanka nezgoda i povređivanja radnika prilikom rukovanja trakastim transporterima, dovode do brojnih gubitaka koji su povezani samo sa jednom nezgodom, zbog čega se ovom aspektu mora posvetiti veća pažnja, prije svega zbog humanizacije rada, a potom radi eliminisanja nepotrebnih troškova i povećanja produktivnosti u radu.



Slika 1. Šema trakastog transportera za izvoz materijala i prevoz ljudi [1]

Prvi propisi o tehničkim mjerama i zaštiti na radu pri rudarskim podzemnim radovima, u kojima se spominje problem prevoza radnika u jami pojavili su se 1967. godine (Sl. list SFRJ broj 2/67, 35/67. i dopune 6/70 i 9/71).

Danas je na snazi „Pravilnik o tehničkim normativima pri prijevozu ljudi u rudnicima sa podzemnom eksploatacijom mineralnih sirovina horizontalnim i kosim prostorijama (\"Službeni list SFRJ\", br. 34/89)“ [5].

2. MJERE ZAŠTITE PRILIKOM PREVOZA RADNIKA TRAKASTIM TRANSPORTERIMA, PO PRAVILNICIMA

2.1. Opće mjere zaštite

Način i režim rada potrebno je obraditi uputstvima:

- Uputstvo za način i režim rada trakastog transportera u toku postavljanja i nakon postavljanja opreme.

Za transport ljudi i materijala tehnički rukovodilac je dužan izdati uputstva [4]:

- Uputstvo za prevoz ljudi, materijala i opreme.
- Uputstvo za vršenje pregleda i održavanja sigurnosnih uređaja, kao i rukovanja trakastim transporterom.

8. naučno-stručna konferencija sa međunarodnim učešćem „ODRŽAVANJE 2024“ Zenica, BiH, 13. i 14. novembar 2024.

- Uputstvo za rukovanje aparatima za gašenje požara.
- Uputstvo za održavanje i kontrolu signalnih uređaja.
- Uputstvo o evidenciji i pregledu trakastog transporterera za prevoz ljudi.

Uskladiti plan odbrane od potencijalnih opasnosti, s obzirom na prevoz ljudi i materijala trakastim transporterom.

Rukovanje postrojenjima za transport, mogu vršiti lica koja su za to obučena i imaju položen ispit.

Obezbijediti odgovarajući prostor za ulazak i izlazak iz trakastog transporterera.

Obezbijediti prostoriju za smještaj radnika u prevoznom sredstvu i ugodnu i sigurnu vožnju.

Obezbijediti sigurnu intervenciju isključenja sistema iz rada u slučaju potrebe.

Obezbijediti stalnu funkcionalnost rada i korištenja sistema.

Na svim mjestima gdje se montira oprema, moraju postojati protivpožarni aparati za početno gašenje požara.

Svi rotirajući elementi na postrojenjima moraju biti zaštićeni.

Obavezna je kontrola ispravnosti postrojenja pri dolasku na radno mjesto i otklanjanje uočenih nedostataka.

Pri otklanjanju nedostataka neophodno je isključiti postrojenja sa izvora napajanja da ne bi došlo do nekontrolisanog pokretanja.

Za puštanje postrojenja u rad neophodna je odgovarajuća svjetlosna i zvučna signalizacija koja se instalira na pogonu i odgovarajućim udaljenostima duž trase.

Obavezno pridržavanje Pravilnika o sredstvima lične zaštite na radu i ličnoj zaštitnoj opremi (“Sl. list SFRJ” br. 35/69).

Obavezno pridržavanje Pravilnika o tehničkim mjerama i zaštiti na radu pri rudarskim podzemnim radovima (“Sl. list SFRJ” br. 11/67; 35/67; 60/70; 9/71; 3/73 i 5/73).

Obavezno pridržavanje Pravilnika o tehničkim normativima za prevoz transporterima sa trakom u rudarstvu (“Sl. list SFRJ” br. 5/73; 12/74; 4/86 i 4/89).

Obavezno pridržavanje Pravilnika o tehničkim normativima za podzemnu eksploataciju ugljena (“Sl. list SFRJ” br. 4/89; 45/89; 3/90 i 54/90).

2.2. Posebne mjere zaštite

Radnici se smiju voziti prevoznim sredstvima samo u za to određeno vrijeme.

Zabranjen je prevoz ukoliko nadzorno osoblje nije lično uvjeren da je trakasti transporter spreman za prevoz. Prevoz se obustavlja ukoliko inspeksijsko osoblje u toku vožnje primijeti neke nepravilnosti u načinu korištenja trakastog transporterera [2].

Upozoravati ljude na moguće posljedice kod prevoza, ako je trakasti transporter prljav, vlažan i kada je garderoba radnika mokra.

Posebno urediti i osigurati mjesta ispod bubnjeva kod bočnog izlaza kako ljudi ne bi produžili vožnju pod bubanj u slučaju neblagovremenog izlaska.

Transportni putevi ne smiju biti zakrčeni repro materijalima i opremom.

Prostorije kojima se obavlja prevoz, moraju biti propisanih veličina i stalno čiste.

Po pravilu, trakasti transporter ne prevozi materijal kad prevozi ljude, niti se istom prostorijom obavlja i prevoz drugim prevoznim sredstvima.

Radnik u trakastom transporteru mora zauzeti stabilan položaj i ne smije imati ekstremitete van trakastog transporterera. Naročito je važno da radnik, pri prevozu trakastim transporterima, bude licem okrenut u smjeru vožnje.

Upravnik pogona zabranjuje prevoz ljudi ako je trakasti transporter neispravan, ili ako na trakastom transporteru, npr. na traci, ima komada uglja ili jalovine. Kod prevoza trakastim transporterima, drugi dozirni transporteri moraju biti blokirani, a presipišta primjerena prevozu ljudi.

Plan odbrane i akcije spasavanja za slučaj potencijalnih opasnosti ažurirati u smislu izmjena u sistemu transporta.

8. naučno-stručna konferencija sa međunarodnim učešćem „ODRŽAVANJE 2024“ Zenica, BiH, 13. i 14. novembar 2024.

Pri montaži opreme na trakaste transportere, mora se voditi računa o propisanim minimalnim rastojanjima od bokova i krovine, kao i funkcionalnom prelazu i prolazu ljudi. Rukovanje transporterima mogu obavljati samo za to stručno osposobljena lica. Za vrijeme rada transportera na njima se ne mogu obavljati nikakvi radovi. Na svim pogonskim stanicama transportera moraju biti postavljeni signalni uređaji. Ako signalni uređaji nisu ispravni transport se ne smije koristiti. U neposrednoj blizini elektromašinskih postrojenja, uređaja i instalacija moraju se postaviti odgovarajući aparati za gašenje požara. Aparate za gašenje požara ili hidrante postaviti na svakih 50 m duž transportera sa gumenom trakom.

2.3. Mjere zaštite u izgradnji transportera

Svi materijali koji se ugrađuju i koji su ugrađeni moraju imati tvorničke ateste.

Vizualnom kontrolom i pregledom materijala i opreme koja se ugrađuje konstatovati eventualne nedostatke i deformacije te iste otkloniti prije ugradnje. Ako je na licu mjesta nemoguće otkloniti uočene nedostatke onda treba izvršiti zamjenu dijela ili materijala koji se ugrađuju.

Materijal i oprema se moraju u potpunosti uraditi u tvornici, prilikom ugradnje, odgovarajućim uređajima spustiti u jamu na određeno mjesto i izvršiti montažu, pošto je jama metanskog režima uređaji i pomagala za transport i montažu moraju biti atestirani kako se ne bi doveli u opasnost životi radnika na rekonstrukciji transportera.

U toku rekonstrukcije izvođač je dužan voditi dnevnik izvođenja radova koji mora biti ovjeren od strane Rudnika (lica koje je Rudnik odredio za nadzornog organa). Paralelno ovome prikupljati ateste materijala i opreme kao i varioca radi tehničkog prijema [4].

Nakon završetka rekonstrukcije i probnog rada a prije puštanja u proizvodni proces, investitor je dužan obezbijediti ocjenu podobnosti za puštanje u rad od strane ovlaštene ustanove, te odobrenje za upotrebu transportnog sistema od ministarstva za rudarstvo i energetiku.

Nakon završetka izgradnje, upravnik pogona, na pogonskim, povratnim i nateznim stanicama je dužan postaviti uputstva, table upozorenja i zabrane i tablu sa tehničkim karakteristikama pogona shodno odredbama Pravilnika o prevozu ljudi i materijala gumenom trakom u podzemnoj eksploataciji (rudarstvu) [5].

2.4. Mjere zaštite u eksploataciji

Transporterima sa gumenom trakom mogu rukovati i iste održavati samo lica koja su za to stručno osposobljena i kojima je rudarska organizacija priznala stručnu spremu za obavljanje tog posla, a koje u tu svrhu odredi upravnik pogona „Haljinići“, odnosno lice koje on ovlasti.

Izmjene na transporterima mogu se vršiti samo na temelju pismenog ovlaštenja upravnika pogona. Za bitne izmjene potrebna je odgovarajuća projektna dokumentacija ovjerena od nadležnih lica.

Vraćanje trakastog transportera pod punim opterećenjem u slučaju nestanka električne energije i otkazivanja hidraulične spojnice onemogućeno je zadržaćem (mehaničkom kočnicom) koja mora biti montirana na kućištu prvog stepena reduktora.

U slučaju potrebe prelaza ljudi preko trakastog transportera, potrebno je omogućiti prelaz pomoću mostova i stepenica sa rukohvatom za pridržavanje na mjestima prema Tehničkim propisima. Prelazi preko transportera moraju biti osvijetljeni. Između poda na mostu i krovine mora biti obezbijedena minimalna visina 1200 mm. Mostovi moraju imati dovoljnu širinu da bi se preko njih moglo nesmetano prelaziti, a pod mosta mora biti urađen od rebrastog lima da ne bude klizav. Na mostu se ne smije nalaziti nikakav materijal. Visina od najisturenijeg dijela transportera do poda mosta mora biti minimalne visine 700 mm i obilježen upozorenjem zbog prevoza ljudi na traci.

Radi bezbjednog i sigurnog prevoza ljudi trakastim transporterom, potrebno je ugraditi duž trakastog transportera potezno uža sa sklopkama za zaustavljanje istog sa svakog mjesta po čitavoj dužini transportera.

Obezbijediti minimalna odstojanja isturenih dijelova transportera prema važećim propisima.

Na ulaznom dijelu trake za ljude i na izlaznom dijelu (platforme) potrebno obezbijediti platforme sa stepenicama i rukohvatom za držanje određenih dimenzija kako je to Pravilnikom o prevozu ljudi trakastim transporterom predviđeno.

Pod ulazne i izlazne platforme mora biti urađen od rebrastog lima kako ne bi došlo do klizanja po istom. Također je potrebno obezbijediti pravilan profil hodnika na mjestu ulaza i izlaza za normalno odvijanje procesa.

Na presipnim mjestima uraditi usmjerena korita kako bi se spriječilo rasipanje materijala. Stalna radna mjesta kao i prostor koji služi za redovito kretanje ljudi kod stacionarnih transporterera moraju biti osvijetljena stalnom rasvjetom.

Rotirajući dijelovi transporterera moraju biti zaštićeni limom ili žičanim pletivom.

Krajevi gumene transportne trake moraju biti spojeni vulkaniziranjem, uz prethodnu pripremu, a prema uputstvu proizvođača trake.

2.5. Sistem menadžmenta zaštite i bezbjednosti zdravlja zaposlenih

Bezbjednost pri radu sa trakastim transporterima dobiva sve više na značaju, posebno uvođenjem OHSAS menadžment sistema, radi smanjenja rizika od nastanka nezgoda, kako sa aspekta zaposlenih tako i cijelog Rudnika.

Koliki je značaj OHSAS standarda, može se vidjeti na primjeru identifikacije potencijalnih mjesta opasnosti sa aspekta rizika i kasnije nastanka nezgode kod trakastih transporterera, gdje postoje barem četiri kategorije mogućih mjesta nastanka akcidentnih situacija i nezgoda (slika 2). Prva kategorija je opasnost od pokretnih elemenata pogonskih mehanizama transporterera, druga kategorija je opasnosti od pojedinačnih komadnih tereta i nepokretnih objekata, treća kategorija je opasnost od pokretnih podsklopova transporterera i četvrta kategorija je mehanička opasnost [7].

Implementacijom Sistema menadžmenta zaštite i bezbjednosti zdravlja zaposlenih OHSAS 18001 doprinosi se znatnom smanjenju povreda na radu i poboljšanju radnih uslova.



Slika 2. Potencijalna mjesta povređivanja na trakastim transporterima [7]

3. MJERE ZAŠTITE I UPRAVLJANJE RIZICIMA PRILIKOM PREVOZA RADNIKA TRAKASTIM TANSPORTERIMA U JAMI

Radnici se mogu prevoziti trakom samo ako za svaki trakasti transporter kojim se prevoze postoji odobrenje nadležnog organa za poslove rudarstva. Trakasti transporteri za prevoz radnika moraju imati posebne uređaje koji omogućuju siguran prevoz, bezbjedno penjanje na

8. naučno-stručna konferencija sa međunarodnim učešćem „ODRŽAVANJE 2024“ Zenica, BiH, 13. i 14. novembar 2024.

traku i bezbijedan silazak sa trake [3].

Radnici se ne smiju prevoziti trakastim transporterom istovremeno sa materijalom. Lica koja se prevoze trakom ne smiju imati pri sebi nikakvo oruđe za rad.

Prevoz radnika trakom moraju nadzirati lica koja za tu svrhu odredi upravnik pogona. Na svakom mjestu na kojem se radnici penju na traku ili silaze sa trake, mora se nalaziti po jedno lice koje vrši nadzor cijelog toka ukrcavanja i iskrcavanja radnika.

Radi izdavanja dozvole za prevoz radnika sa trakastim transporterom, transporteri moraju ispunjavati sljedeće osnovne uslove [4]:

- Trake moraju imati koritast oblik.
- Trake moraju biti širine 800 mm i više.
- Krajevi trake moraju biti međusobno vulkanizirani.
- Za vrijeme ukrcavanja i iskrcavanja radnika traka ne smije prekoračiti brzinu predviđenu projektom.
- Transporteri ne smiju imati veći nagib od 18°. Ako transporter ima veći nagib od 5° potrebno je da se ugradi uređaj za kočenje pri nestanku ili isključenju električne energije.
- Na mjestima na kojima se radnici ukrcavaju na traku ili silaze sa trake, traka ne smije biti većeg nagiba od 10°.

Penjanje radnika na traku i silazak sa trake dozvoljen je samo na mjestima koja su za to određena, tj. na platformama. Duž trase radnici smiju silaziti sa trake samo u slučaju kvara transportera, ili ako su primili za to naređenje od strane nadzornog lica.

Nagib platforme mora biti prilagođen nagibu trake, ali ne smije prelaziti 10°.

Platforme moraju biti najmanje 3 m dužine a 0,7 m širine. Njih treba sa strane ograditi tako da radnici ne mogu pasti pod traku. Ivice platforme i dijelovi ograde za koju se radnici pridržavaju moraju biti premazani trajnom upečatljivom fluorescentnom bojom. Na platformama se ne smije ostavljati nikakav materijal ili alat.

Pored svake platforme za ukrcavanje i iskrcavanje radnika mora ostati najmanje 0,7 m slobodnog prostora do podgrade, do boka u hodnicima bez podgrade ili do drugih prepreka i to radi slobodnog prolaza radnika.

Iznad platforme za ukrcavanje ili iskrcavanje radnika i bar još na dužini 8 m u pravcu prevoza mora postojati slobodna visina iznad trake, koja nije manja od 1,8 m. Isto toliko slobodna visina potrebna je i na mjestu za silazak, ali u pravcu prevoza prema platformi.

Za vrijeme prevoza radnika, na platformi za ukrcavanje ili iskrcavanje radnika na pogonskoj stanici transportera i na mjestu utovara materijala na transporter, mora da gori zeleno signalno svjetlo sa natpisom «RADNICI». Ako se prevozi materijal, na tim mjestima mora da gori crveno signalno svjetlo sa natpisom «MATERIJAL» [4].

Zeleno signalno svjetlo se pali na svim mjestima kad počne pregled transportera za prevoz radnika. Ovo svjetlo pali lice zaduženo za pregled transportera. Posljednje lice koje se nalazi na traci je, po pravilu, lice koje je nadziralo ukrcavanje radnika sa polazne platforme, jer se to lice ukrcava na traku poslije svih ostalih radnika. Prije nego što se ono samo ne ukrca na traku, dužno je da ugasi na polaznoj platformi zeleno signalno svjetlo. Kad to lice kao posljednje siđe sa silazne platforme, mijenja i tamo signalno svjetlo, čime se istovremeno pali crveno signalno svjetlo na pogonskoj stanici transportera i na utovarnom mjestu za odnosni transporter.

Na odstojanju 8 m do 10 m ispred platforme za iskrcavanje treba postaviti upozorenje u fluorescentnoj boji. Ispred platforme za silazak treba da postoji ograda obojena fluorescentnom bojom radi sprečavanja padanja sa trake i lakšeg raspoznavanja mjesta za silazak.

Iza platforme za iskrcavanje radnika sa trake moraju biti instalirani uređaj za obezbjeđenje radnika koji nisu na za to određenom mjestu sišli sa trake, mora se obezbjeđiti zaustavljanje trakastog transportera u slučaju kad radnici nisu sišli sa istog na za to određenom mjestu, ili kad

8. naučno-stručna konferencija sa međunarodnim učešćem „ODRŽAVANJE 2024“ Zenica, BiH, 13. i 14. novembar 2024.

radnike treba prinudno skinuti sa trake bez njenog zaustavljanja.

Hodnici i trasa po kojima se prevoze radnici, moraju biti osvijetljene čitavom dužinom. Na ulaznim i silaznim stanicama osvijetljenje mora biti postavljeno tako da radnici dobro vide ivicu trake i platforme.

Slobodna visina iznad trake kojom se prevoze radnici ne smije biti manja od 1000 mm. Ako je takvo odstojanje skoro svuda znatno veće, a samo na pojedinim mjestima je smanjeno, moraju postojati signali opomene za takva mjesta i to 8 do 10 m ispred njih.

Svi provodnici struje pored trakastog transporterora moraju biti na takvom odstojanju da se ne mogu dohvatiti rukom iz poluležećeg položaja. Odredba se ne odnosi na specijalni kabal za zaustavljanje transporterora sa bilo kog mjesta.

Duž trakastog transporterora kojim se prevoze radnici mora postojati siguran uređaj za zaustavljanje transporterora sa bilo kog mjesta (releji za zaustavljanje povezani užetom, specijalni kabal za zaustavljanje ili sličan uređaj). Takav zaustavljeni transporter se ne smije staviti u pogon dok se za to ne dobije signal sa mjesta zaustavljanja. Uređaj za zaustavljanje mora se nalaziti na dohvata ruke radnika koji se prevoze transporterom [6].

Između mjesta za ukrcavanje i mjesta za iskrcavanje radnika mora postojati telefonska veza.

Prevoz, radnika trakastim transporterom vrši se na način predviđen projektom. Za vrijeme prevoza radnika zabranjeno je ustajanje ili zauzimanje sjedećeg položaja.

Rastojanje između radnika na traci mora iznositi najmanje 2 metra. Ako na traci postoji nagib veći od 6°, najmanje rastojanje se povećava na 3 metra.

