

INSTITUT ZA RUDARSTVO I METALURGIJU BOR

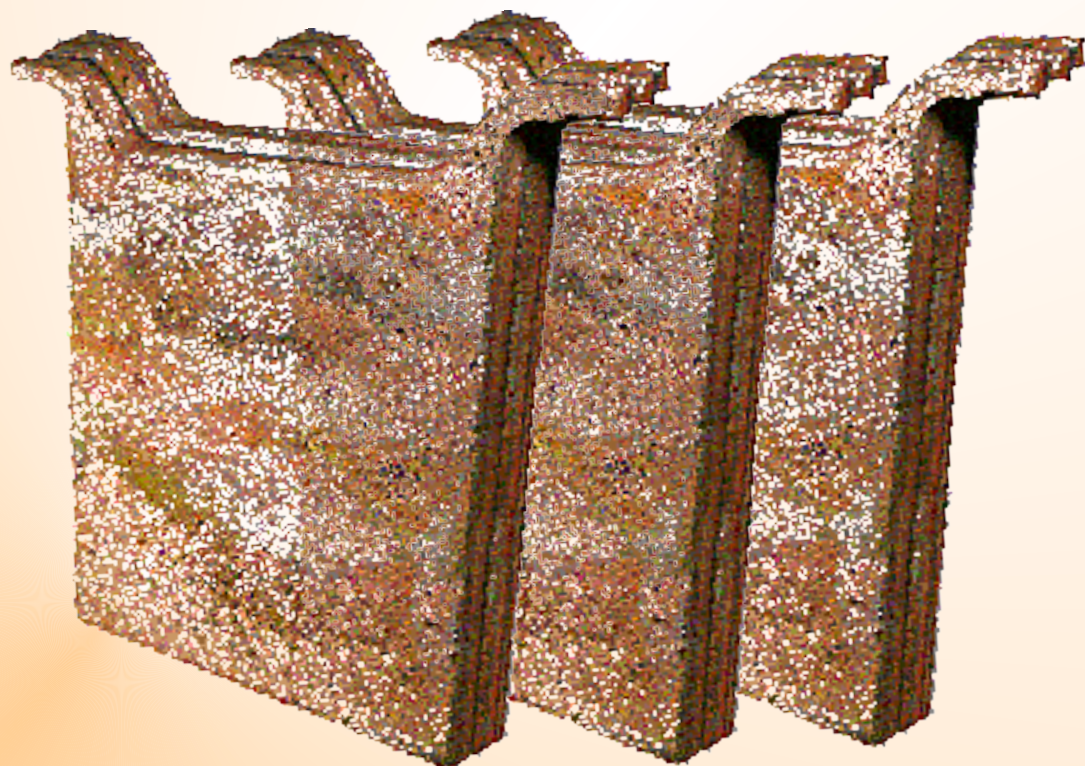


—Cu—

UDC 669.3
ISSN 0351-0212

Broj 1 Volumen 50 2025

BAKAR COPPER



BAKAR

1/2025

BAKAR je časopis baziran na bogatoj tradiciji stručnog i naučnog rada ne samo iz oblasti dobijanja i prerade bakra, već i iz oblasti obojene i crne metalurgije, tehnologije, nanotehnologije, hemije, pripreme mineralnih sirovina, zaštite životne sredine, energetske efikasnosti, i primenjene informatike i povezanih srodnih oblasti.

Izlazi dva puta godišnje još od 1968. godine.

Glavni urednik

Kostov Ana, *naučni savetnik*
Orcid: 0000-0001-6436-9091
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
E-mail: ana.kostov@imbor.co.rs
Tel. 030/454-108

Zamenik glavnog urednika

Milosavljević Aleksandra, *viši naučni saradnik*
Orcid: 0000-0003-3841-7357
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
E-mail: aleksandra.milosavljevic@imbor.co.rs
Tel. 030/454-252

Urednik

Dr Vesna Marjanović, *dipl.inž.*

Prevodilac

Nevenka Vukašinović, *prof.*

Tehnički urednik

Suzana Cvetković, *teh.*

Priprema za štampu

Vesna Simić, *teh.*

Štampa

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

Tiraž: 30 primeraka

Internet adresa

www.imbor.co.rs

Izdavanje časopisa finansijski podržavaju

Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

ISSN 0351-0212

Indeksiranje časopisa u SCIndeksu i u ISI.

Izdavač

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
19210 Bor, Alberta Ajnštajna 1
E-mail: institut@imbor.co.rs
Tel. 030/454-101

Sva prava zadržana.