Redovan prevoz radnika se vrši samo u tačno određeno vrijeme i prema utvrđenom redu. Upravnik pogona izdaje posebno uputstvo o prevozu, i to za svaku trasu posebno, ako se radnici prevoze različitim trasama. U tim uputstvima se, pored ostalog, mora predvidjeti [4]:

1. Vrijeme određeno za prevoz radnika
2. Prava i dužnosti lica koja vrše nadzor prevozom radnika na platformi za ukrcavanje i iskrcavanje.
3. Signali i upozorenja koji se primjenjuju pri prevozu radnika.
4. Ponašanje radnika pri ukrcavanju, za vrijeme prevoza i pri iskrcavanju.
5. Redoslijed u prevozu radnika.
6. Međusobno odstojanje radnika.
7. Rukovanje zaštitnim i signalnim uređajima.
8. Način provjeravanja postrojenja prije početka prevoza radnika.
9. Postupak u slučaju opasnosti ili nezgode.

Sa trake se mora skinuti materijal, prije svakog početka prevoza radnika. Traka se mora pregledati kako bi se konstatovalo da li na njoj postoje poprečne ili uzdužne pukotine.

Pregledaju se i ostali dijelovi trakastog transporterora, naročito kočnice i mjesta na kojima se one, po odredbama ovog pravilnika, moraju nalaziti. Prije početka prevoza radnika pregleda se hodnik kroz koji se prevoze radnici. Za pregled te trase zaduženo je lice koje vrši nadzor nad prevozom radnika na platformi za iskrcavanje radnika. Rezultati pregleda predviđeni u ovom članu upisuju se u knjigu kontrole prevoza radnika i potvrđuju se potpisom zaduženog lica. Upravnik pogona ili lice koje on ovlasti moraju jedanput nedjeljno pregledati tu knjigu.

Na svim platformama (stanicama) na kojima se radnici ukrcavaju i iskrcavaju sa trake, mora biti objavljen službeni red prevoza, odnosno mora se ukazati na eventualne opasnosti pri prevozu.

4. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada je da se upoznamo s mjerama zaštite i upravljanjem rizicima prilikom prevoza radnika trakastim transporterima u jamama sa podzemnom eksploatacijom.

Svim rizicima prilikom prevoza radnika u jami trakastim transporterima neophodno je upravljati, od mogućnosti nastanka nezgoda na radu pa do kraja, prije svega zbog humanizacije rada, jer je radnik najvrjedniji resurs koji uvijek treba da bude na prvom mjestu.

Potreba za upravljanjem rizicima nameće se i iz razloga izbjegavanja višestrukih troškova povezanih sa nezgodom na radu, od kojih mnogi ostanu zanemarljivi i nevidljivi za Rudnike, a prisutni su i odražavaju se na uspješnost poslovanja Rudnika.

Sve mjerama zaštite i upravljanje rizicima prilikom prevoza radnika trakastim transporterima u jamama sa podzemnom eksploatacijom moraju se provoditi shodno odredbama Pravilnika o prevozu ljudi i materijala gumenom trakom u podzemnoj eksploataciji (rudarstvu).

5. LITERATURA

- [1] Atić E.: Prevoz radnika i materijala u rudnicima sa podzemnom eksploatacijom; Tuzla,
- [2] Ahmić A.: Pretovarna i transportna mehanizacija; Ministarstvo obrazovanja, nauke i sporta R BiH, 1996. Rudarsko-geološki institut i fakultet, 1988.
- [3] Buntak, K., Droždek, I., Koščak, M.: Metodologija implementacije upravljanja rizicima FMEA metodom, Tehnički glasnik vol. 8, no. 1 2014.
- [4] DRP glavnog izvoznog transportera revira “Begići-Bištrani” ZD RMU “Kakanj” d.o.o., Kakanj, april 2014.
- [5] Pravilnik o tehničkim normativima pri prijevozu ljudi u rudnicima sa podzemnom eksploatacijom mineralnih sirovina horizontalnim i kosim prostorijama (“Službeni list SFRJ”, br. 34/89);
- [6] Pravilnik o tehničkim normativima za prijevoz transporterima sa trakom u rudarstvu (“Službeni list SFRJ”, br. 5/73, 12/74, 4/86 i 4/89) sa izuzetkom odredbi čl. od 23. do 85. i čl. od 90. do 112.;
- [7] <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0040-2176/2016/0040-21761602298M.pdf> - Pristupljeno 25.09.2024.

THE MODEL OF EDUCATION OF MAINTENANCE ENGINEERS AND THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE MODEL ON THE PREMISES OF INDUSTRY 4.0

MSc mech. Eng. Emir Đulić,
Faculty of Mechanical Engineering,
University of Zenica

Amer Neimarlija, mech. Eng.,
Faculty of Mechanical Engineering,
University of Zenica

SUMMARY

A maintenance engineer is an expert in charge of managing, planning and implementing activities related to the maintenance of equipment, machines or systems within the organization. Maintenance engineers play a key role in ensuring that industrial systems, machinery and equipment function efficiently and without interruption. The basic knowledge of maintenance engineers essentially refers to the essential scientific and professional bases on which the maintenance system rests, so they must have knowledge from several fields. In this regard, educational programs should integrate this knowledge in order to prepare students for the complex challenges of modern maintenance. The study program Maintenance at the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Zenica was presented, which is the only study of this direction in Bosnia and Herzegovina. In the paper, the problem of education of maintenance engineers on the modern premises of Industry 4.0 is opened.

Keywords: maintenance engineer, industry 4.0, education, practice

1. THE CONCEPT AND FUNCTION OF MAINTENANCE

Maintenance is defined as constant control over all means of work, as well as the performance of certain repairs and preventive actions, whose goal and role is the constant, functional training and preservation of production equipment, plants and other machines and devices. The concept of maintenance comes with every concept of production of certain goods. [1] Over time and use, materials and means of work age, technological efficiency decreases, and evident technological obsolescence occurs. Assets wear out over time and their working capacity decreases. Work equipment is subject to breakdowns, breakages and damage, so interruptions in work occur. This causes the appearance of costs due to replacement and repair of parts, but also costs due to downtime in the production process. [6] Modern maintenance is focused on quality, safety, profitability, protection of the work and environment and the human factor. New ideas, new thinking, as well as new strategies must be such that they use potentials of all kinds and turn them into profit. Therefore, the profitable operation of companies in conjunction with modern technical and technological flows must be directly related to the equipment management strategy where there is a need to take effective advantage of new information, technologies and methods. [4]

2. IMPORTANCE AND TASKS OF THE MAINTENANCE ENGINEER

The general task of the maintenance engineer is to diagnose the condition of the components of machines and devices, check their correctness, check their working ability, check their proper functioning and investigate the causes of malfunctions. A maintenance engineer is an expert in charge of managing, planning and implementing activities related to the maintenance of equipment, machines or systems within the organization. [4] The very importance of maintenance engineers can be represented through the basic functions of maintenance, which we divide into two basic groups. The first, primary function (they give determination to the technical maintenance sector): maintenance of existing machines and equipment, maintenance of existing facilities and plants, inspection and lubrication of equipment and machines, auxiliary plants, replacement of plants, equipment and installations, assembly of new equipment and installations, observation and control equipment - measuring instruments. Other secondary function (variable, depending on plant condition and needs): plant protection including fire protection, security, storage, disposal - waste disposal, waste collection, insurance, pollution control and noise abatement, ancillary services and other services performed by maintenance.

Maintenance engineers play a key role in ensuring that industrial systems, machinery and equipment operate efficiently and without interruption. Their duties include:

- ✓ Prepare and implement preventive maintenance: Maintenance engineers develop schedules and procedures for regular maintenance of equipment to prevent breakdowns.
- ✓ Diagnosing problems: When a fault or malfunction occurs, maintenance engineers use analytical techniques and tools to identify the cause of the problem.
- ✓ Repair and replacement of equipment: In cases of failure, they lead the repair or replacement processes to quickly make the equipment functional again.
- ✓ Performance Optimization: Engineers monitor equipment performance and look for ways to improve efficiency and reduce costs.
- ✓ Documentation and reporting: Keep records of maintenance, breakdowns and repairs, which helps in trend analysis and budget planning.
- ✓ Collaboration with other teams: They work together with design engineers, operators and management to ensure coordination between different functions within the organization.
- ✓ Education and Training: Often participate in training other employees on proper use of equipment and best maintenance practices.

3. REQUIRED KNOWLEDGE OF MAINTENANCE ENGINEERS

Maintaining technical systems as a system of deliberate activities boils down to making different decisions with different goals and at different levels. In this regard, the basic knowledge of maintenance engineers essentially refers to the essential scientific and professional foundations on which the maintenance system rests, regardless of which technical system it is. Maintenance engineers must have knowledge in several fields such as mechanics, electronics, informatics, automation and management. Educational programs should integrate this knowledge to prepare students for the complex challenges of modern maintenance. [7]

A maintenance engineer deals with the maintenance and operation of equipment and systems, so the key subjects for this field are as follows:

- Maintenance technique – Basic principles and methods of equipment maintenance.
- Mechanics – Understanding mechanical systems and machine elements.
- Electrical engineering – Basic knowledge of electrical systems and devices.
- Automation – Control systems and process automation.
- Materials – Characteristics of materials and their behavior under load.
- Statics and dynamics – Analysis of forces and movements in systems.

- Technological processes – Understanding of production and operational processes.
- Computer technologies – Maintenance management software tools (CMMS).
- Statistics and data analysis - Data analysis methods for process optimization.
- Equipment design - Fundamentals of engineering design and analysis.

4. QUALIFICATION FRAMEWORK AND MAINTENANCE ENGINEER COMPETENCES

In some cases, qualification frameworks may be aligned with national or international standards, such as those set by organizations such as ISO or other relevant industry standards. Also, specific industry regulation may affect qualification requirements. When developing a qualifications framework, it is important to include feedback from industry experts to ensure that all required competencies are recognized and integrated. [4] In this regard, the qualification framework for maintenance engineers usually includes a set of competencies and knowledge required to effectively perform tasks in the field of systems, equipment and infrastructure maintenance. This framework can be tailored to the specific needs of an industry or organization, but can generally be broken down into several key components: [9]

1. Technical knowledge
 - Understanding the principles of operation of machines, mechanical, electrical and electronic systems.
 - Knowledge of maintenance processes and procedures.
 - Ability to use modern technologies, such as CAD software and maintenance management systems.
2. Practical skills
 - Ability to diagnose and solve problems.
 - Experience in performing field maintenance.
 - Skills in the use of various maintenance tools and equipment.
3. Competences in management
 - Ability to plan and organize work processes.
 - Knowledge of quality and safety management systems.
 - Project management and team management.
4. Analytical skills
 - Ability to analyze data and make decisions.
 - Understanding and applying methods to optimize the maintenance process.
 - Ability to analyze problems, conduct fault investigations and find optimal solutions.
5. Communication skills
 - Ability to cooperate with other departments, as well as clear and effective communication with the team and superiors.
 - Ability to communicate effectively with teams, clients and suppliers.
 - Preparation of reports and presentations.
 - Ability to adapt to new technologies and constant learning within the profession.

Maintenance engineers usually have a degree in engineering (mechanical, electrical, or similar) and are often certified in specific specializations.

In addition to education at higher education institutions in the field of maintenance, there are a large number of courses and educations conducted by professional associations and chambers of industry. Also, many industry organizations offer specialized courses and certifications that are recognized by the industry. Training can be implemented through online courses, workshops, seminars, or as part of accredited programs at faculties.

EFNMS (European Federation of National Maintenance Societies) – This organization provides frameworks and guidelines for the training of maintenance engineers across Europe. Many professional organizations, such as SMRP (Society for Maintenance & Reliability Professionals) or CMRP (Certified Maintenance & Reliability Professional), offer industry-recognized training and certification. European maintenance engineer license usually refers to certificates and accreditations awarded to engineers working in the field of maintenance, with the aim of improving their skills and knowledge in accordance with European Union standards. In Europe, there are several organizations and programs that offer training and certification in this domain.

5. AREAS OF EMPLOYMENT FOR MAINTENANCE ENGINEERS

The role of maintenance engineers is crucial in many industries, so they can be employed in various industries and sectors such as:

- **Manufacturing industry:** In factories and manufacturing plants, maintenance engineers ensure that machines and equipment are working efficiently. With the growth of production, the need for specialists who can provide regular maintenance of the equipment increases.
- **Energy:** In companies that produce and distribute electricity, maintenance engineers work on the maintenance of equipment and systems (TE, HPP, FNE). Given the infrastructure of the energy sector and renewable energy sources, the demand for equipment and system maintenance engineers is on the rise.
- **Transportation:** Investments in roads, railways and other infrastructure projects create a need for experts who can manage the maintenance of these systems. In railway, aviation and marine companies, maintenance engineers are responsible for the maintenance of vehicles and infrastructure.
- **Construction:** In construction companies, maintenance engineers can work on the maintenance of buildings and infrastructure and construction machinery.
- **Healthcare:** In hospitals and healthcare facilities, maintenance engineers may be in charge of maintaining medical equipment.
- **Telecommunications:** In telecommunications companies, maintenance engineers work to maintain network systems and equipment.
- **Automotive Industry:** In automotive factories, maintenance engineers help maintain production lines and equipment, especially related to production processes and quality management.

The experiences of maintenance engineers can vary significantly depending on the industry, job specifications, and the infrastructure and equipment they use. [10]

6. EDUCATION OF ENGINEERS IN BOSNIA AND HERZEGOVINA

The educational system for engineers in Bosnia and Herzegovina and Europe has several key differences, which can be observed through the structure of education, curricula, practical training and access to industry. [3]

Several important points of distinction:

- **Structure of education** – In Europe, university programs are structured as bachelor (3 years) and master (2 years) studies, while in BiH there is a similar structure, but it is less flexible and with less focus on practical application.
- **Curriculum** – In Europe, curricula are updated and aligned with industry standards and labor market needs. In BiH, curricula can be outdated or out of sync with current industry needs, which can make it difficult for students to find work after graduation.
- **Practical training** - In many European countries, practical training and internships are

an integral part of the study process, allowing students to gain experience directly in industry. In BiH, although there are still certain opportunities for practical work, there are often less expectations or support for student practice.

- Access to technology and resources – European universities often have better resources, laboratories and technology that is in line with the latest developments in the industry, while access to modern equipment and technological innovations may be limited in BiH.
- Accreditation and standards - In Europe there are organizations that accredit educational programs according to high standards, which can guarantee the quality of education. In Bosnia and Herzegovina, the accreditation process can be inconsistent and less transparent.
- Focus on research and innovation – European universities have a strong focus on research and innovation, providing students with opportunities to participate in research projects. In BiH, research activity may be limited, and students may not have equal opportunities for engagement in research works.

These differences indicate that the education system for engineers in Bosnia and Herzegovina can be improved in order to better align it with European standards and the needs of the labor market. Adaptation may include modernizing the curriculum, improving practical training and strengthening linkages with industry.

7. MAINTENANCE DEPARTMENT AT THE MECHANICAL FACULTY OF THE UNIVERSITY OF ZENICA AND THE MAINTENANCE ENGINEER EDUCATION MODEL

In accordance with the legal regulations and the obligation of higher education organizations to innovate curricula and programs, a thorough restructuring of the study programs at the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Zenica was carried out in 2004 and their alignment with contemporary trends in science and the profession. In this regard, a comprehensive analysis and research of the needs for profiles of graduated mechanical engineers in the economic activities of the central Bosnia region was carried out. Analyzes have shown that the largest number of mechanical engineers work in the process industry sector (production of iron, steel, aluminum, paper, cement, energy, mining, etc.), which is dominant for the region of ZDK and SBK, and within that sector, the majority of them work in the field of machine and equipment maintenance. A large number of them work in the same fields and in the sectors of metal processing, wood processing, food production, etc. Depending on the level of automation and applied technologies, that number ranges from 30-60% of the engineering staff. On the basis of these researches, a need for a graduate mechanical engineer who will play a significant role in the maintenance of machines and equipment, and thus entire business processes, was identified, and this need was translated into the study program Maintenance at the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Zenica. Currently, the maintenance department is one of five departments at the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Zenica, and the only department that educates maintenance engineers in Bosnia and Herzegovina.

This department bases its scientific-research, educational and professional activity on research in the fields of modern maintenance of process machines and equipment (metallurgical and mining plants and equipment, construction machines, energy plants, motor vehicles, etc.). The teaching subjects of the department deal with modern methods of technical diagnostics, assembly and disassembly processes, new technologies in maintenance, expert systems in maintenance, etc. In addition to studies in the first cycle for the title of graduate mechanical engineer, studies also take place in the second cycle, entitled

Maintenance of industrial plants. The Department of Maintenance at the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Zenica fully follows the provisions of the Bologna process, and the development and application of new technologies imposes the obligation of constant improvement and innovation of work. The implementation of the teaching process is fully covered by staff who, in addition to scientific references, also have solid professional references demonstrated through numerous projects for economic entities. The department also has one of the rare laboratories for this purpose, developed at the Faculty of Mechanical Engineering more than 20 years ago. It is the Laboratory for Technical Diagnostics, which is one of the best-equipped laboratories of its kind in the area of maintenance in the former Yugoslavia. In this sense, in the previous 20 years that the laboratory has existed, more than 120 different expertise and more than 1000 different diagnostic measurements have been performed.

The key goals that the study program should meet, i.e. the skills and competencies that the graduate of this study program should have, are clearly defined:

- sufficient scope of theoretical knowledge (approx. up to 50%),
- sufficient basis for future training in other areas of the mechanical profession (energy, production, etc.),
- enough practical knowledge to be able to participate in team work, but also to individually solve various problems in the field of maintenance (up to 30%),
- possession of basic knowledge in the field of management and engineering economics (up to 10%),
- the ability to include research projects,
- active knowledge of foreign languages (primarily English) due to necessary international communication (up to 5%),
- sufficient basis for continuing education within postgraduate studies.

The basis for the implementation of the activities of the Department of Maintenance is the resources of the Department of Maintenance, whose main areas and main subjects are defined by the Decision on determining the main areas and main subjects of the University of Zenica. According to the content of the NPP, and within the syllabus of individual courses from the NPP, the structure (content) of the course, learning goals and outcomes, i.e. output competencies, as well as the way of evaluating all student activities through teaching and pre-exam activities, i.e. the weighting criteria for knowledge test. The learning and teaching of students is defined by the course program and the method of performing teaching activities, and it is part of continuous activities aimed at the student. The structuring of ECTS points for the subjects of the study program was carried out by taking into account the entire activities and workload of the student for the acquisition of knowledge and the acquisition of the necessary competencies.

Easier understanding and implementation of defined student-centered learning, teaching and evaluation processes implies:

- Correct and professional approach to students during classes through flexibility in achieving the highest possible quality learning outcomes for students, respecting the specifics and ways of understanding each student in accepting and understanding the studied material and fulfilling the stipulated obligations,
- The use of modern teaching methods with the use of modern forms of knowledge transfer,

- Teaching is not only carried out according to the ex-cathedra principle, but according to the specifics of the SPO subject, special attention is directed to lectures and exercises in business systems, through the preparation of practical examples, the preparation of seminar papers, the use of laboratory resources and equipment, visits to factories and laboratories in the surrounding area , international study visits, participation in scientific and professional gatherings together with teachers, etc.,
- The creativity and independent work of students is motivated through their original approach in understanding the lessons and the realization of the set obligations, but also the development of teamwork through the assignment of topics that imply the participation of more students in the group,
- Through certain activities during the semester, the fulfillment of the planned obligations is monitored and the students' response to the planned obligations and the possibility of their quality fulfillment are checked.
- Developing the professional relationship and responsibility of teachers, associates and students according to obligations, collegial relationship, and teamwork.

8. MAINTENANCE 4.0 AND EDUCATION OF ENGINEERS ON MODERN PREMISES

Maintenance 4.0 represents a shift away from traditional, reactive approaches to maintenance towards more proactive and intelligent strategies that use advanced technologies and data analytics to increase operational efficiency, reduce costs and improve asset management. Maintenance 4.0 is a concept based on the principles of Industry 4.0, which includes the use of advanced technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), data analytics and automation to improve maintenance processes in industrial environments. [8]

Key concepts and features related to Maintenance 4.0:

- Predictive maintenance: Using IoT sensors and data analytics to predict when equipment will fail, allowing maintenance to occur just before failures, thereby minimizing downtime and extending asset life.
- Condition-based monitoring: Continuous monitoring of the actual condition of machines using real-time sensor data, enabling targeted maintenance actions based on current condition rather than pre-defined schedules.
- Data analytics and artificial intelligence: using machine learning algorithms and advanced analytics tools to analyze large data sets collected from equipment. This can help identify patterns, uncover insights, and improve maintenance decision-making.
- Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR): Implementation of AR/VR technologies to train maintenance personnel, provide real-time information overlay, and assist technicians during maintenance tasks to improve accuracy and efficiency.
- Integrated platforms: Using cloud-based solutions that centralize data from disparate sources, enabling easy access, collaboration and management of maintenance operations and asset performance across the organization.
- Remote maintenance and support: Enables technicians to perform maintenance tasks remotely via connected devices, enabling faster response times and reducing the need for on-site visits.
- Asset Optimization: Using data and analytics to optimize performance and asset utilization, ensuring equipment is running at peak efficiency, reducing energy consumption and reducing costs.
- Collaboration and information sharing: Facilitating collaboration between different teams within the organization as well as with external partners using digital platforms that enable data sharing and real-time communication.

- Resilience and flexibility: Improving the ability of maintenance operations to adapt to unexpected changes, such as equipment failures or changes in production requirements, by relying on integrated data and predictive insights.
- Sustainability: Using data-driven insights not only to improve equipment performance, but also to support sustainability goals, such as reducing waste, energy consumption and carbon footprint. [7]

The education of maintenance engineers within the Industry 4.0 concept represents a significant challenge and opportunity for adapting educational programs and curricula to new technologies and the needs of the labor market. The education of maintenance engineers in the context of Industry 4.0 must be dynamic and adaptable, focusing on the development of technical and analytical skills, as well as the ability to navigate complex systems. Quality education in this area can significantly contribute to efficiency and innovation in industrial processes. [2]

Key aspects of maintenance engineer education in the context of Industry 4.0:

- Interdisciplinary approach - connects mechanical engineering and IT.
- Technology skills – Learning about the latest technologies, such as IoT, artificial intelligence, robotics and data analytics, is becoming crucial. Students should master the tools and software for failure analysis and prediction.
- Smart Maintenance - Under the 4.0 concept, maintenance is increasingly focused on predictive and proactive maintenance, which uses sensors and data analysis to predict problems before they occur.
- Monitoring and analytics – Educational programs should cover topics related to data analysis, storage and processing of big data (Big Data) to enable better maintenance decision-making.
- Practicum and experiential learning – The inclusion of practical work, laboratory experimental work and collaboration with industry is essential. Students should have the opportunity to work on real projects and participate in internships.
- Working in teams – Developing teamwork and communication skills, as well as the ability to work in multidisciplinary teams, are increasingly important as many projects require the collaboration of experts from different fields.
- Ethics and sustainability – Incorporating sustainability and ethics topics into educational programs, to ensure that maintenance engineers not only use new technologies, but do so in a socially and environmentally responsible manner. [5]

In Bosnia and Herzegovina, the state of application of this concept can be evaluated through several aspects:

- Industrial revolution and digitalization: Bosnia and Herzegovina faces the challenges of digitization in industry, but there are initiatives that encourage modernization and the application of new technologies. This includes investment in infrastructure as well as workforce preparation.
- Businesses and adoption of new technologies: Many companies recognize the importance of Maintenance 4.0 and are starting to implement technologies such as IoT sensors to collect data on the condition of machines and equipment. The application of predictive maintenance, where problems are predicted before they happen, is becoming increasingly popular.

- Support from government and institutions: There are programs and strategies that support digitization and sensor technology. For example, the Digital Europe program encourages innovation and digitization in various sectors.
- Education and awareness: Education about the concept of Maintenance 4.0 and digital technologies in general is still under development. Many experts and organizations work to raise awareness and train workers for new technologies.

9. CONCLUSION

By educating MAINTENANCE engineers, the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Zenica makes a full contribution to building assumptions for the further economic development of ZDK and SBK and the wider region, as well as positioning the University of Zenica in the higher education area of BiH and the EU. In this regard, the Faculty properly anticipates industrial and economic trends and aligns its work with the requirements of Industry 4.0. so that he defined the innovations that he gradually introduces into his work.

Suggestions for improving the work of the Maintenance department in accordance with the new premises:

- Continue with the activities of promotion and attraction of a larger number of high school students and align it with the needs of the labor market and the required competencies of engineers who will work on mechanical maintenance jobs.
- Eliminate unnecessary theoretical content that burdens students and is not adapted to study in the 21st century.
- Work on the partial transfer of teaching to the e-learning concept (approx. 25-50% of the teaching units are given on the UNZE website), which is already partially in use in the II cycle of studies.
- Modernization of the teaching process and the aspiration that most of the teaching content is carried out in business entities through the forms of seminar papers, projects, etc.
- Improve cooperation with the economy, especially in the segment of holding seminars and training for lifelong learning.
- Work on the development of the Motor Vehicle Maintenance Laboratory, which has had the largest number of graduates in recent years.
- Greater involvement of students in forms of I&R and professional work
- Connection with the associations of maintenance engineers from the EU and the countries of the region.
- Improve cooperation with the network of alumni, both in BIH and those who work in the world today, which is unfortunately very poor.
- Visits to well-known fairs in the field of logistics and maintenance.
- More participation in conferences in the field of maintenance.

The inclusion of practical work, laboratory experimental work and collaboration with industry is essential. Students should have the opportunity to work on real projects and participate in internships. Implementing more hands-on training for maintenance students can significantly improve their ability to apply theoretical knowledge in real-world situations.

Several steps and strategies that the Faculty of Mechanical Engineering in Zenica is actively considering:

- Definition of objectives - Clearly defined objectives of practical teaching and how

they will contribute to the development of students' skills.

- Creating partnership relationships with industry - Cooperation with companies that deal with equipment maintenance can provide students with access to real projects and situations.
- Modular approach – Develop modules covering different aspects of maintenance, such as mechanical, electrical and modifications, with practical exercises in each module.
- Practical training in laboratories – Equipping laboratories with real or simulated maintenance equipment. To enable students to work directly with the tools and technologies they will use in industry.
- Simulations and case studies – Simulations of real situations and case studies to enable students to think critically and solve problems in a practical way.
- Investing in specialized courses that focus on new technologies, such as predictive maintenance, industrial automation or data analysis.
- Organization of workshops and seminars – Lectures by invitation of industry experts to hold workshops or seminars. This can provide students with additional insights and real-world examples of theory application.
- Organization of workshops or sessions with industry experts to share knowledge and experience.
- Projects and teamwork – Group projects where students can work together to solve maintenance problems, which will help them develop teamwork skills.
- Mentoring programs – Introducing a mentoring system where more experienced students or industry experts mentor newer students and help them acquire practical skills. Implementing these strategies can help students acquire the necessary skills and knowledge that will be useful in their future careers.
- Evaluation and feedback – Regular evaluation of the practical training program and feedback from students to continuously improve the approach.

10. REFERENCES

- [1] S. Brdarević, *Maintenance of work equipment*, Faculty of Mechanical Engineering, Zenica
- [2] Šešlija, D., Milenković, I., Doroslovački, R., Katić, V., Vilotić, D., Kolaković, S., Kovačević, I. (2018), *From digital production to digital education*, XXIV Meeting: Development trends: "Digitalization of higher education", Kopaonik.
- [3] Vujović, V. (2020), *Digital transformation in higher education: overview, reasons and expectations*, Jahorina Business Forum, East Sarajevo, BiH.
- [4] Mitrović, R., Majstorović, V. (2020), *Intelligent production and products in the context of the education of mechanical engineers*, Thematic Proceedings of the XXV and XXVI Scientific Meeting of International Importance "Technology, Culture and Development", "Technology and Society" Association, "Mihajlo Pupin" Institute, Center for Science Development Research and technologies, Belgrade.
- [5] *Best Practices in Education from Industry 4.0 Perspective report*, Universities of the Future is a Knowledge Alliance Project (588409-EPP-1-2017-1-PTEPPKA2-KA)
- [6] Bajramović, K., Bajramović, H., Bajramović, I., Bajramović, A., Bajramović, I. (2019), *The role and importance of mechanical engineers in the maintenance of mining machines and devices*, 11th scientific and professional meeting with international participation "QUALITY 2019", Neum, B&H.
- [7] Coskun, S., Kayıkcı, Y., Gençay, E. (2019), *Adapting Engineering Education to Industry 4.0 Vision*, Technologies.
- [8] Aleksandrov, S., Tufegdžić, M., Petrović, Z., *IMPLEMENTATION OF NEW TECHNOLOGIES OF INDUSTRY 4.0 IN THE CURRICULUM OF PROFESSIONAL MECHANICAL ENGINEER*, Akademija strukovnih studija Šumadija – Odsek u Trsteniku.

- [9] Tibljaš, M. (2019), *Project learning and teaching in engineering education*, University of Rijeka, Faculty of Philosophy, Rijeka.
- [10] *EDUCATION OF PRODUCTION MECHANICAL ENGINEERS FOR INDUSTRY 4.0 – CHALLENGES, CHANCES, OPPORTUNITIES* (2023), XXIX Meeting TRENDS OF DEVELOPMENT: "THE UNIVERSITY FACING NEW CHALLENGES", Vrnjačka Banja, 8 - 11. 02. 2023. Paper No.T2.3-4 01540
- [11] Katalinić, B., Ćosić, I., Katić, V., Tekić, Ž. (2011), *Engineers for an innovative society*, XVII Meeting TRENDS OF DEVELOPMENT: "EUROPE 2020: a society based on knowledge" Kopaonik,

APPLICATIONS OF DIGITAL TWINS IN PREDICTIVE MAINTENANCE OF MECHANICAL SYSTEMS

Lamija Mešeljević, assistant
Faculty of Mechanical Engineering, University of Zenica
Fakultetska 1, Zenica, Bosnia and Herzegovina

Fuad Hadžikadunić, full professor
Faculty of Mechanical Engineering, University of Zenica
Fakultetska 1, Zenica, Bosnia and Herzegovina

ABSTRACT

Digital twins are revolutionizing predictive maintenance by providing real-time virtual replicas of mechanical systems. These models enable continuous monitoring, early fault detection, and predictive analysis, allowing maintenance teams to foresee and prevent equipment failures. By simulating different maintenance scenarios and forecasting component lifespan, digital twins optimize maintenance planning and support remote diagnostics. When integrated with IoT and machine learning, this technology enhances reliability, reduces downtime, and lowers maintenance costs. This paper examines the key applications of digital twins in predictive maintenance, focusing on their role in improving efficiency and extending the lifespan of mechanical systems.

Keywords: digital twins, predictive maintenance, mechanical systems, real-time monitoring, fault detection, PdMDT

1. DEFINITION OF DIGITAL TWIN

The increasing complexity of mechanical systems in industries such as manufacturing, aerospace, and automotive has amplified the need for more efficient and reliable maintenance strategies. Traditional maintenance approaches, often relying on reactive or scheduled interventions, are becoming insufficient in dealing with the growing demand for uptime, performance, and cost optimization. Predictive maintenance offers a promising solution by forecasting potential failures and enabling timely interventions before critical issues arise.

One of the key enablers of predictive maintenance is the concept of the Digital Twin (DT). By integrating digital twins with advanced analytics, artificial intelligence (AI), and machine learning (ML) techniques, it becomes possible to predict failures, optimize maintenance schedules, and improve overall system performance [1].

Digital twins, considered a key enabling technology, serve as virtual models of physical objects, processes, and real-time data throughout the entire product life cycle. The idea of digital twins was first introduced by Michael Grieves in 2002 during a discussion on Product Lifecycle Management (PLM). In 2012, Grieves and John Vickers further developed the concept, defining digital twins as digital replicas of physical assets that maintain an automatic and continuous connection between the physical and digital realms [2].

The core functionality of a digital twin is based on three primary components, as shown in Figure 1. These components include: the physical entity, the digital or virtual counterpart, and the connection between the physical and digital entities [2-5].



Figure 1. General reference model of digital twin [2]

1.1. Historical development of digital twins

The concept of digital twins has its origins in the early 2000s. It has evolved significantly over the years, driven by advancements in digital technologies, computing power, and data analytics. As previously mentioned, the term "digital twin" was first introduced by Michael Grieves in 2002. Grieves proposed the idea of a digital twin as a virtual model of a product or system, designed to improve product design and manufacturing. His early concept aimed at creating a digital counterpart of a physical asset that would follow it through its entire lifecycle, from design to decommissioning [6]. In these early days, digital twins were primarily used to enhance product design through simulation and virtual prototyping.

The development of the Internet of Things (IoT) and advancements in data analytics during the 2010s accelerated the adoption of digital twins across multiple industries. The ability to connect physical systems to the internet allowed for more extensive data collection, making it feasible to create highly accurate and dynamic digital twins. This period saw digital twins being applied not only in product design and manufacturing but also in operations, predictive maintenance, and asset management across industries like aerospace, automotive, and energy sectors [3].

In recent years, the applications of digital twins have expanded into numerous sectors, including healthcare, construction, urban planning, and smart cities. For instance, in healthcare, digital twins are being used to model patient-specific treatments by creating virtual models of organs or even entire physiological systems. In the energy sector, digital twins are utilized to monitor and optimize the performance of power grids and renewable energy systems [7]. Moreover, the incorporation of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) into digital twin frameworks has enabled predictive analytics, allowing organizations to forecast failures or inefficiencies before they occur and make proactive adjustments to improve performance and reduce costs [5].

2. DIGITAL TWINS AND PREDICTIVE MAINTENANCE

Although digital twins have significantly advanced in recent years, their application in design was not fully explored until the study by [8]. This research introduced a catalogue of digital twin design patterns. The authors proposed specific patterns for different stages of the product development process and clarified what does not qualify as a digital twin, such as a digital model, digital generator, or digital shadow. According to their view, a true digital twin consists of a causally connected and synchronized digital and physical object.

2.1. Maintenance

Maintenance is an essential part of ensuring the reliability, efficiency, and safety of mechanical systems. Various maintenance strategies are employed depending on the complexity of the

systems, operational requirements, and associated costs. The main five types of maintenance include the following: reactive maintenance, preventive maintenance, condition-based maintenance, predictive maintenance and prescriptive maintenance [1,9].

Predictive maintenance focuses on proactively reducing costs and improving machine uptime by predicting when a component or system might fail. It estimates when a part will no longer function effectively, typically measured through indicators like remaining useful life (RUL), health metrics, or equipment efficiency. Additionally, this approach promotes sustainability by fully utilizing assets without causing wear on other components or wasting resources [9].

2.2. Characteristics of predictive maintenance based on digital twin (PdMDT)

PdMDT has several defining characteristics that distinguish it from traditional maintenance practices, combining the predictive analytics of condition-based maintenance with the comprehensive virtual modelling of a system's digital twin.

3.2.1. Real-time perception

One of the key characteristics of PdMDT is the continuous monitoring of physical assets through real-time data collection. This data is collected via embedded sensors and IoT (Internet of Things) devices that track various operational parameters such as temperature, vibration, pressure, and load.

The real-time data is fed directly into the digital twin model, which provides a dynamic, virtual representation of the physical system. This integration enables the digital twin to reflect the current state of the equipment accurately, allowing it to predict failures based on actual operating conditions, rather than fixed schedules or average historical data [10].

3.2.2. Predictive analytics and machine learning

A defining feature of PdMDT is its ability to predict future failures and maintenance needs using predictive analytics. By analysing data trends, machine learning algorithms can forecast when a component is likely to fail and calculate the remaining useful life (RUL) of the system's parts.

The digital twin leverages historical data, real-time inputs, and operational simulations to identify patterns and anomalies that could signal an impending failure. This proactive approach allows maintenance teams to address issues before they cause downtime or damage [11].

Furthermore, machine learning models continuously learn and improve over time, refining their ability to predict failures with greater accuracy as they analyse more data.

3.2.3. Virtual simulation and optimisation

Digital twins in predictive maintenance allow for virtual simulation of mechanical systems under various operational conditions. This means that maintenance teams can simulate different scenarios, such as increased load or fluctuating temperatures, to understand how these conditions affect system performance and longevity.

Through “what-if” simulations, different maintenance strategies can be tested without risking the actual equipment. Engineers can evaluate potential outcomes and optimize their approach to avoid costly repairs and minimize downtime [12].

Beside these simulations, the digital twin can also iterate maintenance schedules, suggesting the most effective intervention times to ensure the machinery operates at peak performance while avoiding unnecessary maintenance [13].

3.2.4. Two-way communication between physical and digital systems

PdMDT creates a closed-loop system where real-time data flows continuously between the physical asset and its digital twin. This two-way communication enables the digital twin to constantly update and adjust based on the actual conditions of the mechanical system.

For example, changes in the physical asset, such as wear or stress, are mirrored in the digital twin, while the insights generated by the twin (e.g., predicted failure times) are relayed back to the maintenance team. This synchronization ensures that the virtual model always represents the current state of the physical system [14].

2.3. Difference between PdMDT and traditional maintenance

Predictive maintenance with digital twins (PdMDT) represents a significant advancement in maintenance strategies compared to traditional maintenance approaches. The use of digital twins provides an enhanced layer of functionality, allowing more precise and effective maintenance scheduling and optimization. The main differences between PdMDT and traditional maintenance are summarized in Table 2.

Table 2. Summary of differences between PdMDT and traditional maintenance

<i>Aspect</i>	<i>Traditional maintenance (reactive/preventive)</i>	<i>Predictive maintenance with digital twins (PdMDT)</i>
<i>Approach</i>	<i>Reactive: after failure Preventive: time-based</i>	<i>Real-time, condition-based maintenance</i>
<i>Data utilization</i>	<i>Minimal or based on historical data [2]</i>	<i>Extensive real-time data with IoT and sensors [2]</i>
<i>Predictive capability</i>	<i>None or limited</i>	<i>Advanced predictions using machine learning and simulations</i>
<i>Downtime</i>	<i>High in reactive; moderate in preventive</i>	<i>Minimal downtime due to optimised scheduling [12]</i>
<i>Cost efficiency</i>	<i>Higher long-term costs due to breakdowns or over-maintenance</i>	<i>More cost-efficient, reduces unplanned maintenance [4]</i>
<i>Technological investment</i>	<i>Low, simple implementation</i>	<i>High, requires digital twins, sensors, data analytics</i>

3. APPLICATIONS OF PdMDT

Predictive maintenance based on digital twin (PdMDT) has revolutionized the management of mechanical systems, offering predictive insights into the health of machinery and enabling real-time, data-driven maintenance decisions. By integrating IoT (Internet of Things), sensors, and simulation models, PdMDT provides a robust framework for monitoring the operational status of mechanical systems. This integration helps reduce unplanned downtime, improve performance, and extend the life of equipment. PdMDT finds applications in various industries that rely heavily on mechanical systems, such as manufacturing, energy, aerospace, and automotive sectors.

In manufacturing, PdMDT plays a critical role in monitoring production machinery, such as CNC (computer numerical control) machines, hydraulic presses, and robotic systems. These machines are often subjected to constant use, and failures can lead to significant production losses. By using PdMDT, manufacturers can continuously assess the wear and tear of components such as bearings, motors, and gears, predicting when they will fail based on real-time operational data.

In the automotive industry, PdMDT is applied in the maintenance of vehicle fleets and manufacturing equipment. Automotive companies use digital twins to monitor the health of robotic arms in assembly lines, as well as to track the performance of electric vehicles (EVs) in real time. For instance, digital twins are used to monitor the battery life and charging cycles

of EVs, allowing manufacturers and fleet operators to predict when a battery might fail or require maintenance.