Članovi uredništva

Krasikov Sergey, redovni profesor
Institut za metalurgiju Uralskog odeljenja Ruske akademije nauka, Rusija

Mančić Lidija, naučni savetnik
Institut tehničkih nauka SANU, Srbija
Orcid: 0000-0002-6620-9582

Marković Radmila, viši naučni saradnik
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Srbija
Orcid: 0000-0001-9754-1150

Muntean Comelia, redovni profesor
Politehnički univerzitet u Temišvaru, Rumunija

Sokić Miroslav, naučni savetnik
Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina Beograd, Srbija
Orcid: 0000-0002-4468-9503

Stijepović Mirko, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, Srbija
Orcid: 0000-0003-3318-6836

Sharipov Rustam, profesor
Kazahstanski britanski tehnički univerzitet Almati, Republika Kazahstan

COPPER is a journal based on the rich tradition of expert and scientific work not only in the field of copper production and treatment, but also in the field of non-ferrous and ferrous metallurgy, technology, nanotechnology, chemistry, mineral processing, ecology, energy efficiency, applied informatics, as well as related fields of science. Since 1968, published twice a year.

Editor-in-Chief

Kostov Ana, *Principal Research Fellow*
Orcid: 0000-0001-6436-9091
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-108

Co-Editor

Milosavljević Aleksandra, Senior Research Associate
Orcid: 0000-0003-3841-7357
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: aleksandra.milosavljevic@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-252

Editor

Ph.D. Vesna Marjanović, *B.Eng.*

English Translation

Nevenka Vukašinović

Technical Editor

Suzana Cvetković

Preprinting

Vesna Simić

Printed in

Mining and Metallurgy Institute Bor

Circulation: 30 copies

Web site

www.irmbor.co.rs

COPPER is financially supported by

The Ministry of Science, Technological
Development and Innovation of the Republic Serbia
Mining and Metallurgy Institute Bor

ISSN 0351-0212

Journal indexing in SCIndex and ISI.

Published by

Mining and Metallurgy Institute Bor
19210 Bor, Alberta Ajnštajna br. 1
E-mail: institut@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-101

All rights reserved.

Members of the Editorial Board

Krasikov Sergey, full professor
*Institute of Metallurgy of Ural Branch of the
Russian Academy of Sciences, Russia*

Mančić Lidija, principal research fellow
Institute of Technical Science of SASA, Serbia
Orcid: 0000-0002-6620-9582

Marković Radmila, senior research associate
Mining and Metallurgy Institute Bor, Serbia
Orcid: 0000-0001-9754-1150

Muntean Cornelia, full professor
Polytechnic University of Timisoara, Romania

Sokić Miroslav, principal research fellow
*Institute for Technology of Nuclear and Other
Raw Materials Belgrade, Serbia*
Orcid: 0000-0002-4468-9503

Stijepović Mirko, associate professor
*University of Belgrade, Faculty of Technology
and Metallurgy Belgrade, Serbia*
Orcid: 0000-0003-3318-6836

Sharipov Rustam, professor
*Kazakh British Technical University Almaty,
Republic of Kazakhstan*

UDK: 622.271/.3(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2501001R

NAUČNI RAD

Oblast: Rudarstvo

Primljen: 20.03.2025.

Prerađen: 27.03.2025.

Prihvaćen: 28.03.2025.

**ANALIZA STABILNOSTI ZAVRŠNIH KOSINA NA POVRŠINSKOM
KOPU SEVERNI REVIR RUDNIKA BAKRA MAJDANPEK**

**ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE FINISHING SLOPES AT
THE SURFACE MINING SEVERNI REVIR OF
THE MAJDANPEK COPPER MINE**

Radmilo Rajković^{1a}, Daniel Kržanović^{1b},
Miomir Mikić^{1c}, Milenko Jovanović^{1d}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Alberta Ajnštajna 1, 19210 Bor

^{1a} E-mail: radmilo.rajkovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5905-6613>

^{1b} E-mail: daniel.krzanovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3841-8667>

^{1c} E-mail: miomir.mikic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7659-769X>

^{1d} E-mail: milenko.jovanovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6757-4143>

Izvod

Geometrijski elementi za konstrukciju površinskog kopa Severni revir Rudnika bakra Majdanpek usvojeni su na osnovu inženjersko-geoloških karakteristika radne sredine, uzimajući u obzir primenjenu tehnologiju rada i usvojenu mehanizaciju, kao i na osnovu dosadašnjih iskustva u radu. U ovom radu su prikazani rezultati geotehničkih ispitivanja radne sredine, i rezultati proračuna njihove stabilnosti saglasno važećoj zakonskoj regulativi.