PdMDT is also applied in the maintenance of railway systems, where it helps monitor the condition of trains and rail infrastructure. Railway systems are complex, with multiple components such as locomotives, tracks, and signalling systems requiring regular maintenance to ensure safe and efficient operation.

Many papers and articles on PdMDT applications in mechanical systems are found and some of them are described in the following sections.

3.1. Prediction of the RUL of an industrial robot

The paper [15] introduces a methodology for calculating the remaining useful life (RUL) of industrial machinery by utilizing the digital twin concept. The focus is on predictive maintenance within the context of manufacturing, where the goal is to avoid unexpected machine failures and optimize maintenance schedules.

The case study described in the paper involves a six-axis industrial robot, used for welding tasks in the assembly of a thermosyphonic system. The robot's gearboxes were chosen as the focus for predictive maintenance due to their critical role in the robot's functionality. The digital twin of the robot, Figure 2, was created using physics-based simulations and real-time data gathered from the robot's controllers and external sensors. The data was used to tune the digital model continuously, ensuring it accurately reflected the condition of the real robot.

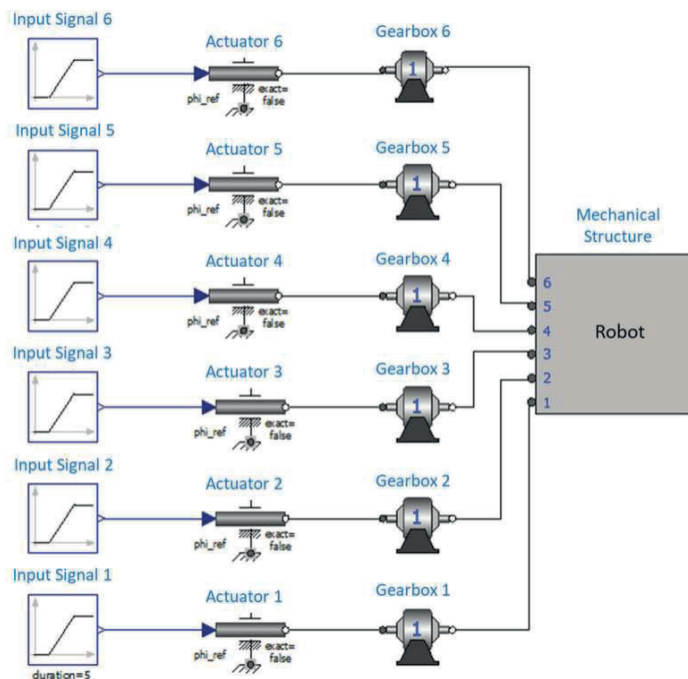


Figure 2. Robot digital model [15]

The prediction of the RUL for the industrial robot is primarily based on a combination of real-time data and physics-based simulation models. The digital twin of the robot continuously receives data from the machine's controller and sensors, including torque and position signals from the gearboxes. These signals are compared to the outputs from the simulation model, which predicts the expected torque values.

The RUL estimation for each gearbox was performed once per day during the case study, allowing maintenance schedules to be adjusted in real-time based on the current state of the robot. This approach enables the proactive scheduling of maintenance activities, avoiding unexpected breakdowns and extending the lifespan of the robot's components.

3.2. Design of a predictive maintenance algorithm for a triplex pump

An article [16] explains how a predictive maintenance algorithm, Figure 3, for a triplex pump was developed using MATLAB®, Simulink, and Simscape™. A digital twin of the pump was created in Simscape™, fine-tuned with real-world data, and used in conjunction with machine learning to build the predictive maintenance system. The algorithm relies solely on the pump's outlet pressure to detect which parts, or combinations of parts, are likely to fail, providing an efficient way to forecast maintenance needs.

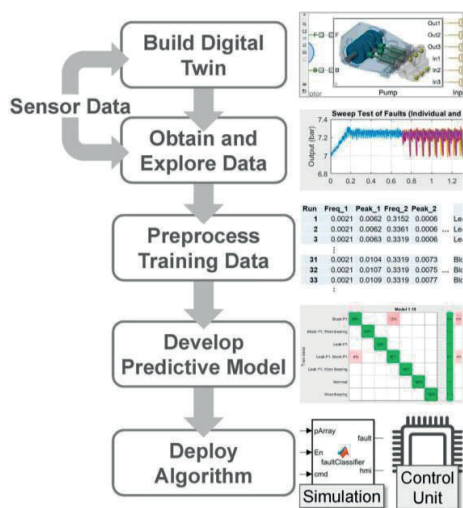


Figure 3. Predictive maintenance algorithm for a triplex pump [16]

By creating a physics-based simulation of the pump and combining it with real-time sensor data like pressure and vibration, the system can monitor the pump's health and simulate various fault conditions. Machine learning algorithms are applied to analyze this data, predict potential failures in components such as plungers and valves, and schedule maintenance proactively. This approach helps minimize downtime and optimize repair schedules.

The digital twin thus provides a proactive maintenance system, allowing for faults to be detected early and interventions to be scheduled based on data-driven insights.

3.3. Digital twin of an automotive brake pad

The development of a digital twin model used to predict the wear of automotive brake pads is presented in [17]. This digital twin utilizes real-time brake pressure data collected through the ThingWorx Internet of Things (IoT) platform and is simulated in CREO Simulate for predictive maintenance purposes. The authors focus on simulating the brake pad and rotor assembly under varying vehicle speeds and brake pressures to determine wear rates. By comparing calculated and simulated data, the results show good correlation with an average error of 11%.

The methodology involves capturing brake pressure data at different vehicle speeds using sensors and feeding this data into the CREO model for simulation, Figure 4. Brake pad wear is calculated using analytical equations, showing that wear increases with both speed and

pressure. This approach demonstrates how real-time data combined with simulation tools like CREO can help predict brake pad wear and optimize maintenance schedules.

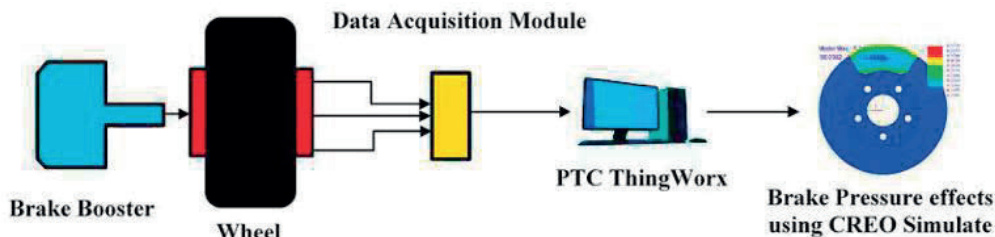


Figure 4. The process flow of the proposed predictive maintenance system [17]

The authors highlight that automotive manufacturers have yet to widely adopt advanced predictive maintenance solutions for braking systems. However, they foresee the potential of combining machine learning and digital twin technologies to create more accurate predictive models for brake systems. Future work includes expanding this proof of concept to a full vehicle digital twin, which could revolutionize maintenance practices in the automotive industry.

3.4. Digital twin for machining tool condition prediction

The paper [18] focuses on utilizing digital twins for predicting the condition of machining tools and performing predictive maintenance. Digital twin technology integrates real-time data, simulations, and advanced algorithms to monitor tool wear and performance degradation in machining systems. By combining physical models, virtual sensors, and machine learning techniques like deep learning, this approach enhances the accuracy of fault prediction in tools, leading to more efficient maintenance and operation.

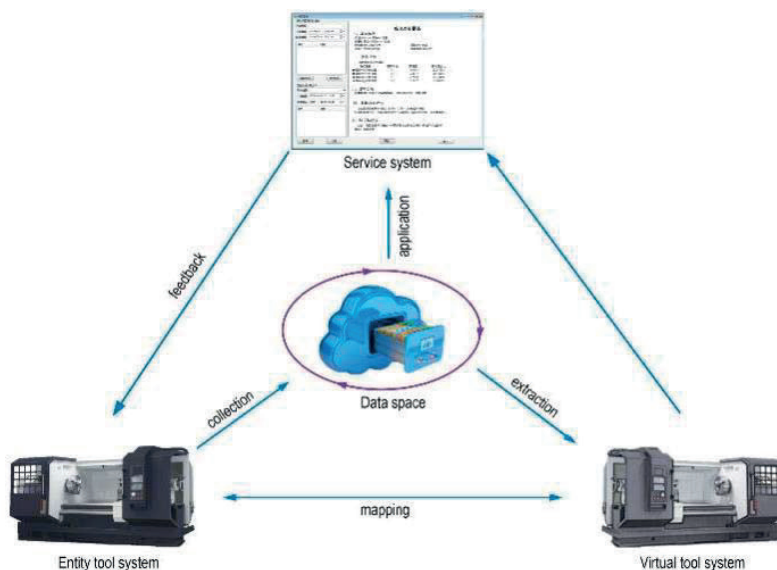


Figure 5. Digital Twin model of tool system [18]

The methodology includes creating a five-dimensional digital twin model that incorporates both physical and virtual representations of the tool system, Figure 5. Deep learning techniques,

particularly the Deep Stacked Gated Recurrent Unit (DSGRU), are applied to the digital twin model for tool wear prediction. This model improves tool condition monitoring by analysing real-time sensor data, such as vibrations and cutting forces, from machining processes.

In the experimental setup, a CNC machine tool was monitored using sensors to collect data on vibrations and cutting forces in three axes (X, Y, Z). This data was then processed using deep learning models to predict tool wear and detect potential faults. The results showed that the digital twin model, combined with the deep learning approach, significantly improved the accuracy of tool wear predictions, enabling better maintenance planning and reduced downtime.

The authors conclude that digital twin technology, supported by advanced data analytics and machine learning, offers a promising solution for predictive maintenance in machining systems. It allows for real-time monitoring and proactive fault detection, which can extend the life of tools and improve overall operational efficiency in manufacturing environments.

3.5. Digital twin for predictive maintenance of gearboxes in wind turbine drivetrains

The development of a digital twin model for predicting the remaining useful life (RUL) of drivetrain components in floating offshore wind turbines (FWTs) is explored in [19]. These systems are particularly prone to failures due to the dynamic environment they operate in, experiencing a combination of wind, wake, and wave forces that make maintenance and failure prevention critical. The drivetrain system, which includes the rotor, bearings, gearbox, and generator, contributes to a significant portion of turbine failures, and predictive maintenance has the potential to reduce unexpected shutdowns and optimize maintenance schedules.

The digital twin concept introduced in this paper is based on a multi-degree-of-freedom torsional model that mimics the real-time behaviour of the drivetrain system. By analysing torsional vibration measurements, this digital twin model can predict the degradation of gearbox components, such as gears, which are vulnerable to contact fatigue damage.

To demonstrate the application of this approach, the authors conducted simulations using a 5MW reference floating turbine model. The digital twin model estimates dynamic properties like natural frequencies and damping, which are key indicators of drivetrain health. As gears degrade due to fatigue, these dynamic properties shift, and the model can track these changes in near real-time to assess the remaining life of the drivetrain components. The algorithm proposed for parameter estimation is designed to be computationally fast, making it suitable for real-time applications, with minimal processing delays.

A key aspect of the model is its ability to estimate contact stresses between gear pairs and to calculate the accumulation of fatigue damage using a physics-based degradation model. The stress data is analysed using the rainflow-counting method to estimate the cumulative damage to gear teeth over time. Simulation results showed a strong correlation between the digital twin model's predictions and high-fidelity simulation models, confirming its accuracy in estimating gear degradation.

However, the practical implementation of such models comes with challenges. Uncertainties in real-time measurements and model estimation can affect performance, though the authors propose methods to mitigate these issues. The computational simplicity of the model ensures that it can be integrated into existing wind turbine monitoring systems with little additional cost.

In conclusion, the paper presents a promising approach to extending the operational life of wind turbines through predictive maintenance. By utilizing a digital twin model, wind farm operators can monitor the drivetrain's health in real-time, allowing for timely maintenance interventions that prevent costly turbine failures. The paper suggests future work in hardware-in-the-loop simulations to further validate the approach for real-time operational use.

4. CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES OF PdMDT

As described in previous sections, predictive maintenance with digital twins offers numerous advantages, including improved system reliability, cost efficiency, and enhanced decision-making. However, despite these advantages, PdMDT faces several challenges that hinder its widespread adoption. One of the primary challenges is the high initial investment required to implement the technology. Organizations must invest in infrastructure, software, and expertise to effectively deploy PdMDT. The cost of sensors, IoT devices, and data infrastructure needed to collect and process real-time data can be prohibitive, especially for smaller companies with limited budgets [11]. Additionally, developing accurate and functional digital twins is a complex process that requires specialized expertise in modelling, data science, and system integration, further contributing to the high upfront costs [12].

Another significant challenge associated with PdMDT is the management and integration of large amounts of data. The real-time data generated by sensors and IoT devices can be overwhelming, and organizations must have robust systems in place to collect, store, and analyse this data effectively.

Cybersecurity is also a concern for organizations adopting PdMDT. The reliance on IoT devices and cloud computing introduces vulnerabilities, as these systems can be potential targets for cyberattacks. IoT devices, in particular, are often less secure than traditional IT systems, making them susceptible to breaches that could compromise the integrity of maintenance data. Ensuring the security of data transmission between physical assets and their digital twins is critical to preventing data breaches and maintaining trust in the system [12].

Looking ahead, the future of PdMDT is promising, with numerous opportunities for further development. One of the most significant future trends is the integration of artificial intelligence and machine learning into PdMDT systems. These technologies will enable more advanced predictive capabilities and smarter decision-making processes.

In addition to AI integration, PdMDT is expected to expand into a wider range of industries and sectors. Currently, PdMDT is most commonly used in industries such as manufacturing and energy, where the benefits of predictive maintenance are well recognized [11]. However, as the cost of IoT devices and digital twin technology decreases, other sectors such as healthcare, transportation, and infrastructure management are likely to adopt PdMDT to improve the maintenance of their critical assets [12].

5. CONCLUSION

The integration of digital twin technology into predictive maintenance of mechanical systems represents a transformative advancement in industrial operations. By creating a virtual replica of physical assets, digital twins enable real-time monitoring, simulation, and analysis of system performance, leading to enhanced decision-making processes. The applications of digital twins extend across various sectors, including manufacturing, aerospace, automotive, and energy, demonstrating their versatility and effectiveness.

One of the primary advantages of employing digital twins in predictive maintenance is their ability to provide insights into equipment health and performance metrics. By leveraging data analytics and machine learning algorithms, organizations can identify potential failures before they occur, reducing unplanned downtime and minimizing maintenance costs. This proactive approach not only improves asset reliability but also extends the lifespan of mechanical systems, allowing for optimized resource allocation.

In conclusion, the application of digital twins in predictive maintenance is not merely a technological enhancement; it signifies a paradigm shift in how organizations approach asset management. By embracing this innovative approach, industries can achieve significant operational efficiencies, cost savings, and improved safety outcomes. As digital twin

technology continues to evolve and become more accessible, its role in predictive maintenance will undoubtedly expand, paving the way for smarter, more resilient mechanical systems in the future.

6. REFERENCES

- [1] I. Errandonea, S. Beltrán, S. Arrizabalaga (2020), *Digital Twin for maintenance: A literature review*, Computers in Industry vol. 123, 103316.
- [2] D. Zhong, Z. Xia, Y. Zhu, J. Duan (2023), *Overview of predictive maintenance based on digital twin technology*, Heliyon vol. 9, Issue 4, e14534.
- [3] F. Tao, M. Zhang, A.Y.C. Nee (2019), *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, Academic Press, pp. 257-269.
- [4] Grieves, M., Vickers, J. (2017). *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*, In: Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer, pp. 85-113.
- [5] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020), *Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges, and Open Research*, IEEE Access vol. 8, pp. 108952-108971.
- [6] M. Grieves (2005), *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking*, McGraw-Hill.
- [7] E. Negri, L. Fumagalli, M. Macchi (2017), *A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems*, Procedia Manufacturing vol. 11, pp. 939-948.
- [8] Tekinerdogan, B.; Verdouw, C. (2020), *Systems Architecture Design Pattern Catalog for Developing Digital Twins*, Sensors vol. 20, Issue 18, 5103.
- [9] R. van Dinter, B. Tekinerdogan, C. Catal (2022), *Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review*, Information and Software Technology vol. 151, 107008.
- [10] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A.Y.C. Nee (2019), *Digital twin in industry: State-of-the-art*, IEEE Transactions on Industrial Informatics vol. 15, Issue 4, pp. 2405-2415.
- [11] C. Verdouw, B. Tekinerdogan, A. Beulens, S. Wolfert (2021), *Digital twins in smart farming*, Agricultural Systems vol. 89, 103046.
- [12] Q. Qi, F. Tao (2018), *Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison*, IEEE Access vol. 6, pp. 3585-3593.
- [13] Y. Lu, C. Liu, K. I-Kai Wang, H. Huang, X. Xu (2020), *Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing vo. 61, 101837.
- [14] Zheng, Y., Yang, S., Cheng, H. (2019), *An application framework of digital twin and its case study*, J Ambient Intell Human Comput vol. 10, pp. 1141-1153.
- [15] P. Aivaliotis, K. Georgoulas, G. Chryssolouris (2019), *The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing vol. 23, Issue 11, pp. 1067-1080.
- [16] MathWorks, 2019. *Predictive Maintenance Using a Digital Twin*. <https://www.mathworks.com/company/technical-articles/predictive-maintenance-using-a-digital-twin.html> (accessed 19 October 2024).
- [17] P.K. Rajesh, N. Manikandan, C.S. Ramshankar, T. Vishwanathan, C. Sathishkumar (2019), *Digital Twin of an Automotive Brake Pad for Predictive Maintenance*, Procedia Computer Science vol. 165, pp. 18-24.
- [18] Q. Qiao, J. Wang, L. Ye, R. X. Gao (2019), *Digital Twin for Machining Tool Condition Prediction*, Procedia CIRP vol. 81, pp. 1388-1393.
- [19] Moghadam F.K., Rebouças G.F.d.S., Nejad A.R (2021), *Digital twin modeling for predictive maintenance of gearboxes in floating offshore wind turbine drivetrains*, Forsch Ingenieurwes vol. 85, pp. 273-286.

STEM Toys: A Review of Applications in Engineering Education

Alma Žiga, assoc. prof.
University in Zenica, Mechanical Faculty
Zenica, B&H

ABSTRACT

STEM is an acronym for science, technology, engineering and math. These four fields share an emphasis on innovation, problem-solving, and critical thinking. This paper will present some STEM toys and models designed and analyzed through student assignments at the Faculty of Mechanical Engineering in Zenica. They cover a wide range of mechanical engineering fields from statics, kinematics, dynamics, strength of materials, composite materials, CAD technologies and unconventional production techniques.

Key words: STEM toys, kinematics, strength of materials, laser cutting, 3D printing

1. THE PURPOSE OF STEM TOYS

The focus on logical thought processes and problem-solving allows students to develop mental habits that will help them succeed in any field. STEM coursework challenges students to think critically and come up with their own solutions. It's about learning how to apply the knowledge and frameworks of science, technology, engineering, and math to design innovative solutions and creatively solve problems. In a world dominated by computers, these STEM learning toys offer screen-free and immersive ways to grasp scientific concepts, logic and promote problem solving. Designing STEM toys requires and allows analysis of statics, kinematics, dynamics and strength of materials.

2. STEM TOYS DESIGNED AND ANALYSED AT THE FACULTY

In this section, some STEM toys will be presented along with analyses that have been conducted. Every toy was a seminar or diploma project undertaken by students at the first or second cycle of the Mechanical Engineering program at the University of Zenica.

2.1 The mechanical toy watch

First toy is the mechanical toy watch presented in Fig. 1, [1]. The mechanism for opening iris petals is essentially the crank-slider mechanism in the third inversion, as presented in Fig. 2. Position vector of pivot A is expressed in Eq. 1 and consequently, through derivation, the expression for the velocity of pivot A and the angular velocities of petal are obtained.

$$\vec{R}_{A02} = \vec{R}_{O3O2} + \vec{R}_{O1O3} + \vec{R}_{A01} \quad \dots(1)$$

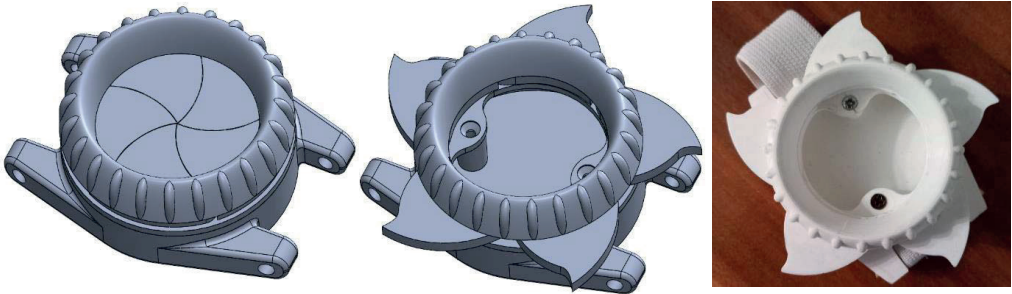


Fig. 1 The mechanical toy watch

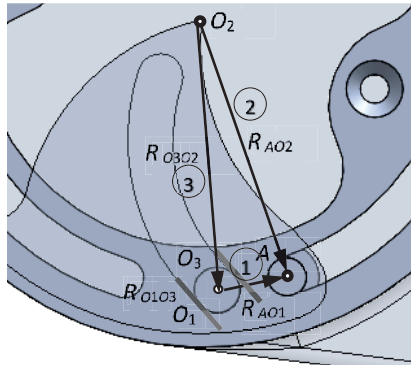
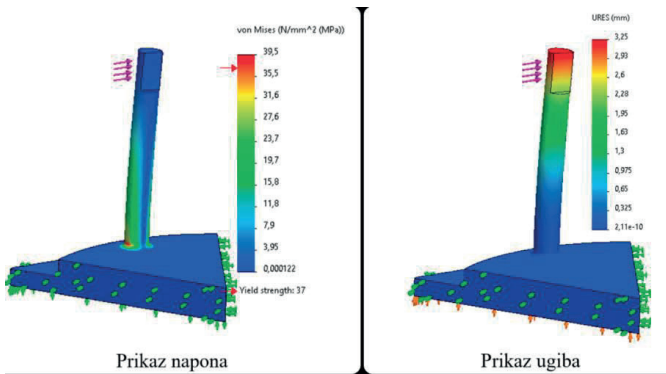
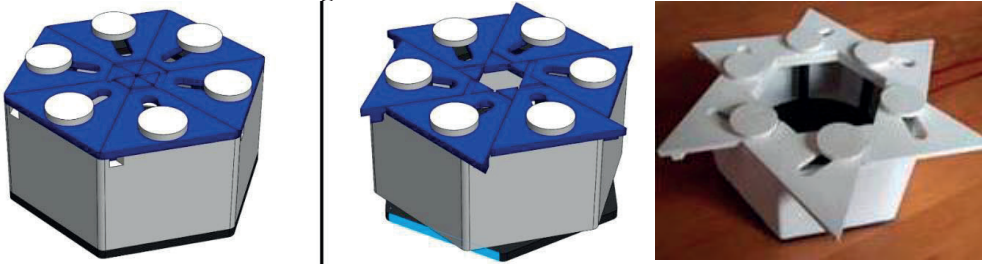


Fig. 2 The crank-slider mechanism

2.2 The mechanical iris hexagonal box



Gender	Average torque [Nmm]
Male (12)	9670
Female (10)	5910
Average	7960

Fig. 3 The mechanical iris hexagonal box

This mechanical iris hexagonal box is a mechanical souvenir made of 215 grams of PLA material with 3D printer (Fig. 3), [2]. The columns were the weak elements, so analytical and numerical analysis of stresses in the base columns was performed. The goal was to find out if an adult could do damage to the columns. The average adult female can achieve a torque of 5910 Nmm when opening the jar, and the analysis showed that this torque was enough to potentially break the column.

2.3 The rolling ball sculpture

The rolling ball sculpture (Fig. 4), [3], even the simple one, can be viewed as mechanical design challenge. If a sculpture is made of poplar plywood, then bending and twisting of a track causes stresses which can destroy rails of track. Another aspect is the kinematic and dynamics of rolling ball. Sections of track where the rails are closer together will cause the ball to roll faster, but the ball is more likely to fall off the track. Centripetal force acting on the ball on spiral path increases in intensity with square of velocity and might cause ball to fall off. All these aspects have been analyzed.

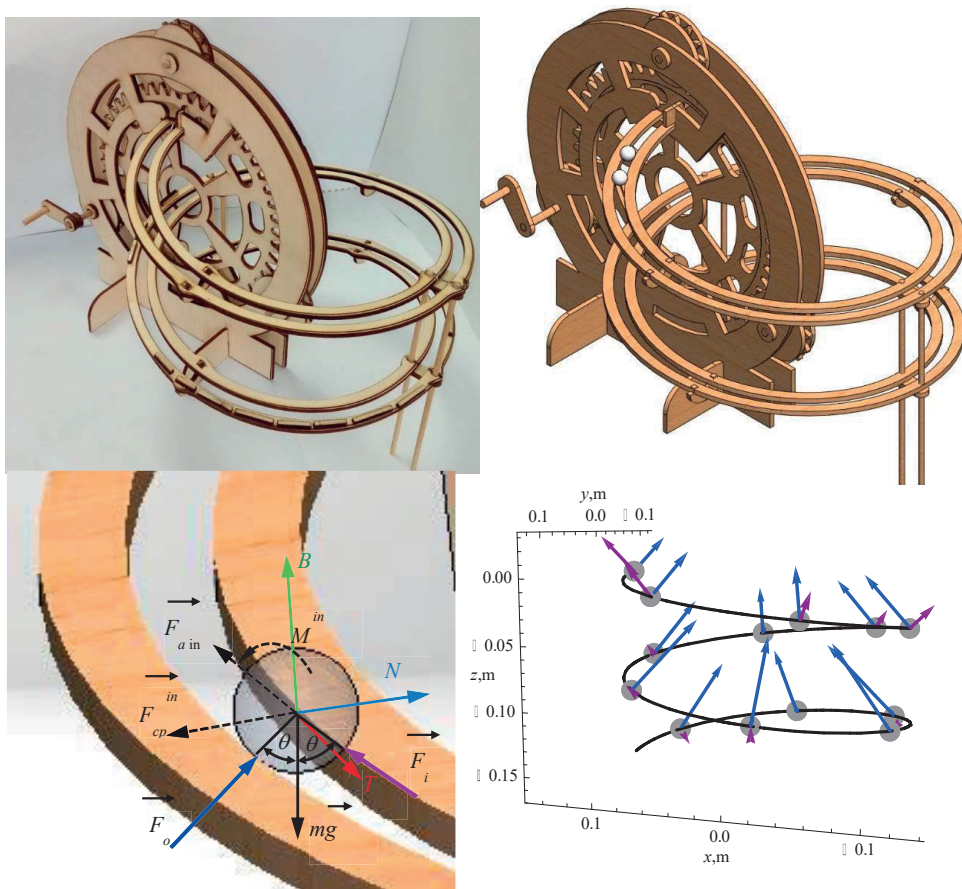


Fig. 4 The rolling ball sculpture as mechanical design challenge

2.4 The interactive donation box

The interactive donation box (Fig. 5), [4], shows the animation that is triggered by inserting a coin. The animation uses certain symbols to tell the story of the association (foundation or individual) about the purpose of the donated coins. The design of such a box can be purely mechanical due to the shape and weight of the coins themselves. When rolling down a steep plane, the potential and kinetic energy of the coin is partly converted into the kinetic energy of the rotation of the elements on the track. The elements can have rotational or oscillatory motions. For smaller coins, 50 pf and 1 KM, which mass is 5 grams, the swinging rod mass will have to be less than 8.2 grams so the velocity of the coin remains positive, i.e. the coin rolls down the track.

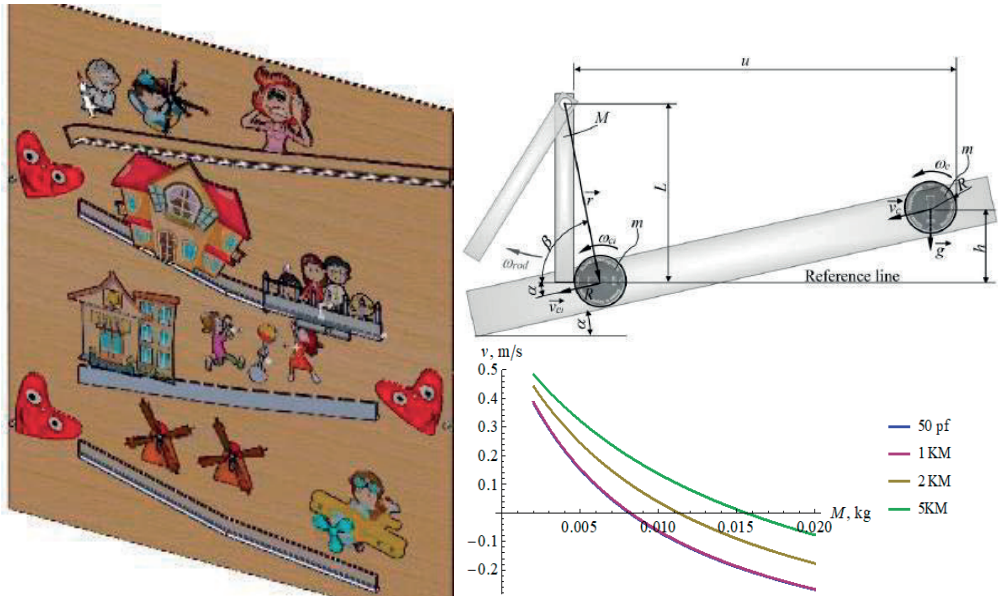


Fig. 5 The interactive mechanical donation box

2.5 The simple marble machine

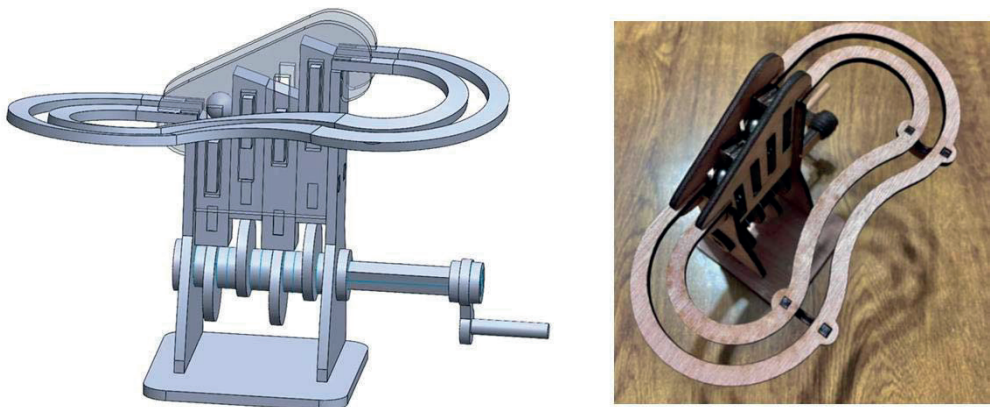


Fig. 6 The simple marble machine, SMM

The simple marble machine (SMM, Fig. 6), [5-7] as the one presented in [8] Simple Marble Machine - Busted Bricks was designed. SMM is made of poplar plywood. The main concern during design was the ability of tracks to bend and twist. So stress analysis of inner track has been made. This track is modeled like C shaped beam, made from composite material. It is poplar plywood with three layers of veneers that are glued together with adjacent layers having their wood grain rotated up to 90 degrees to one another. Using numerical analysis, the optimal shape of beam should be obtained together with possible weak spots in design.

2.6 The scissor lift STEM toy

The scissor lift STEM toy (Fig. 7), [9], was used to create a 3D model of a scissor lift mechanism, perform kinematic analysis using design software and compare the results with analytical kinematic analysis. In the scissor lift mechanism, the linear motion of a piston (Fig. 7) is transformed into the vertical movement of the platform through the levers floating motion. By setting a velocity function for the piston (Eq. 2), the corresponding displacement (s , Eq. 3) and height (h , Eq. 4) functions are derived. These functions allow us to determine the displacement and velocity of the scissor lift platform (Eq. 5 and Eq. 6).

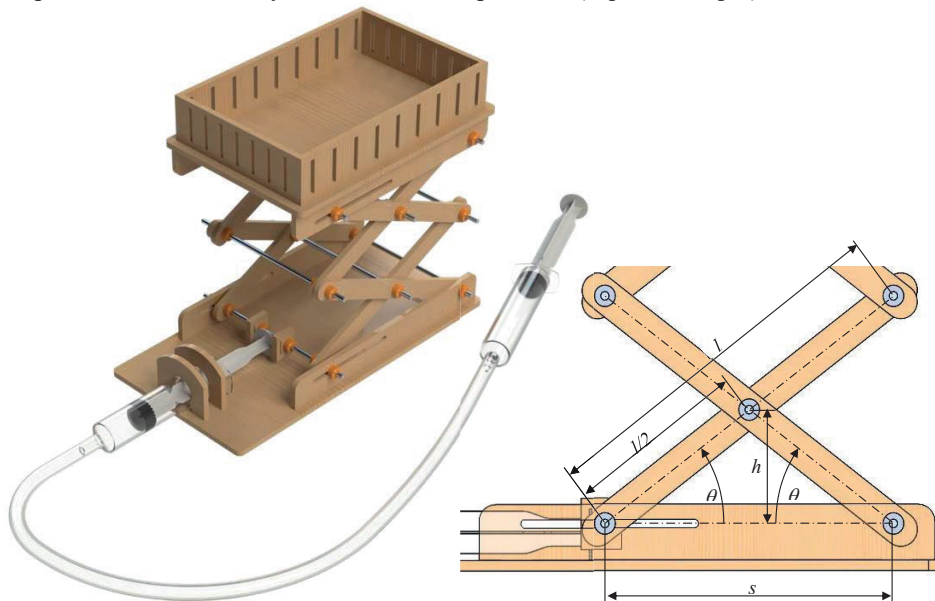


Fig. 7 The scissor lift STEM toy

$$v_{piston} = 8t - 2t^2 \quad \dots(2)$$

$$s = 86.8 - 4t^2 + \frac{2}{3}t^3 \quad \dots(3)$$

$$h = \frac{1}{2}\sqrt{l^2 - s^2} \quad \dots(4)$$

$$\text{Platform displacement} = 2\sqrt{87.5^2 - \left(86.8 - 4t^2 + \frac{2}{3}t^3\right)^2} \quad \dots(5)$$

$$v_{platform} = \frac{-2\left(86.8 - 4t^2 + \frac{2}{3}t^3\right)(8t - 2t^2)}{\sqrt{87.5^2 - \left(86.8 - 4t^2 + \frac{2}{3}t^3\right)^2}} \quad \dots(6)$$

The scissor lift platform has a maximum velocity about 4.5 times higher than the maximum velocity of the piston and the platform has about 4.5 times the displacement in relation to the piston. This information best describes the usefulness of this mechanism and explains why it is used in practice

3. CONCLUSION

STEM toys gives possibility to apply knowledge that is being acquired during Mechanical courses at the technical faculty. Another aspect is artistic component of design. Every student can express their vision of toy. The toy can be conceived as an idea, modeled in SolidWorks, analyzed and then ‘digitally’ produced. The final step involves producing toy parts via laser cutting and 3D printing, ensuring proper assembly and manufacturing tolerances. Another interesting aspect toward finished product is an assemblage. No matter how design is detail and every aspect is analyzed, there are always some unpredicted circumstances that should be overcome.

4. REFERENCES

- [1] A. Žiga, A. Čaro and L. Mešeljević, "3D PRINTED TOY WATCH WITH MECHANICAL IRIS," in *New Technologies, Development and Applications, NT-2024*, Sarajevo, 2024.
- [2] A. Žiga, J. Kačmarčik and I. Behadarević, "3D Printed Souvenir with Mechanical Iris," in *International Conference "New Technologies, Development and Applications*, Sarajevo, 2023.
- [3] A. Žiga and Đ. Begić-Hajdarević, "Rolling ball sculpture as a mechanical design challenge," in *International Conference "New Technologies, Development and Applications*, Sarajevo, 2021.
- [4] A. Žiga and B. Hinović, "Interactive Mechanical Donation Box," in *New Technologies, Development and Applications*, Sarajevo, 2021.
- [5] A. Žiga, Z. Cogo and J. Kačmarčik, "OUT-OF-PLANE DEFLECTION OF J-SHAPED BEAM," in *International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"*, Karlovy Vary, Czech Republic, 2018.
- [6] A. Žiga, M. Čobo and A. Baručija, "POWER REGRESSION MODEL: PARAMETERS DETERMINATION," in *Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem "QUALITY 2019"*, Neum, B&H, 2019.
- [7] A. Žiga and J. Kačmarčik, "Plywood Cantilever Deflection: Experimental, Analytical and FEM Approach," *Wood Industry/Drvna Industrija*, vol. 74, no. 1, p. 8, 2023.
- [8] M. Henriksen, "Simple Marble Machine," [Online]. Available: <https://www.bustedbricks.com/simple-marble-machine-4-p.asp>. [Accessed 7 october 2024].
- [9] A. Žiga, T. Amra and A. Barlov, "KINEMATIC ANALYSIS OF SCISSOR LIFT STEM TOY," in *International Conference on Mathematical Modelling in Mechanics and Engineering, ICME 2024*, Belgrade, 2024.

PROTOTIP VR HEADSET-A I MOGUĆNOST PRIMJENE U ODRŽAVANJU

VR HEADSET PROTOTYPE AND APPLICATION IN MAINTENANCE

Amel Karić, viši asistent
Mašinski fakultet Zenica
Zenica

Dragi Tiro, redovni profesor
Univerzitet „Džemal Bijedić“ Mostar
Mostar

REZIME

U radu je opisan razvoj virtualnog i fizičkog prototipa headset-a za virtualnu stvarnost. U posljednje vrijeme postoji mogućnost da se na raznim mrežama kao što je Youtube pogledaju video sadržaji prilagođeni virtualnoj stvarnosti. Postoje takvi video sadržaji koji su vezani za održavanje mašina i opreme. Prototip VR headseta treba da omogući korisniku da pogleda takve sadržaje i primjeni ih u održavanju.

Ključne riječi: virtualna stvarnost, headset, prototip, 3D printanje

SUMMARY

The paper describes the development of a virtual and physical headset prototype for virtual reality. Lately, there is the possibility to watch videos adapted to virtual reality on various networks such as YouTube. There are such video contents that are related to the maintenance of machines and equipment. The VR headset prototype should allow the user to view such contents and apply them in maintenance.

Keywords: virtual reality, headset, prototype, 3D printing

1. UVOD

U posljednje vrijeme sve je aktuelnija priča o kreiranju metaverzuma, gdje bi ljudi imali cjelokupne životne aktivnosti u virtuelnom svijetu, od posjedovanja imovine i nekretnina, kreiranja sopstvenog izgleda lika, upoznavanja i druženja sa drugim ljudima, posjećivanja zabava i slično. Koliko god se ta ideja nekome sviđala ili ne očigledno je da cjelokupno društvo ide u pravcu digitalizacije i virtualizacije svega, te virtualna stvarnost lagano ulazi u naše živote i oblikuje naše aktivnosti.