Ključne reči: površinski kop Severni revir, inženjersko-geološka istraživanja, proračun stabilnosti

Abstract

Geometrical elements for the construction of the open pit Severni revir of the Majdanpek copper mine were adopted based on the engineering-geological characteristics of the working environment, taking into account the applied work technology and the adopted mechanization, as well as based on previous work experience. This paper presents the results of geotechnical tests of the working environment, as well as the results of their stability calculations in accordance with current legislation.

Keywords: surface mine Severni revir, engineering-geological research, stability calculation

1. UVOD

Dugoročno projektovanje razvoja površinskog kopa Severni revir je bazirano na važećem *Elaboratu o rezervama ležišta bakra „Severni revir“ i ležišta polimetalične mineralne sirovine (Zn-Pb-Cu) „Tenka – Severni revir“ kod Majdanpeka, stanje 30.06.2011*, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, 2011. Optimizacija i izbor završne konture površinskog kopa, planiranje i projektovanje faznog razvoja radova je izvršena primenom *Gemcom GemsTM* i

WhittleTM softvera, koji u savremenom rudarstvu predstavljaju standard za strateško planiranje i projektovanje površinskih kopova. Optimizacija je izvršena na osnovu blok modela ležišta i tehno-ekonomskih parametara proizvodnje. Na osnovu projektovane završne konture površinskog kopa Severni revir sračunate su eksploatacione rezerve rude i pripadajuće količine jalovine, kao i sadržaji i količine bakra, zlata i srebra u rudi.

U geološkoj građi ležišta Severni revir učestvuju: kristalasti škriljci, stene facije zelenih škriljaca, kvarcne žice, gnajs-graniti, konglomerati i peščari (lijasa i dogera), krečnjaci (titon-valendina), mermeri, senonski fliš, vulkaniti gornje krede, skarnovi i skarnoidi, tektonske breče i laramijski plutoniti. Teren površinskog kopa Severni revir je u više navrata tokom njegovog formiranja bio predmet uglavnom geomehaničkih istraživanja. Istraživanja su vršena 1980-1981. godine, 1997. i 2000. godine.

Dostupni podaci geotehničkih istraživanja i ispitivanja su bili ograničenog obima i starijeg datuma, i nisu sistematizovani za sve inženjerskogeološke sredine koje se javljaju na istražnom prostoru, tako da su pružali samo okvirnu sliku o problematici sadašnjeg stanja kopa.

2. INŽENJERSKO-GEOLOŠKA ISTRAŽIVANJA

Godine 2021. urađen je *Izveštaj o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor.

Obim i vrsta izvedenih geoloških, inženjersko-geoloških i hidro-geoloških radova definisani su na osnovu *Projekta detaljnih inženjerskogeoloških i hidrogeoloških istraživanja stabilnosti kosina na površinskim kopovima rudnika bakra Majdanpek*, Geoining group d.o.o iz Beograda. Na osnovu tog dokumenta, u periodu 2019-2020. godina, izvedeno je ukupno 20 istražnih bušotina, izvršeni su prateći terenski istražni radovi, osmatranja i uzet optimalan broj uzoraka za laboratorijska geomehanička ispitivanja. Nakon završetka celokupnih istraživanja i ispitivanja, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor je 2021. godine izradio *Izveštaj o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*.

Nakon terenskih i laboratorijskih ispitivanja, u prikazu rezultata istraživanja, dati su: Geomorfološke i hidrološke karakteristike terena; Geološke karakteristike terena; Tektonske karakteristike terena; Seizmičnost terena; Hidrogeološke karakteristike i analiza ispitivanog područja.

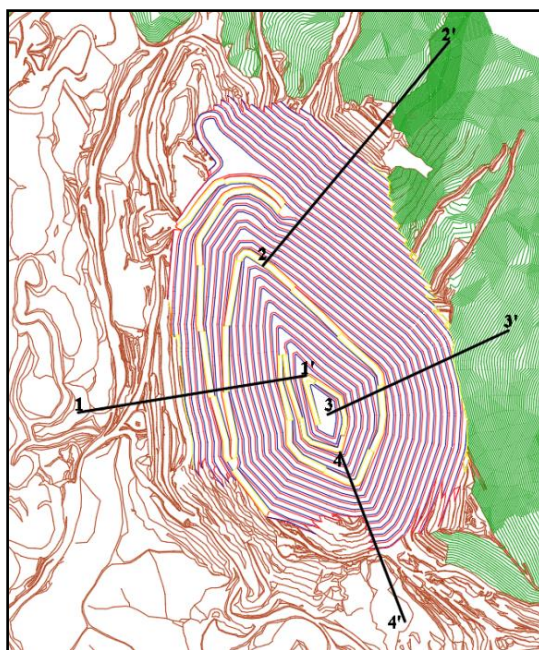
Definisani su inženjerskogeološka svojstva terena: Inženjerskogeološke jedinice; Egzodinamički procesi; Inženjersko geološke karakteristike terena na četiri istražnih preseka; Kategorizacija terena prema stepenu stabilnosti.

Na svakom od četiri profila definisani su parametri inženjerskogeoloških sredina:

GSI - Geological Strenght Index proračunat na osnovu statističke obrade vrednosti RMR89 klasifikacije stenske mase za svaku izdvojenu zonu na osnovu rezultata geotehničkog kartiranja, korišćenjem formule $GSI = RMR89 - 5$ [1-3];

- σ_p - Intaktna pritisna čvrstoća monolita σ_p , dobijena na osnovu rezultata statističke obrade laboratorijskih ispitivanja jednoaksijalne pritisne čvrstoće, korišćenjem rezultata Point load testa i procenjene čvrstoće stene pri geotehničkom kartiranju [4,5];
- m_i - materijalna konstanta bazirana na litološkom sastavu stene. Korišćene su literaturne vrednosti na bazi petrološke determinacije i strukturnih i teksturnih karakteristika stenske mase korićenjem baze programa RocData (Marinos i Hoek, 2001);
- E, ν - Modul elastičnosti i Poisson-ov koeficijent (parametri deformabilnosti stene dobijeni statističkom obradom laboratorijskih podataka) [6,7];
- D - faktor oštećenosti stenske mase usled eksploatacije. Kreće se u intervalu od 0-1 u zavisnosti od oštećenosti stenske mase.

Položaj inženjerskogeoloških profila prikazan je na slici 1 a fizičko mehanički parametri radne sredine za svaki profil u tabelama 1 – 4.



Sl. 1. Položaj inženjersko-geoloških profila

Tabela 1. Geomehanički parametri stenskih masa za profil 1-1'

Inženjerskogeološka (litološka) sredina		Zapreminska težina γ_s [kN/m ³]				GSI				σ_p [MPa]				E [MPa]				ν				mi	D
		Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD		
α	Andeziti i tektonske breče			26,03				23				24,5				9740				0,21		20	0,3
σ_1	Granatodni gnajzovi	25,76	29,21	27,19	1,12	11	79	37	13	7,45	65,94	40,62	17,08	2218	22113	13093	5797	0,23	0,29	0,26	0,02	30	0,3
Giban	Gnajzovi-biotitski, amfibolitski, muskovitski	26,35	28,61	27,24	0,70	10	71	38	14	2,76	62,51	29,00	18,55	808	22661	9848	6789	0,23	0,29	0,26	0,02	26	0,3

Tabela 2. Geomehanički parametri stenskih masa za profil 2-2'

Inženjerskogeološka (litološka) sredina		Zapreminska težina γ_s [kN/m ³]				GSI				σ_p [MPa]				E [MPa]				ν				mi	D
		Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD		
α	Andeziti i tektonske breče			26,03				23				24,5				9740				0,21		20	0,3
β_1	Mauvri i bankovni krečnjaci	26,4	27,25	26,65	0,26	14	82	49	17	23,81	80,05	46,35	15,40	14680	47780	27838	8999	0,22	0,24	0,23	0,01	15	0,3

Tabela 3. Geomehanički parametri stenskih masa za profil 3-3'

Inženjerskogeološka (litološka) sredina		Zapreminska težina γ_s [kN/m ³]				GSI				σ_p [MPa]				E [MPa]				ν				mi	D
		Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD		
α	Andeziti i tektonske breče			26,03				23				24,5				9740				0,21		20	0,3
β_1	Mauvri i bankovni krečnjaci	26,4	27,2	26,65	0,26			15		23,81	80,05	46,35	15,40	14680	47780	27838	8999	0,22	0,24	0,23	0,01	12	0,4
Giban	Gnajzovi-biotitski, amfibolitski, muskovitski	25,9	29,2	27,0	0,9	11	67	27	7	12,61	56	38,81	13,79	4033	21390	13944	5547	0,24	0,28	0,26	0,01	26	0,3
Sco se	Škriljci zlatne facije			27,5				37				20,2				7761				0,26		12	-

Tabela 4. Geomehanički parametri stenskih masa za profil 4-4'

Inženjerskogeološka (litološka) sredina		Zapreminska težina γ_s [kN/m ³]				GSI				σ_p [MPa]				E [MPa]				ν				mi	D
		Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD		
α	Andeziti i tektonske breče			26,03				23				24,5				9740				0,21		20	0,3
β_1	Mauvri i bankovni krečnjaci	26,45	31,7	27,04	2,32	15	82	41	19	26,31	66,44	44,07	14,35	8775	44117	23974	12940	0,2	0,37	0,30	0,06	15	0,3
Giban	Gnajzovi-biotitski, amfibolitski, muskovitski	24,54	27,4	26,52	1,02	8	79	32	17	6,95	55,14	35,74	15,51	2778	23405	14820	6827	0,25	0,29	0,27	0,01	26	0,3