Pojam virtualna stvarnost bi se mogla okarakterisati kao prividna okolina kreirana pomoću računara i posebnih računarskih periferija i programa, unutar kojeg je korisniku omogućen privid boravka, kretanja i opažanja. Prvi VR uređaji se pojavljuju u drugoj polovini 20. vijeka, ali zbog cijene koristili su se samo za specijane svrhe kao što su: medicinski zahvati, simulacija leta, dizajn automobila i vojna obuka. [4]

Prve konzole za komercijalne svrhe pojavljuju se krajem 20. i početkom 21. vijeka, a nakon toga se dešava eksplozija u razvoju VR uređaja. Inovativan primjer primjene VR Headset-a je i primjena za analizu navika vozača automobila koju je proveo G. Pai. On je primjenom VR Headset-a analizirao reakcije ljudi prilikom vožnje u raznim situacijama, a što bi bilo teško provodivo i opasno da se istraživanje vršilo tokom stvarne vožnje. [2]

Najpristupačniji i najjeftiniji uređaj za prikaz virtualne stvarnosti do sada razvijen je VR Headset, koji u stvari predstavlja kućište za mobilne telefone i koji se montira na glavu, a za 3D prikaz koristi ekran mobitela. Zbog blizine ekrana mobitela i korištenja sočiva omogućava se doživljaj 3D okruženja. Da bi se koristio u te svrhe prikaz na ekranu mobitela mora biti prilagođen, tj. ekran mora biti podijeljen na dva dijela za pojedinačni prikaz za oba oka, a što se postiže korištenjem odgovarajućih aplikacija. Na ovaj način omogućen je 3D prikaz filmova i drugih video uradaka, a zavisno od tehnoloških mogućnosti mobitela, moguće je korištenje i u druge svrhe, kao što je igranje igrica, razgledanje objekata, VR muzeja itd. U ovom radu provedena je procedura brzog razvoja prototipa VR Headset-a.

2. RAZVOJ IDEJNOG RJEŠENJA VR HEADSET-A

Razvoj prototipa prolazi kroz nekoliko faza. Prva od tih faza jeste razvoj funkcionalnog prototipa, tj. razvoj prototipa koji bi mogao zadovoljiti sve neophodne funkcije modela. Nakon razvoja koncepta prototipa pristupa se razvoju pojedinih detalja, a potom optimizaciji oblika i dizajna.

Analizom je ustavljeno da prototip mora zadovoljiti sljedeće funkcije: osigurana montaža mobitela u kućište; jednostavno stavljanje i vađenje mobitela iz uređaja; ergonomski prihvatljiva montaža na glavu korisnika; pričvršćivanje na glavu korisnika; odgovarajući položaj mobitela u odnosu na oči korisnika. Dalji razvoj oblika modela mora zadovoljavati sve navedene funkcijske zahtjeve.

2.1. Osnovni oblik kućišta

Ograničavajući parametri za oblik i dimenzije kućišta VR Headset-a su: veličina mobitela, geometrija glave i potrebna udaljenost mobitela od očiju. Najvažniji parametar kod dimenzionisanja kućišta je veličina mobitela. Kućište mora biti dizajnirano tako da može prihvatiti mobitele raznih dimenzija, od najvećih do najmanjih. Analizom raznih modela mobitela utvrđeno je da je većina mobitela veličine do 6,5 inča, tj. 165,1 mm po dijagonali. Postoje mobiteli i većih dimenzija, ali takvi nisu prisutni u širokoj upotrebi, pa se sa ciljem racionalizacije geometrije i oblika svjesno prihvata da će postojati neki mobiteli koji ipak neće moći da se koriste sa navedenim uređajem. [5]

Drugi parametar prema kojem se vrši dimezionisanje kućišta je geometrija glave korisnika. Kod geometrije glave najbitniji parametri su razmak zjenica očiju, širina čela, te dimenzije nosa. Pošto se uređaj montira na način da se pritegne uz lice, pri čemu lice služi kao oslonac, a uređaj je konzolno okačen na lice, to se odabiru dimenzija lica mora posvetiti posebna pažnja. Ukoliko postoji značajno odstupanje, onda se može desiti da se uređaj oslanja samo na nekoliko mjesta na licu, a ne na cijelo lice, pa može doći do osjećaja neudobnosti ili povrede lica. Pošto su dimenzije lica uveliko različite, analizom nekoliko izvora određen je optimalni oblik koji odgovara većini korisnika. [6, 7, 3]

2.2. Princip montiranja mobitela

Kod razvoja sistema za montažu mobitela unutar VR headseta potrebno je voditi računa da sistem montaže mobitela mora biti jednostavan kako bi se mobitel brzo i jednostavno mogao staviti ili izvaditi iz kućišta. Takođe, sistem mora dovoljno čvrsto da drži mobitel kako ne bi došlo do ispadanja mobitela prilikom okretanja glave. Razmatrano je nekoliko osnovnih principa stavljanja mobitela u kućište, a to su:

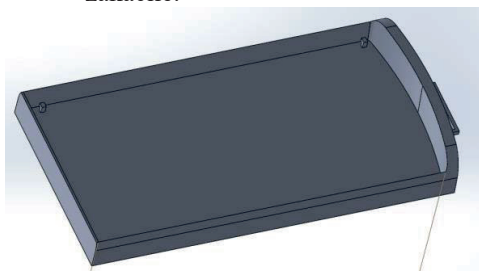
- preklapanje čeonog dijela kućišta, gdje bi se nakon ubacivanja mobitela čeoní dio zatvorio kao vrata
- ubacivanje mobitela odozgo ili sa strane, pri čemu bi na kućištu morao biti izrađen otvor za ubacivanje mobitela. Otvor za ubacivanje mobitela bi značajno smanjio čvrstoću kućišta, a posebno ako bi se mobitel stavljao odozgo, jer bi otvor morao biti duž cijelog mobitela. Ovaj princip takođe ima nedostatak jer bi se nakon ubacivanja mobitela otvor kroz koji je mobitel ubačen morao zatvoriti nekim poklopcem da ne ulazi svjetlost u kućište.
- ubacivanje mobitela pomoću ladice. Na ovaj način bi se mobitel montirao i učvrstio u ladicu, a ladica bi se zatim ubacila u kućište, te bi bila učvršćena vodilicama, a samim ubacivanjem ladice ulaz kroz koji je ubačena bi se zatvorio. Prednost ovog principa je što je ladica kada je izvađena izuzetno pristupačna za montiranje i učvršćivanje mobitela. Nedostatak je što se djelomično smanjuje čvrstoća kućišta pravljenjem otvora, te se dodavanjem ladice i vodilica za ladicu povećava masa uređaja, a čime se povećava i opterećenje na glavu korisnika

Nakon analize navedenih varijanti izveden je zaključak da je najbolja varijanta montiranja mobitela sa ladicom.

2.3. Princip pričvršćivanja mobitela u ladicu

Kao što je prethodno rečeno, pošto je cijela jedna strana mobitela ekran, te nije pogodno da se bilo kakvi pričvršćivači nalaze sa te strane, to je princip pričvršćivanja mobitela dodatno izazovan zadatak. Moguće varijante za pričvršćivanje mobitela su:

- varijanta sa pritiskom mobitela sa strana. Na ovaj način bi se mobitel stisnuo između dvije pločice. Nedostatak ove varijante je kompleksnost sistema ostvarivanja pritiska na mobitel. Takođe nedostatak je i problem centriranja mobitela.
- varijanta sa elastičnim trakicama. Na ovaj način bi se mobitel jednostavno stavio u ladicu i stegao elastičnim trakicama koje bi prelazile preko krajeva ekrana mobitela. Široko pozicionirane trake bi onemogućavale bilo kakvo pomjeranje ili ispadanje mobitela. Na ovaj način nije potrebno dodavati nikakve mehanizme za učvršćivanje mobitela, nego je potrebno na modelu dodati četiri kukice za koje bi se trakice zakačile.



Slika 1. Ladica za montažu mobitela sa kukicama



*Slika 2. Princip stezanja uređaja na glavu.
Lijevo – princip sa elastičnim trakama, desno
– princip sa plastičnim okvirom*

Druga varijanta je usvojena kao bolja, jednostavnija i funkcionalnija. Na Slici 1. je prikazan 3d model odabrane ladice za mobitel.

2.4. Princip vezivanja VR Headset-a na glavu

Vezivanje uređaja na glavu je još jedan u nizu koraka koje je potrebno definisati prije izrade prototipa. Razmatrano je nekoliko mogućih načina vezivanja na glavu: vezivanje pomoću

plastičnog okvira kojim bi se stezanjem vijka mijenjao obim i ostvarivao pritisak na glavu; vezivanje pomoću elastičnih traka.

Prvi način je kompleksniji jer je potrebno uraditi oslonac za vijak, te nazubljenje na plastičnoj traci. Sa druge strane na ovaj način bi se moglo ostvariti jače stezanje, te jednostavno regulisati sila stezanja na glavu. Druga varijanta je znatno jednostavnija, a funkcionalnost se može upotpuniti dodavanjem još jednog elastičnog pojasa koji bi išao preko glave do potiljka. Na taj način bi se ostvarilo vezivanje u tri tačke. Elastična traka se jednostavno prilagođava obliku glave, pa je udobnija za nošenje od plastične trake.

Druga varijanta je prihvaćena kao bolja po mnogim parametrima, a pa je konačni model i urađen po toj varijanti.

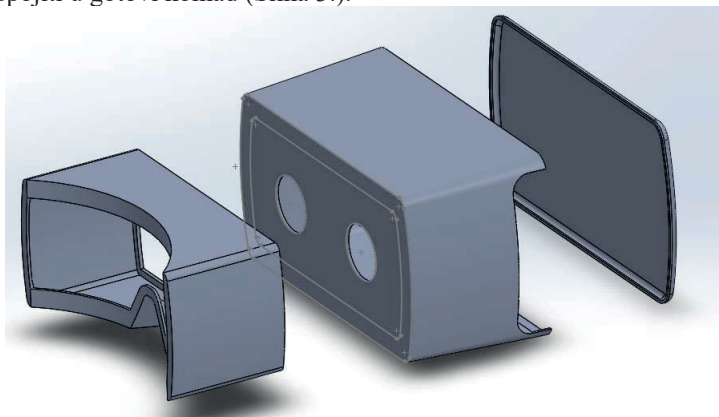
3. OPTIMIZACIJA OBLIKA I DIMENZIJA ZA 3D PRINTANJE

Postoje pravila printanja koja treba slijediti kako bi printanje bilo uspješno, dimenzije tačne i estetski izgled zadovoljavajući. Prvi korak prilikom 3D printanja je izrada „brim-a“, a to je ustvari proširenje podloge kojom se printani element oslanja na noseću ploču, što softver automatski određuje, a moguće je i ručno unijeti izmjene ili ga ukinuti ako je površina kontakta sa podlogom dovoljno velika. [8]

Potrebno je isprintati oslonce koji služe da pruže potporu novim slojevima koji se šire u odnosu na osnovu u bočnom pravcu. Ti oslonci se kasnije lome i uklanjaju. Poželjno je da oni budu sa strane koja neće biti vidljiva na gotovom komadu. [9]

3.1. Dijeljenje kućišta na segmente koji će se kasnije lijepiti

Kako bi se omogućilo printanje sa korištenjem što je moguće manje dodatnih oslonaca, čime se ostvaruje ušteda materijala i znatna ušteda vremena, ali i ljepši izgled gotovog komada, ukupni element je podijeljen na nekoliko segmenata. Ti segmenti će se nakon printanja lijepljenjem spojiti u gotovi komad (Slika 3.).



Slika 3. Kućište podijeljeno na segmente prilagođene za 3d printanje

3.2. Posebno printanje zakački za elastičnu traku

Iako su sastvni dio kućišta, zakačke za elastičnu traku su posebno printane, a kasnije zalijepljene na kućište. Osnovni razlog je što je bilo teško odrediti odgovarajući mehanizam za pričvršćivanje uređaja na glavu prije nego je on isprintan. Takođe, u trenutku printanja nisu bile dostupne elastične trake za stezanje na glavu, pa nije bila poznata ni širina potrebnih zakački. U svakom slučaju, posebnim printanjem zakački izbjegnuta je potreba za printanjem dodatnih oslonaca u slučaju da su se zakačke printale skupa sa kućištem.

3.3. Optimizacija ladice

Dizajn ladice je prošao kroz nekoliko faza. Prva varijanta dizajna urađena je sa osloncima ispod poda ladice kako bi se postigla čvrstoća ladice na savijanje. Međutim, problem se javio prilikom printanja takvog oblika, jer je bila mala površina u kontaktu sa nosećom podlogom. Osim toga problem je bilo i printanje dodatnih oslonaca jer je trebalo po cijeloj površini uraditi dodatne oslonce, a čime bi se dodatno produžilo vrijeme printanja, narušio izgled i tačnost dimenzija ladice, a moguće je da prilikom printanja takvog oblika usljed povećanja temperature dođe do savijanja poda ladice.

Druga varijanta urađena je sa ravnim podom ladice, a čvrstoća na savijanje je kompenzirana izvedbom debljeg dna ladice. Bočne stranice su izvedene tako da služe kao dodatna ojačanja. Sprječavanje izvlačenja i ispadanja ladice ostvareno je pomoću trenja ladice od vodilice. Horizontalno ulaganje ladice je povoljno i po pitanju djelovanja sila, jer kada korisnik pomjera glavu bočne sile koje djeluju na ladicu nisu velike. Osim toga težina ladice sa mobitelom omogućava dodatni pritisak na vodilicu čime se povećava sila trenja i sprječava bočno pomjeranje i izvlačenje ladice. Na ovaj način je eliminisana potreba za izvedbom dodatnog mehanizma za zaključavanje ladice.

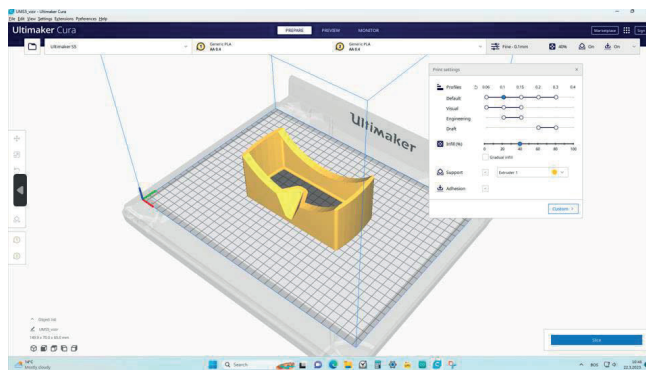
Nalijeganje ladice na vodilice treba da bude optimalno kako sila trenja ne bi bila prevelika pa da se i prilikom ulaganja ladice javi preveliki otpor. Nalijeganje je moguće korigovati i nakon printanja ukoliko je preklapanje preveliko. U tom slučaju se blagim brušenjem može izvršiti naknadna korekcija.

4. PRINTANJE 3D MODELA

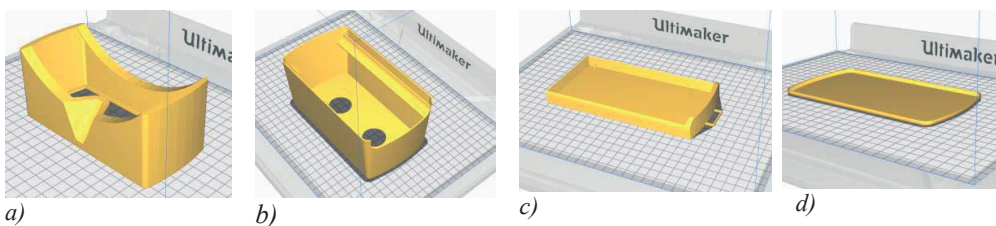
Printanje prototipa je izvedeno na 3D printeru Ultimaker Pro. Prije printanja svi modeli su snimljeni u formatu .STL kako bi ih bilo moguće otvoriti u programu Ultimaker Cura u kome se priprema kod za 3D printer.

Nakon pokretanja programa Ultimaker Cura, potrebno je ubaciti element koji je potrebno isprintati. Moguće je ubaciti više elemenata u isti radni prostor. Na taj način je moguće ostvariti uštedu u vremenu, jer se samo jednom vrši početno pozicioniranje i zagrijavanje mlaznice. Osim toga, na ovaj način operater ne mora biti fizički prisutan kada se jedan dio završi da bi oslobodio radni prostor i pokrenuo novo printanje. Međutim, moguće je da vrijeme printanja na ovaj način bude duže ukoliko zbog oblika i položaja elemenata bude previše praznog hoda u toku printanja. Printanje više elemenata istovremeno je korisno kada su u pitanju manji elementi, sa kraćim vremenima printanja. Kukice za elastičnu traku su isprintane u više komada istovremeno, dok su ostali elementi printani pojedinačno.

Prilikom printanja moguće je podešavati razne parametre printanja koji utiču na kvalitet, čvrstoću, izgled i dužinu printanja. Faktor koji najviše utiče na brzinu printanja je debljina sloja, te što je sloj tanji dobijamo ljepše površine i prelaze, ali i znatno duže vrijeme printanja. Optimiziranjem kvaliteta i dužine printanja za sve elemente je usvojena debljina printanog sloja od 0,2 mm. Potrebno vrijeme za printanje je: za vizir 10 h, za kućište 16 h, za ladicu 7 sati i za poklopac 6 sati. Na Slici 4. je prikazan interfejs programa Ultimaker Cura, a na Slici 5. su prikazani elementi u pozicijama za printanje:

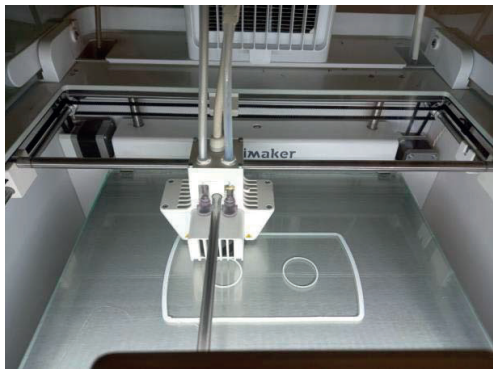


Slika 4. Interfejs programa Ultimaker Cura



Slika 5. Elementi u pozicijama za printanje: a – vizir, b – kućište, c – ladica, d - poklopac

Bitan podatak za printanje je i postotak ispunje koji definiše koliko će unutar debljih dijelova elementa biti šupljeg prostora. S obzirom da je skoro cijeli sklop dizajniran kao tankostijeni element svi zidovi su printani sa potpunom ispunom. Na slici (6) su prikazani elementi kućišta i ladice u toku printanja.



Slika 6. Proces printanja kućišta



Slika 7. Izgled elemenata nakon printanja

Nakon završenog printanja dobiveni su elementi prikazani na slici 7. 3D printanje se može uraditi sa plastikom različitih boja i mehaničkih karakteristika. Prilikom printanja sklopa korišten je PLC materijal bijele boje, pa je sklop isprintan u bijelu boju. Nakon sklapanja i izvršene probe funkcionalnosti uređaja uočeno je da bijela boja značajno reflektuje svjetlost ekrana mobitela unutar kućišta značajno umanjujući doživljaj 3D okruženja, pa je bilo potrebno ofarbati sklop u crnu boju. Nakon farbanja na osnovicu kućišta su zalijepljena sočiva, a potom su elementi spojeni i zalijepljeni brzosušćim ljepilom. Na

sklop su potom zalijepljene zakačke za elastičnu traku, elastična traka je provučena kroz kukice, izrezana na odgovarajuće dužine i zašivena na krajevima. Na slici 8. je prikazan sklop u završnom obliku.



Slika 8. Završni oblik prototipa VR Headseta

5. MOGUĆNOSTI PRIMJENE U ODRŽAVANJU MAŠINA I OPREME

Sve više firmi koristi VR tehnologiju za obuku operatora za održavanje, kao i za objašnjenje ljudima koji se bave održavanjem kako demontirati određeni dio ili sklop, kako ga zamijeniti, montirati i slično. Za ovo je potrebno imati VR headset, kao što je prototipno rješenje razvijeno u ovom radu.

Na Slici 9. je prikazana primjena VR headset-a u firmi koja se bavi održavanjem letjelica. Ovim se postiže povećana produktivnost u održavanju.