3. IZBOR RAČUNSKIH PARAMETARA

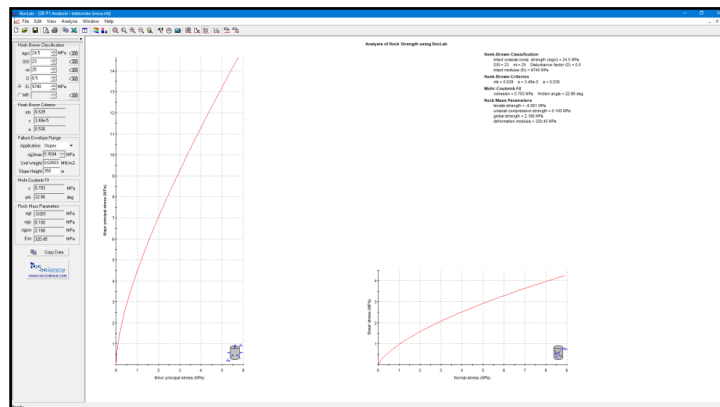
Računski parametri za proračun stabilnosti na geotehničkim profilima određeni su programom RocLab v1.033 firme Rocscience, na osnovu podataka definisanih u *Izveštaju o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*.

Na osnovu literature koja obrađuje ovu tematiku preporuka je da, pri analizi stabilnosti kosina površinskih kopova na kojima se vrše masovna miniranja, vrednost parametra D bude u granicama 0,5 – 1,0 [1,2]. Vrednosti

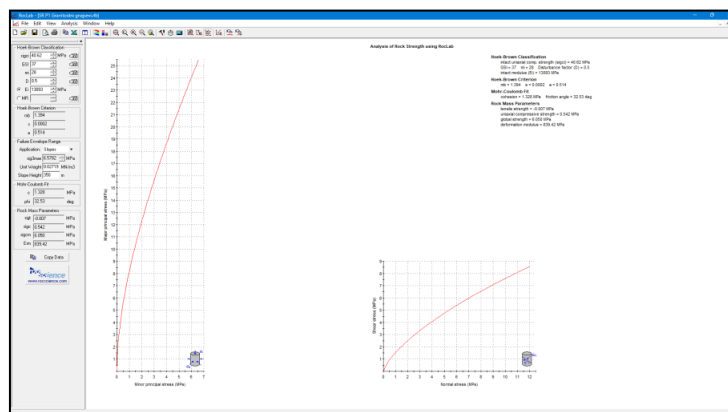
faktora oštećenja stenske mase D i materijalne konstante m_i u *Izveštaju o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*, potcjenjene su u odnosu na preporučene vrednosti koje su date u literaturi iz ove oblasti.

Za proračun stabilnosti nisu usvojene vrednosti parametra $D = 0,3$ iz *Izveštaja o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*, već je usvojena vrednost parametra $D = 0,5$ koja je u opsegu preporuka [1,2]. Takođe nije usvojena vrednost parametra m_i iz *Izveštaja o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*, već je usvojena srednja vrednost parametra m_i na osnovu literaturnih preporuka [1].

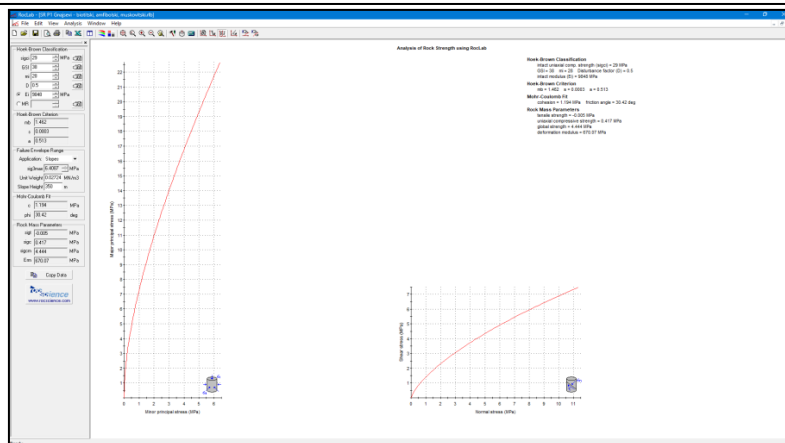
Određivanje računskih parametara za proračun stabilnosti na profilu 1 – 1' prikazano je na slikama 2 – 4. U tabeli 5 prikazane su vrednosti računskih parametara za proračun stabilnosti za sve radne sredine i profile.



Sl. 2. Računski parametri za radnu sredinu andeziti i tektonske breče, profil 1 – 1'



Sl. 3. Računski parametri za radnu sredinu granitoidni gnajsevi, profil 1 – 1'



Sl. 4. Računski parametri za radnu sredinu gnajsevi – biotitski, amfibolski, muskovitski, profil 1 – 1'

Tabela 5. Vrednosti računskih parametara za proračun stabilnosti površinskog kopa

Profil	Radna sredina	γ , kN/m ³	UCS, kPa	m_b	s	r_u
1-1'	Granitoidni gnajsevi	27,19	40.620	1,39404	0,000224867	0,2
1-1'	Gnajsevi - biotitski, amfibolski, muskovitski	27,24	29.000	1,46203	0,000256940	0,2
1-1'	Andeziti i tekonske breče	26,03	24.500	0,63904	0,000034773	0,2
2-2'	Masivni i bankoviti krečnjaci	26,65	46.350	1,32244	0,001113780	0,1
2-2'	Andeziti i tekonske breče	26,03	24.500	0,63904	0,000034773	0,2
3-3'	Škriljci zelene facije	27,50	20.200	0,59745	0,000224867	0,2
3-3'	Gnajsevi - biotitski, amfibolski, muskovitski	27,00	38.810	0,86590	0,000059274	0,2
3-3'	Andeziti i tekonske breče	26,03	24.500	0,63904	0,000034773	0,2
4-4'	Gnajsevi - biotitski, amfibolski, muskovitski	26,52	35.740	1,09868	0,000115451	0,2
4-4'	Masivni i bankoviti krečnjaci	27,04	44.070	0,90351	0,000383310	0,1
4-4'	Andeziti i tekonske breče	26,03	24.500	0,63904	0,000034773	0,2

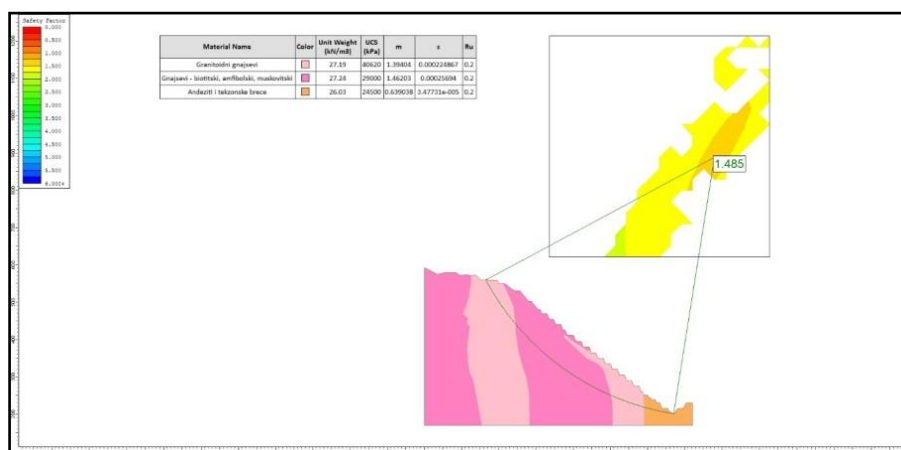
4. PRORAČUN STABILNOSTI ZAVRŠNIH KOSINA POVRŠINSKOG KOPA

Analiza stabilnosti završnih kosina kopa, urađena je na geotehničkim profilima 1-1' – 4-4' koji su definisani u dokumentu: *Izveštaj o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*. Položaj geotehničkih profila prikazan je na slici 1. Geometrija kosina na profilima prikazana je u tabeli 6.

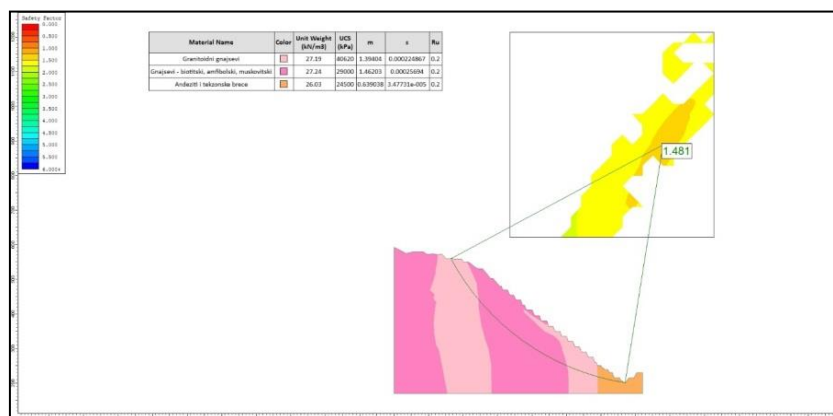
Tabela 6. Geometrija kosina na analiznim profilima