Slika 9. Primjena VR u održavanju letjelica

6. ZAKLJUČAK

Moderne tehnologije 3D printanja omogućavaju brzu izradu prototipova objekata koji su u fazi razvoja. Analizom stvarnog napravljenog modela VR headset-a moguće je puno lakše i efikasnije uočiti nedostatke na modelu nego što je to moguće uraditi samo virtualnom analizom modela u 3D prikazu. Korištenjem metode brze izrade prototipova moguća je brza i jeftina izrada i nekoliko verzija razvojnog elementa, sve dok se ne postigne zadovoljavajuća funkcionalnost i kvalitet elementa. Na ovaj način model se razvija i uklanjaju se nedostaci, a u konačnu serijsku proizvodnju ide gotov, unaprijeđen i optimiziran model štedeći pri tome vrijeme i novac.

Većina optimizacija na modelu VR Headset-a je urađena u fazi prije same izrade modela. Međutim, neke stvari su naknadno uočene, te bi se trebale poboljšati u narednim koracima razvoja. Prva od njih jesu kukice za elastičnu traku koje bi bilo pogodno izraditi zajedno sa osnovicom kućišta, a problem bočnog širenja prilikom printanja moguće je riješiti konusnom izvedbom kukica za traku.

Sljedeći korak u daljoj optimizaciji bi bio poboljšanje dizajna elementa, gdje bi se cjelokupan model, osim ladice, mogao uraditi kao jedan element, a razlika širine na mjestu montiranja mobitela i sa druge strane na mjestu koje se naslanja na čelo bi se mogla riješiti postepenim sužavanjem vanjskih kontura. To bi povoljno uticalo na izgled, a i ukupna masa bi se smanjila.

Primjenom adekvatnih video sadržaja koje daju proizvođači opreme moguće je VR headset koristiti za obuku osoblja za održavanje mašina i opreme, kao i pri samim fazama održavanja, čime se može znatno uštediti vrijeme.

Cjelokupan proces izrade prototipa se može ocijeniti kao izuzetno uspješan. Postignut je funkcionalan model, jednostavan i pouzdan za korištenje, te jeftin u slučaju eventualne serijske proizvodnje.

6. REFERENCE

- [1] J.L. Tseng, (2016) *Development of a Low-Cost 3D Interactive VR System using SBS 3D Display, VR Headset and Finger Posture Motion Tracking*, International journal of advanced studies in computer science and engineering, 5/8
- [2] G. Pai, (2019) *The Promise of VR Headsets: Validation of a Virtual Reality Headset-Based Driving Simulator for Measuring Drivers' Hazard Anticipation Performance*, Master Thesis, University of Massachusetts Amherst
- [3] Y.L. Liu, M.M.F. Yuen, (2008) *Geometry-optimized virtual human head and its applications*, Computers and Graphics, Elsevier 32/6
- [4] Internet: <https://www.fi.edu/en/virtual-reality/history-of-virtual-reality>; pristup 22.2.23.
- [5] Internet: <https://www.phonearena.com/phones/size>, pristup 27.2.23.
- [6] Internet: <https://www.reference.com/science-technology/average-size-human-head-62364d028e431bf3>, pristup 3.3.23.
- [7] Internet: <https://sketchfab.com/3d-models/human-head-f46d952886ae4a8c8851341b810bba43>, pristup 6.3.23.
- [8] Internet: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/> pristup 3.1.23.
- [9] Internet: <https://all3dp.com/2/3d-print-quality-12-tips-on-how-to-improve-it/> pristup 4.1.23.

**ZNAČAJ ODRŽAVANJA I RAZVOJA INFRASTRUKTURNIH
KAPACITETA U FUNKCIJI OSIGURAVANJA KVALITETA
VISOKOG OBRAZOVANJA NA UNIVERZITETU U ZENICI**

**THE IMPORTANCE OF MAINTENANCE AND DEVELOPMENT OF
INFRASTRUCTURE CAPACITIES IN THE CONTEXT OF
STRENGTHENING THE EXCELLENCE OF HIGHER EDUCATION
AT THE UNIVERSITY OF ZENICA**

**Mr. Dino Eminović, dipl.inž.maš.,
V. prof. dr. sc. Ibrahim Plančić,
V. prof. dr. sc. Nusret Imamović
Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici
Fakultetska 1, 72000 Zenica**

REZIME

U radu je predstavljena hronologija i prezentirani konkretni koraci koji su prethodili radovima na tekućem održavanju, sanaciji i rekonstrukciji dotrajalih objekata Kampusa Univerziteta Zenici, a prevashodno u cilju povećanja energijske učinkovitosti što doprinosi održivom razvoju i smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu.. Time je, istovremeno, unaprijeđen komfor i podignut nivo radnog ambijenta za nastavno i administrativno tehničko osoblje, kao i studente na fakultetima koji su bili predmetom rekonstruktivnih zahvata. Dat je također i osvrt na konkretan efekat izvedenih radova koji se ogleda u vanjskoj estetici objekata, prilagodljivosti radnog prostora. a istovremeno su evidentirane značajne uštede u potrošnji energije mjerene u MWh, te značajno smanjeni finansijski izdaci za zagrijavanje tretiranih objekata u grijnoj sezoni. U tom smislu u radu su analizirani i prikazani objekati prije, za vrijeme, i nakon sanacije na kojima je sada olakšano i pojednostavljeno tekuće održavanje.

Ključne riječi: održavanje, rekonstrukcija, energijska učinkovitost, efekti i uštede.

ABSTRACT

In this paper, a chronology is given and concrete steps are presented that preceded the work on ongoing maintenance, rehabilitation and reconstruction of dilapidated buildings of the Zenica University Campus, primarily with the aim of increasing energy efficiency. This, at the same time, improved comfort and raised the level of the working environment for professors and students at the faculties that were the subject of reconstructive interventions. There is also a review of the concrete effect of the performed works, which is reflected in the external aesthetics of the buildings, the affordability of the work space, and at the same time, significant savings in energy consumption measured in MWh and significantly reduced financial expenses for heating the treated buildings in the heating season were recorded. In this sense, the paper also shows photographs of concrete buildings before, during, and after rehabilitation, which now facilitate and simplify ongoing maintenance.

Keywords: maintenance, reconstruction, energy efficiency, effects and savings.

1. UVOD

Održavanje infrastrukturnih objekata u visokom obrazovanju ima ključnu ulogu i direktno utiče na održavanje i poboljšanje kvaliteta obrazovanja, zadovoljstvo korisnika i ispunjavanje standarda, čime se stvara pozitivno okruženje za učenje i razvoj. Neki od osnovnih aspekata održavanja infrastrukture koji se nose na kvalitet obrazovanja se odnose na činjenice da kvalitetna infrastruktura omogućava efikasnije izvođenje nastave i istraživanja, a dobro opremljene učionice, laboratorije, biblioteke i drugi infrastrukturni objekti doprinose boljem učenju i razvoju vještina. Pored toga, uređeni i funkcionalni prostori utiču na opšte zadovoljstvo studenata, a kvalitetno i prijatno okruženje može poboljšati motivaciju i angažovanost studenata, što se direktno odražava na njihov uspjeh. Također, u pogledu zahtjeva za institucionalnu akreditaciju jedno od važnih područja je kvalitet infrastrukture pa je održavanje objekata vrlo često povezano sa ispunjavanjem određenih standarda kako institucionalne tako i akreditacije studijskih programa. S tim u vezi, ulaganje u infrastrukturu i njeno održavanje može pomoći institucijama da ispune različite akreditacione zahtjeve, kao i zahtjeve drugih regulatornih tijela, te poboljšaju svoj položaj na rang-listama. Svjesni ovih činjenica, a vodeći računa da kvalitetnija infrastruktura i održavanje objekata osigurava bezbjednost svih korisnika i osigurava pristupačnost za sve studente, kao i smanjenje rizika od ozbiljnih oštećenja i skupih popravki menadžment Univerziteta u Zenici u posljednjih desetak godina intenzivno razmišlja i radi na planiranju i ulaganju u infrastrukturu kao dugoročno isplativim rješenjima.

Zastarjeli i davno izgrađeni objekti još 50-tih i 60-tih godina minulog vijeka, neuslovne prostorije, dotrajala fasadna stolarija, prokišnjavanje ravnih i kosih krovova, enormni gubici toplotne enrgije, visoki troškovi za električnu energiju i zagrijavanje, karakterisali su donedavno objekte koji su sastavni dio Kampusa Univerziteta u Zenici. Sve navedeno iniciralo je mendžment i osnivača – Vladu ZDK da poduzmu konkretne korake kako bi se opisano stanje objekata saniralo. Prvobitno su pojedinačno sanirani objekti poput Studentskog centra i zgrade Rektorata, i to u nelilklo faza, zbog nedostatka sredstava za ovu namjenu. Uvidjevši nemogućnost sanacije svih objekata u bliskoj budućnosti, a stanje objekata bilo je takvo, da je zahtijevalo urgentnu sanaciju i reakciju svih relevantnih institucija, pristupilo se sistematskom rješavanju ovog problema. Shodno tome, aplicirano je na više finasijskih institucija i međunarodnih organizacija koje finasiraju projekte iz domena enerigijske efikasnost. No preduslov za aplikaciju i dobijanje neophodnih sredstava bio je pripremanje i obezbjeđenje određene projektno-planske i izvedbene dokumentacije.

2. PREGLED ZAHTJEVA I PROCEDURA ZA OBEZBJEĐENJE SREDSTAVA ZA SANACIJU OBJEKATA KAMPUSA UNZE

U cilju obezbjeđenja neophodnih sredstava a u svrhu aplikacija kod relevantnih fondova i drugih finasijskih institucija pristupilo se obezbjeđenju i ishodovanju neophodne dokumentacije prije svega detaljnih energetske pregleda – audita.

S tim u vezi, pristupilo se izradi detaljnih energetske pregleda-audita za objekte Kampusa Univerziteta u Zenici kako slijedi:

- Detaljni energetske pregled – audit Mašinskog fakulteta
- Detaljni energetske pregled – audit Metalurško-tehnološkog fakulteta
- Detaljni energetske pregled – audit Filozofskog fakulteta
- Detaljni energetske pregled – audit zgrade Rektorata
- Detaljni energetske pregled – audit objekata Instituta “Kemal Kapetanović

Ovdje treba istaći da je detaljni energetske pregled – audit Mašinskog fakulteta urađen 2016. godine, dok su za ostale navedene objekte auditi realizirani u toku 2017. i 2018. godine, a objekat Studentskog centra ovaj dokument je obezbijedio još 2012. godine.

Obezbuđenje predmetnih audita stvorilo je preduslov da Vlada Zeničko-dobojskog kantona kandidira finansiranje utopljanja predmetnih objekata putem sredstava obezbjeđenih kreditom kod Svjetske banke što je i realizirano u periodu 2021 i 2022. godine.

Predmetnim kreditom sa konkretnim iznosima obuhvaćena je sanacija slijedećih objekata:

- Objekat Metalurško-tehnološkog fakulteta..... 840.000,00 KM
 - Objekat Mašinskog fakulteta sa fiskulturnom salom..... 985.000,00 KM
 - Objekat Filozofskog fakulteta sa fiskulturnom salom 450.000,00 KM
- UKUPNO: 2.275.000,00 KM**

Na ovim objektima, a u skladu sa propisanim uvjetima te općim stanjem istih, primjenjene su slijedeće mjere energijske učinkovitosti:

- Zamjena fasadne stolarije
- Postavljanje fasadnog omotača od stiropora debljine d=10 cm
- Zamjena postojeće sa štednom LED rasvjetom
- Sanacija toplotnih podstanica u svim objektima
- Postavljanje termostatskih ventila na radiatorima
- Sanacija kosih krovova i termoizolacija ravnih krovnih površina

U cilju obezbjeđenja praćenja efekata prije i nakon provođenja gore navednih energijskih mjera od strane Federalnog ministarstva prostornog uređenja a u sklopu BEEP projekta pristupilo se instalaciji mjernih uređaja koji su pratili potrošnju energenata (električne energije i isporučene toplote putem toplotnih podstanica) na svakom tretiranom objektu prije nego li se pristupilo sanacionim radovima. Takav pristup omogućio nam je da sa ove vremenske distance kompariramo potrošnju energenata prije i nakon sanacije objekata te da konstatiramo i utvrdimo stvarni efekat provedenih mjera.

3. HRONOLOGIJA SANACIJE OBJEKATA KAMPUSA UNIVERZITETA

Kao što je u uvodnom dijelu ovog rada navedeno sanacija i rekonstrukcija objekata odvijala se selektivno a među prvima je izvršena sanacija objekta Studentskog centra smještenog izvan Kampusa u naselju Crkvice.

3.1. Sanacija objekta Studentskog centra

Sanacija ovog objekta rađena je u nekoliko faza i trajala je u periodu od 2015. do 2018. godine, odnosno, onako kako su obezbjeđivana sredstva za različite mjere energijske efikasnosti. Hronologija tih zahvata prezentirana je u tabeli broj 1.

Tabela 1. Izvedeni sanacioni radovi na objektu Studentskog centra - hronologija

R. br.	Opis radova – mjera energijske učinkovitosti	Period	Iznos (KM)
1.	Zamjena fasadne stolarije	2015/2016.	94.500,00
2.	Zamjena postojeće sa štednom LED rasvjetom	2016/2017	17.500,00
3.	Postavljanje solarnih panela u pripremu PTV	2017/2018	26.500,00
4.	Postavljanje fasadnog omotača o stiropora d=10cm	2018.	100.000,00
Ukupno:			238.500,00

Predmetni radovi, odnosno, navedene mjere energijske učinkovitosti, rezultirale su izuzetnim i mjerljivim efektima već u narednim grijnim sezonama pa u tabeli broj 2. prezentiramo efekat svake pojedinačne mjere izražene u konveribilnim markama.

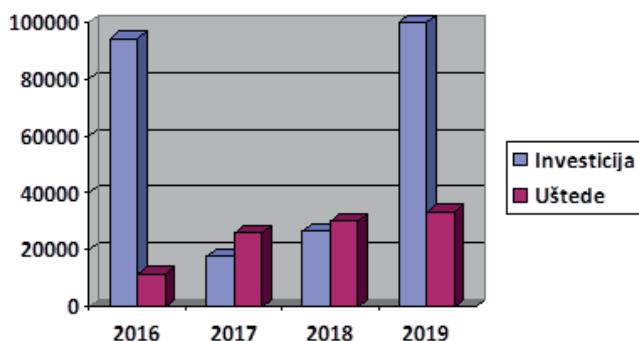
Tabela 2. Efekti provedenih energetskih mjera na objektu Studentskog centra

R, br.	Opis radova – mjera energijske učinkovitosti	Period evaluacije	Evidentirane uštede nakon radova [KM]
1.	Zamjena fasadne stolarije	2016.	11.347,00
2.	Zamjena postojeće sa štednom LED rasvjetom	2017	25.947,00
3.	Postavljanje solarnih panela za pripremu PTV	2018	29.904,00
4.	Postavljanje fasadnog omotača o stiropora d=10cm	2019.	33.269,00
Ukupno evidentirane uštede:			100.467,00

Ovdje je značajno istaknuti da su evidentirane uštede nakon svake pojedinačne mjere gotovo identične projektiranim odnosno, prognoziranim efektima navedenim u auditu za predmetni objekt čime se daje poseban značaj svrsishodnosti takvog dokumenta.

Dakle, realizacijom navedenih projekata u obračunskom periodu od 2016. – 2019. evidentirane su **uštede u potrošnji energenata** (el. energija i grijanje) u iznosu od **100.467,00 KM**, te uz uštede evidentirane u periodu od 2020. do 2023. godine, proizilazi da se ukupna investicija vratila u periodu manjem od 7 godina.

Stoga, kao zaključak i konstatacija hvale vrijedna, je da se sa ove vremenske distance može reći da je, kompletna investicija u mjere energijske efikasnosti u objekt Studentskog centra u iznosu od gotovo 240.000,00 KM, već vraćena kroz evidentirane uštede u potrošnji energenata.



Slika 1. Grafički prikaz odnosa investicija i ostvarenih ušteda

Na slikama broj 2, 3. i 4. dat je izgled objekta Studentskog centra prije i nakon sanacije.



Slika br.2. Studentski centar prije radova



Slika 3. Studentski centar nakon radova



Slika 4. Studentski centar nakon radova

3.2. Sanacija zgrade Rektorata

Sanacija ovog objekta također je izvedena prije rekonstrukcije pomenuta tri objekta fakulteta Kampusu Univerziteta u Zenici i na istom je primjenjena samo jedna mjera energijske učinkovitosti i to postavljanje fasadnog omotača od stiropora debljine $d=10$ cm. Taj zahvat implementiran je 2019.godine i vrijednost istog bila je cca 50.000,00 KM. Izgled objekta prije i nakon završetka radova dat je na slikama broj 5., i 6.



Slika 5. Zgrada Rektorata prije radova



Slika 6. Zgrada Rektorata nakon radova

Ovim zahvatom dat je novi estetski izgled objekta, višestruko je unapređen radni ambijent za uposlenike Rektorata, poboljšana toplotna izolacija objekta i eliminirano korištenje električnih grijalica u radnim prostorijama (kancelarijama) čime je potrošnja električne energije je evidentno reducirana.

3.3. Sanacija objekta Filozofskog fakulteta

Kao što je navedeno u uvodu ovog rada sanacija ovog objekta finansirana je sredstvima kredita Svjetske banke u iznosu od 450.000,00 KM za koji je jamstvo dala Vlada Zeničko-dobojskog kantona. Na objektu su primjenjene slijedeće energijske mjere:

- Zamjena fasadne stolarije
- Postavljanje fasadnog omotača od stiropora debljine $d=10$ cm
- Zamjena postojeće sa štednom LED rasvjetom

- Sanacija toplotne podstanica
- Postavljanje termostatskih ventila na radiatorima
- Sanacija kosih krovova i termoizolacija ravnih krovnih površina

Izgled objekta prije i nakon izvedenih radova dati je na slikama broj 7 i 8.



Slika 7. Filozofski fakultet tokom radova



Slika 8. Filozofski fakultet nakon radova

3.4. Sanacija objekta Metalurško-tehnološkog fakulteta

Objekat Metalurško-tehnološkog fakulteta, danas Fakulteta inženjerstva i prirodnih nauka izgrađen je 1961.godine te je zub vremena i permanentna eksploatacija objekta u minulih 60 godina zahtijevala sanaciju, odnosno rekonstrukciju cjelokupnog objekta. Kao i u slučaju objekta Filozofskog fakulteta i ovdje su primjenjene iste mjere energijske učinkovitosti i to;

- Zamjena fasadne stolarije
- Postavljanje fasadnog omotača od stiropora debljine $d=10$ cm
- Zamjena postojeće sa štednom LED rasvjetom
- Sanacija toplotne podstanica
- Postavljanje termostatskih ventila na radiatorima
- Sanacija kosih krovova i termoizolacija ravnih krovnih površina

Predmetni objekat je također finasiran sredstvima Svjetske banke i to u iznosu od 835.000,00 KM, a sanacija istog otpočela je krajem 2021.godine, dakle, tačno 60 godina nakon njegove izgradnje. Izgled objekta prije i nakon izvedenih radova dati je na slikama broj 9 i 10.



Slika 9..Objekat MTF-a za vrijeme radova



Slika 10. Izgled MZF-a nakon radova

3.5. Sanacija objekta Mašinskog fakulteta

Objekat Mašinskog fakulteta izgrađen je daleke 1958. godina te je kao i u slučaju objekta MTF-a usljed višedecenijskog eksploatisanja i neadekvatnog tekućeg i investicijskog održavanja bilo krajnje vrijeme da se pristupi sanaciji istog. Za tu namjenu iz kredita Svetske banke izdvojeno je 935.000,00 KM a izvedeni su isti zahvati kao i na prethodna dva slučaja.