Profil	Visina kosine, m	Nagib kosine, °
1 – 1'	350	38
2 – 2'	475	38
3 – 3'	300	39
4 – 4'	260	35

Proračun stabilnosti je izvršen pomoću softverskog paketa *Rocscience*, odnosno njegovim alatom *Slide* koji se bazira na uslovima granične ravnoteže [8-15]. Proračuni su sprovedeni metodama *Bishop* i *Morgenstern-Price* za proizvoljne klizne površine. Program omogućava automatsko traženje kritične klizne ravni sa minimalnim faktorom sigurnosti. Izlazni interfejs programa *Slide* za proračun stabilnosti na profilu 1 – 1' prikazan je na slikama 5 i 6. U rezultatu proračuna prikazana je klizna površina sa najmanjim koeficijentom stabilnosti. Sve ostale klizne ravni imaju veći koeficijent stabilnosti od prikazane.



Sl. 5. Proračun stabilnosti za profil 1 – 1' po metodi Bishop



Sl. 6. Proračun stabilnosti za profil 1 – 1' po metodi Morgenstern-Price

Zbirni pregled rezultata proračuna stabilnosti završnih kosina površinskog kopa prikazan je u tabeli 7.

Tabela 7. Zbirni pregled koeficijenata stabilnosti za projektovano završno stanje

Profil	F _s Bishop	F _s Morgenstern-Price
1 – 1'	1,485	1,481
2 – 2'	1,351	1,355
3 – 3'	1,399	1,389
4 – 4'	1,593	1,587

5. ZAKLJUČAK

Analiza stabilnosti odlagališta na površinskom kopu Severni revir je urađena na osnovu sprovedenih istraživanja i analiza:

- Terenskih istražnih radova,
- Laboratorijskih ispitivanja,
- Proračuna stabilnosti računarskim softverom što je ustaljeni standard za ovu problematiku.

Upoređenjem proračunatih vrednosti koeficijenata stabilnosti završnih kosina površinskog kopa sa minimalnom dozvoljenom vrednošću $F_{smin} = 1,30$ koja je definisana Pravilnikom o tehničkim zahtevima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina ("Sl. glasnik RS", br. 96/2010), zaključak je da su završne kosine stabilne.

U cilju bezbednosti, najmanje dva puta godišnje mora da se proverí ugao nagiba završnih kosina ("Sl. glasnik RS", br. 96/2010). Takođe je potreban stalni monitoring završnih kosina u cilju pravovremenog utvrđivanja eventualnih pukotina, sleganja i sl. i u slučaju pojava istih moraju se preduzeti mere za saniranje.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor u 2025. godini, evidencioni broj 451-03-136/2025-03/ 200052.

LITERATURA

- [1] E. Hoek, E.T. Brown, Rocscience – Practical estimates of rock mass strength International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 34, 8 (1997) 1165-1186.
<https://www.rocsience.com/assets/resources/learning/hoek/1997-Practical-Estimates-of-Rock-Mass-Strength.pdf>
- [2] G. Somodi, N. Bar, L. Kovács, M. Arrieta, Á. Török, B. Vásárhelyi, Study of Rock Mass Rating (RMR) and Geological Strength Index (GSI) Correlations in Granite, Siltstone, Sandstone and Quartzite Rock Masses, Applied Sciences, 11 (8) (2021) 3351.
<https://doi.org/10.3390/app11083351>
- [3] F. Ceballos, C. Olalla, R. Jiménez, Relationship between RMRb and GSI based on in situ data, Conference: EUROCK Vigo 2014, ISRM European rock mechanics symposium At: Vigo, Madrid, 2014, DOI:10.13140/2.1.1813.3768
- [4] J.A. Franklin, Suggested method for determining point load strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstract, 22(2) (1985) 51-60.
- [5] ASTM D5731-16, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [6] M. Ljubojev, R. Popović, Osnove geomehanike, 2006. ISBN: 86-7827-020-9
- [7] V. Đorđević, Uporedna analiza Q i GSI klasifikacije za definisanje parametara smičuće čvrstoće stenske mase, Master rad, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, 2023.
<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007501>