Na slikama 11., 12. i 13. dat je prikaz objekta prije, za vrijeme i nakon okončanih radova.



Slika 11. Mašinski fakultet prije



Slika 12. Mašinski fakultet za vrijeme radova



Slika 13. Fakultet nakon završetka radova



Slika 14. Fakultet nakon završetka radova

4. EFEKTI PRIMJENJENIH MJERA ENERGIJSKE EFIKASNOSTI

4.1. Efekti mjera energetske efikasnosti na objektu Filozofskog fakulteta

Podatke o potrošnji električne energije i isporučene toplotne energije na objektu Filozofskog fakulteta u periodu 2015. – 2017. godine a koji su preuzeti iz Detaljnog energetskog pregleda ovog objekta [1] prezentiramo u tabeli broj 3. i 4. Također, u istim tabelama dati su i podaci iz grijne sezone 2023/2024., gdje je evidentirana značajna ušteda u potrošnji eneregenata.

Tabela 3: Potrošnja električne energije u objektu od 2015.-2017. u odnosu na 2023/24 [1] [4]

Mjesec	2015. godina		2016. godina		2017. godina		2023/24 godina	
	KM	kWh	KM	kWh	KM	kWh	KM	kWh
Januar	1.117	4.649	1.070	4.583	1.340	5.818	542	2720
Februar	935	4.047	944	3.847	839	3.941	460	2044
Mart	1.079	4.483	1.045	5.053	894	4.585	464	2088
April	906	3.689	1.078	4.011	1.149	4.054	401	1805
Oktoabar	1.255	4.260	1.472	5.255	1.360	5.202	469	2192
Novembar	1.090	4.759	1.291	4.752	1.254	5.822	577	2744
Decembar	1.323	5.648	1.305	5.876	1.134	5.620	514	2466
Ukupno	10.085	39.565	10.399	41.017	6970	31.366	3.427	16.059

Tabela 4: Potrošnja toplotne energije u objektu od 2015.-2017. g u odnosu na 2023/24 [1] [5]

Mjesec	2015. godina		2016. godina		2017. godina		2023/24 godina	
	KM	MWh	KM	MWh	KM	MWh	KM	MWh
Januar	15.042,36	101,58	13.836,13	92,64	13.956,22	93,53	9.827,53	62,93
Februar	11.685,60	77,66	8.701,02	55,22	11.940,61	79,55	7.425,99	45,77
Mart	10.031,27	64,44	10.421,20	67,33	8.235,42	51,13	6.547,52	38,62
April	5.103,36	33,03	4.021,27	25,01	3.068,70	17,95	1034,05	8,75
Oktoabar	4.698,48	29,39	4.216,80	25,82	4.401,64	27,19	2.723,19	15,48
Novembar	9.139,47	58,15	10.834,12	70,71	10.705,94	69,76	7.203,00	43,80
Decembar	12.227,83	80,72	13.571,68	90,68	13.423,26	89,58	8247,15	51,22
Ukupno	67.928	451,97	65.602	427,41	65.732	428,69	43.008	266,57

Kako bi smo u nastavku rada eliminirali multipliciranje sličnih komentara, prikazana je slična metodologija evaluacije i efekata primjenjenih mjera energijske učinkovitosti i na ostala dva objekta, a tabelama broj 5., 6., 7. i 8. su prezentirani konkretni podaci.

4.2. Efekti mjera energetske efikasnosti na objektu Mašinskog fakulteta

Tabela 5. Ukupna potrošnja električne energije Mašinskog fakulteta [3] [4]

2013. godina		2014. godina		2015. godina		2023/24. godina	
KM	MWh	KM	MWh	KM	MWh	KM	MWh
42.377,00	160,54	35.923,00	151,43	32.089,00	124,04	21.323,30	97,66

Tabela 6. Ukupna potrošnja toplotne energije Mašinskog fakulteta [3] [5]

2013. godina		2014. godina		2015. godina		2023/24. godina	
KM	MWh	KM	MWh	KM	MWh	KM	MWh
104.867,00	691,69	98.022,00	598,06	110.706	717,61	73.972,00	457,65

4.3. Efekti mjera energetske efikasnosti na objektu Metalurškog fakulteta

Tabela 7: Potrošnja električne energije u objektu za period 2015 – 2017. godina [2] [4]

2015. godina		2016. godina		2017. godina		2023/24 godina	
KM	kWh	KM	kWh	KM	kWh	KM	kWh
19755	79.515	19.105	72.408	18.491	74.590	11.755,46	57688,29

Tabela 8. Ukupna potrošnja toplotne energije u oba objekta (Glavni i amfiteatar) [2] [5]

2015. godina		2016. godina		2017. godina		2023/2024. godina	
KM	MWh	KM	MWh	KM	MWh	KM	MWh
101.777,93	632,21	87.257,02	526,91	86.300,76	517,49	85.769,43	512,03

5. ZAKLJUČAK

Komparirajući podatke iz detaljnih energetske pregleda – audita [1] [2] [3], o potrošnji električne energije i troškova isporučene toplotne energije prije provedenih mjera, te podataka koji su evidentirani kroz finasijsku dokumentaciju – fakture za pojedinačno utrošene energente nakon izvršenih radova u periodu 2021. i 2022.godine, dolazi se do zaključaka o konkretnim efektima primjenjenih energetske mjera na objektima Kampusu Univerziteta u Zenici. Isti su prikazani u tabeli broj 9. na osnovu prezentiranih podataka.

Tabela 9. Efekti mjera energetske efikasnosti po objektima Kampusu Univerziteta

Objekat	Električna energija [KM/god]	Toplotna energija [KM/god]
Filozofskog fakulteta	15.307 (51%)	22.724 (35%)
Mašinskog fakulteta	10.756,70 (34%)	36.734 (34%)
Fakulteta inženjerstva i prirodnih nauka/ raniji naziv Metalurško tehnološki fakultet	6.736,00 (37%)	531,33 (-)

Pored predstavljenih konkretnih efekata provedenih mjera na utopljanju objekata značajno je naglasiti da su izvršenim radovima na sanaciji objekata stvoreni ozbiljni preduslovi za njihovo olakšano i pojednostavljeno tekuće održavanje.

6. REFERENCE

- [1]. Detaljni energetski pregled objekta Filozofskog fakulteta Zenica, Enova d.o.o. 2018.
- [2]. Detaljni energetski pregled objekta Metalurško-tehnološkog fakulteta, Enova d.o.o. 2018.
- [3]. Detaljni energetski pregled objekta Mašinskog fakulteta, ZGI d.o.o. 2016.
- [4]. Fakture za električnu energiju za period Oktobar 2023. do aprila 2024. JP Elektroprivreda BiH, Elektrodistribucija Zenica
- [5]. Fakture za toplotnu energiju za period oktobar 2023. Do April 2024. JP Grijanje Zenica d.o.o.

8. Konferencija „ODRŽAVANJE 2024“
Zenica, Bosna i Hercegovina, 13 - 14. novembar 2024.

SPONZORI
SPONSORS



TERMO KONTROL



natron-hayat
MAGLJAJ

MICOM



SERVIS ARMATURA I PROIZVODNJA REZERVNIH DIJELOVA - MAGLJAJ



INSTITUT ZA PRIVREDNI
INŽENJERING



Design, consulting, commissioning, production

Stjepan Polje Bosnia and Herzegovina



TERMO KONTROL



TERMO KONTROL D.O.O. BIJELJINA

Specijalizovano preduzeće TERMO KONTROL d.o.o. Bijeljina osnovano je 2013. godine kao laboratorija za ispitivanje materijala metodom bez razaranja (NDT). U početku svog rada preduzeće i zaposleni radnici stiču kompetencije, licence i certifikate za izvođenje visokokvalitetnih radova kontrole metalnih i nemetalnih proizvoda na:

- » termoenergetskim,
- » hidroenergetskim,
- » naftnim i
- » gasnim postrojenjima

U toku 2015. godine izrasta u jedno od vodećih preduzeća u BiH koja se bave kontrolom materijala i zavarenih spojeva metodama bez razaranja.

Do 2019. godine preduzeće TERMO KONTROL d.o.o. Bijeljina nastavlja sa izuzetno uspešnom poslovnom politikom stalno razvijajući kadrovski i tehnički potencijal.

U 2020. i 2021. godini preduzeće proširuje djelatnost i akredituje se prema BAS EN ISO/IEC 17020 kao Inspeksijsko tijelo za razvrstavanje i preglede i ocjenu usaglašenosti opreme pod pritiskom.

Termo Kontrol d.o.o. je preduzeće koje se bavi ispitivanjem i kontrolom zavarenih spojeva i materijala na termoenergetskim i hidroe-

nergetskim objektima, naftnim i gasnim postrojenjima, opremi za površinske kopove, razvrstavanjem i pregledima opreme pod pritiskom, ocjenom usaglašenosti opreme pod pritiskom, kontrolom čeličnih konstrukcija, cjevovoda i rezervoara i rezervoarskih prostora svih vrsta.

Preduzeće Termo Kontrol d.o.o. je podijeljeno u dvije radne jedinice:

- » Ispitna laboratorija
- » Inspeksijsko tijelo

ISPITNA LABORATORIJA

Ispitivanje materijala bez razaranja (IBR) (engl. Non-destructive testing – NDT) predstavlja skup metoda za utvrđivanja osobina kvaliteta i usaglašenosti metalnih proizvoda, poluproizvoda, osnovnog materijala i zavarenih spojeva sa zahtjevima tehničkih specifikacija i standarda, a da pri tome ispitivani proizvod i materijal budu neoštećeni.

Prednost naše Laboratorije je mogućnost ispitivanja u prostorijama Termo Kontrol-a kao i na licu mesta, kod klijenta. Za rad na terenu posjedujemo mobilnu laboratoriju sa svom potrebnom opremom za rad.

Nudimo savjetodavne usluge kod izrade plana kontrole, odabira odgovarajućih metoda ispitivanja kao i kriterijuma prihvatljivosti.



TERMOELEKTRO



PROFIL PREDUZEĆA

„Termoelektro“ je specijalizovano preduzeće za: izgradnju, remont, rekonstrukciju, revitalizaciju i održavanje termoenergetskih, industrijskih i drugih postrojenja, kao i izradu i montažu nestandardne opreme i konstrukcija.

„Termoelektro“ pruža kompletnu i kvalitetnu uslugu od inženjeringa i izrade projekata do organizacije na samom gradilištu po principu „ključ u ruke“.

PRIMARNA DJELATNOST

Demontažno - montažni radovi u termoelektranama, hemijskim i drugim industrijskim postrojenjima:

- » Inženjering, izgradnja, održavanje, remont i revitalizacija, uključujući posude pod pritiskom svih kategorija
- » Nabavka, ugradnja i montaža:
- » Cijevnih sistema izrađenih od svih vrsta materijala
- » Čelične konstrukcije za sve tipove kotlova
- » Sistemi grijanja za industrijska postrojenja
- » Inženjerske aktivnosti u investicionim projektima:
- » Pružamo sveobuhvatne usluge, uključujući nabavku i ugradnju materijala, skele, mašine,
- » pregled zavarenih spojeva i izolaciju

MISIJA

Naša misija je da razvijamo i održavamo poslovne odnose s domaćim i stranim partnerima pružajući visoki profesionalizam i vrhunski kvalitet uz poštovanje rokova i interesa naših klijenata.

VIZIJA

Naša vizija je da zadržimo vodeću poziciju na domaćem tržištu; Da ojačamo svoju ulogu na strateškim tržištima u inostranstvu.

Želimo da izrastemo u preduzeće koje je sposobno projektovati i izvesti čak i najkompleksnije projekte, te svojim kvalitetom nadmašiti očekivanja svojih klijenata.

NUDIMO

- » Iznajmljivanje dizalica
- » Termička obrada materijala
- » Ispitivanje materijala i zavarenih spojeva metodama bez razaranja

Posjedujemo kompletan specijalizovani alat za izvođenje svih vrsta mašinske montaže i svih postupaka zavarivanja.

Takođe, posjedujemo potrebnu cijevnu i ramovsku skelu, dvije autodizalice LIEBHERR nosivosti 40t i 100t, viljuškare, kamione, mašine za termičku obradu zavarenih spojeva.

Termoelektro zapošljava sertifikovane Inženjere za zavarivanje sa međunarodno priznatim sertifikatima, visoko obučene zavarivače, bravare i druge kvalitetne radnike.

Certifikati koje posjedujemo: ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, ISO 45001:2018, EN 1090-2:2008+A1:2011; SCC 2011;



BERDIZ CONSULTING AB (www.berdiz.se) offers services within a variety of areas such as project management, mechanical engineering, process engineering, calculation, analysis, mechanical design, SW-HW engineering, electric engineering, mechanical manufacturing etc. to be provided as:

- » Complete project solutions
- » Consulting (Located at client site or BERDIZ home office)
- » Manufacturing of mechanical components in Bosnia-Herzegovina
- » Catchphrase of BERDIZ is to use experience, talent and teamwork to reach our primary goals, high efficiency and customer satisfaction!
- » We operate mainly in process engineering, nuclear power, offshore and traditional engineering.
- » Consultants - in Sweden and Norway
- » Consultants – from Bosnia and Herzegovina
- » Manufacturing of mechanical components in Bosnia and Herzegovina

BERDIZ PRODUCTION DOO (www.berdiz.ba) is our sister company based in Stolac, Bosnia and Herzegovina. In cooperation with us, it offers services such as mechanical engineering, process engineering, calculation, analysis, mechanical design. BERDIZ PRODUCTION DOO also connects Swedish and Bosnian companies in order to improve international collaboration in the manufacturing industry with a focus on production in Bosnia and Herzegovina.

BERDIZ CONSULTING AB is a part of BEVION GROUP AB (www.bevion.se) as a cluster of innovative and customer focused consulting agencies, primarily operating in energy, process and automotive industries in Sweden. BEVION GROUP AB delivers bold and sustainable solutions, by offering top engineering expertise in a wide range of competence areas. Together we are over 300 engineers, many with 15+ years experience, ready to offer the best services and solutions available. What they all have in common is proven high skills and track records in their areas.



BIO PROCESS

BioProcess d.o.o. je dinamična i perspektivna kompanija, osnovana u aprilu 2023. godine sa sjedištem u Zavidovićima. Kompanija je fokusirana na inženjerske usluge i projekte u oblasti biofarmaceutске i farmaceutске industrije, sa posebnim naglaskom na projektovanje složenih procesnih sistema. Poslujemo kroz Poslovnu jedinicu u Sarajevu, gdje se nalazi inženjerska kancelarija s timom od 21 visokoobrazovanog i stručnog inženjera mašinstva.

Bioprocess d.o.o je partnerska firma renomirane slovenske kompanije Brinox d.o.o. i ekskluzivno obavlja projekte za ovu kompaniju. Kroz pomenutu saradnju, angažovani smo na izradi specijalizovanih biofarmaceutskih i farmaceutskih procesnih sistema, čime aktivno doprinosimo projektima koji su od ključnog značaja za globalnu biofarmaceutski i farmaceutsku industriju.

Naš cilj je pružiti visokokvalitetna inženjerska rešenja, a usmjerenost kompanije na stručno znanje, inovacije i posvećenost klijentu omogućava nam da rastemo i da se razvijamo.

“Samir Karahasanović”

BioProcess d.o.o.

Mehmed paše Sokolovića B.B.

72220 Zavidovići | Bosnia & Herzegovina(BiH)

Comp. ID.: 4219198530006

VAT Tax Num.: 391610000303700027

e-mail: samir.karahasanovic@bio-process.eu

www.bio-process.eu



Jedna vizija Jedan asortiman

evoBuild postavlja nove standarde za održive građevinske materijale. Naš novi asortiman niskokarbonskih i kružnih proizvoda pruža svu pouzdanost, kvalitetu i snagu koju zahtijevate, dok pravimo pionirske korake u našoj industriji prema neto nuli i kružnom gospodarstvu.

Jedinstvena linija proizvoda za održivu gradnju
heidelbergmaterials.com/evobuild

evoBUILD

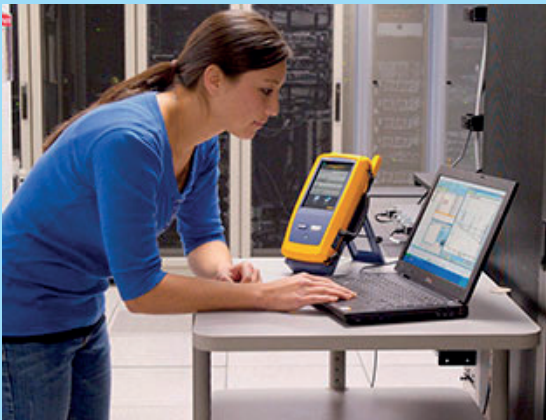


natron-hayat
M A G L A J

Natron-Hayat d.o.o. Maglaj je vodeća kompanija u Bosni i Hercegovini u industriji proizvodnje papira i papirne ambalaže.

Smještena u Maglaju, kompanija je dio međunarodne grupacije Hayat Holding iz Turske. Sa više od 68 godina tradicije u oblasti papira, Natron-Hayat se ističe proizvodnjom različitih vrsta papira, uključujući Kraft papir, MG papir i Reciklirani papir te širokim asortimanom proizvoda kao što su vreće, vrećice, kartonska ambalaža i drugi prilagođeni proizvodi prema potrebama kupaca.

Natron-Hayat uključuje više od 800 predanih zaposlenika koji svojim vrijednim radom i trudom oblikuju ovu kompaniju. Natron-Hayat ima u asortimanu 25 visokokvalitetnih proizvoda, zadovoljavajući potrebe preko 800 kupaca podijeljenih u više od 40 zemalja svijeta. Kompanija stavlja poseban fokus na ekološku održivost, koristeći reciklirane materijale i implementirajući moderne tehnologije koje smanjuju ekološki otisak.



MICOM

MICOM BH je trgovačko društvo čija je osnovna djelatnost prodaja mjernih instrumenata i opreme. MICOM BH djeluje kao dio MICOM grupacije, koja je na području jugoistočne Evrope najveći dobavljač takve robe. Matična kompanija je osnovana 1991. godine i danas MICOM grupacija zapošljava 30 osoba, od kojih su većina inženjeri elektrotehnike i mašinstva.

Moderna tehnologija zahtijeva od održavatelja opreme u podatkovnim i električnim mrežama, te sistemima u industriji, energetici, telekomunikacijama i računarstvu, sve više znanja i nove alate i mjernu opremu koja im omogućava kontrolu rada, održavanje i nesmetano funkcionisanje opreme i sistema.

Cilj naše kompanije je ponuditi najbolja moguća rješenja održavateljima, odnosno ponuditi najbolju opremu za mjerenje, koja će im omogućiti kvalitetno i učinkovito obavljanje rada. Naš posao nema za cilj isključivo prodaju, već i savjetovanje o tome kako iskoristiti savremenu opremu za mjerenje prilikom rješavanja problema u svakodnevnom radu.

Najvažnija područja upotrebe mjernih instrumenata iz naše ponude su:

- » Mjerenja u elektronici i automatici
- » Ispitivanja i mjerenja električnih instalacija
- » Mjerenja u energetske mrežama
- » Mjerenja u telekomunikacijskim i računarskim mrežama
- » Mjerenja parametara okoline
- » Kalibracija mjerača električnih veličina, temperature i pritiska
- » Mjerenja u laboratorijama
- » Edukacija u području tehničkih nauka

Za sve proizvode iz našeg prodajnog programa osiguravamo postprodajnu podršku, kao što su garancija, servis, nabavka rezervnih dijelova i dodatne opreme, nadogradnja softvera, kao i obuka korisnika.

Posebno ističemo vlastiti akreditovani laboratorij za kalibraciju mjerila temperature i vlažnosti, koji pruža usluge u samoj laboratoriji i na terenu.