-
- [8] R. Rajković, M. Gomilanović, D. Kržanović, S. Stepanović, M. Mikić, M. Jovanović, Determination of safety distances due to the seismic earthquakes during blasting at the open pit North mining district of the Majdanpek copper mine, *Mining & Metallurgy Engineering Bor*, 2 (2024) 21-34. DOI:10.5937/mmeb2402021R
 - [9] R. Rajković, D. Kržanović, M. Mikić, M. Jovanović, S. Trujić, Stabilnost odlagališta jalovine na površinskom kopu beli kamen na Fruškoj Gori, *Zbornik*, 14. Simpozijum sa međunarodnim učešćem „Rudarstvo 2023“, 30. maj -2. jun 2023, Zlatibor, Srbija, str. 248-256.
 - [10] R. Rajković, D. Kržanović, M. Mikić, M. Jovanović, S. Milutinović, Stability analysis of the integrated waste dumps of the open pits Žuta Prla and Brskovo near Mojkovac, *Mining & Metallurgy Engineering Bor*, 2 (2023) 9-16. DOI: 10.5937/mmeb2302009R.
 - [11] R. Rajković, D. Kržanović, M. Mikić, M. Jovanović, E. Požega, Analiza stabilnost završne kosine površinskog kopa Južni revir Rudnika bakra Majdanpek u severozapadnom delu – zona klizišta, Srbija, *Zbornik*, 13. Simpozijum sa međunarodnim učešćem „Rudarstvo 2022“, Privredna komora Srbije, Beograd, 2022.
 - [12] R. Rajković, D. Kržanović, M. Mikić, M. Jovanović, Calculation of safety distance for work of mining equipment in working environment with weakened characteristics on open pit "Severni revir" of Majdanpek copper mine, *The 52nd International October Conference on Mining and Metallurgy*, November 29th – 30th 2021, Bor, Serbia, pp. 79-82.
 - [13] R. Rajković, Lj. Obradović, D. Kržanović, M. Mikić, Stability of the Dam "Prevoj Šaška" of the Flotation Tailing Dump "Valja Fundata" in Majdanpek, *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 1-2 (2019) 9-18. DOI:10.5937/mmeb1902009R
 - [14] R. Rajković, D. Kržanović, M. Mikić, M. Jovanović, Stability of the ash and slag landfill "Maljevac" – Pljevlja for overtop to the peak elevation K+832 m, *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 1-2 (2018) 17-26. DOI 10.5937/mmeb1802017R
 - [15] R. Rajković, Lj. Obradović, M. Mikić, D. Kržanović, Application of standards for designing embankments and earth dams in the stability check dams flotation tailing RTH in RTB Bor; „Rudarstvo 2016“, 24.-26.05.2016, Sremski Karlovci, str. 298-307.

UDK: 622.271/.33(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2501011V

NAUČNI RAD

Oblast: Geologija

Primljen: 04.04.2025.

Prerađen: 16.04.2025.

Prihvaćen: 18.04.2025.

**TEHNOLOŠKO REŠENJE OTKOPAVANJA POVLATNE UGLJENE
ZONE NA PK „GACKO“ U SVRHU POBOLJŠANJA TOPLOTNE
VREDNOSTI ENERGETSKOG GORIVA ZA TE GACKO**

**TECHNOLOGICAL SOLUTION FOR EXCAVATING
THE RETURNABLE COAL ZONE AT THE "GACKO" POWER PLANT
FOR THE PURPOSE OF IMPROVING THE HEAT VALUE OF
THE ENERGY FUEL FOR THE GACKO POWER PLANT**

Boško Vuković¹

¹Rudnik i termoelektrana Gacko, Bosna i Hercegovina

E-mail: bosko.vukovic@ritegacko.com

Izvod

Kretanjem blokova na otkrivci i uglju, na južnoj kosini polja „C“, gde se eksploatisao glavni ugljeni sloj, optimalnih kvalitativnih karakteristika, kao gorivo za TE Gacko, potpuno je obustavljena eksploatacija uglja u Centralnoj eksploatacnoj zoni. Snabdevanje ugljem za termoelektranu Gacko, od aprila 2024. godine, vrši se isključivo iz krovinskih ugljenih slojeva.

Gornji trakasti nivo (¹²Ng) predstavljen je povećanim učešćem jalovine u ugljenom sloju sa proslojcima uglja male debljine, čija je eksploatacija otežana sa rudarskom mehanizacijom, zbog malog koeficijenta iskorišćenja eksploatacionih rezervi. Manji proslojci uglja su razdvojeni paketima slojne jalovine veće debljine, te bi eksploatacijom ovih rezervi uglja bio neohodan duži vremenski period i ne bi se obezbedio kontinuitet u sigurnom snabdevanju termoelektrane energetskim gorivom.

Jedina varijanta iskorišćenja rezervi uglja gornjeg trakastog nivoa jeste u kombinaciji sa srednjim ugljenim slojem u dubinskoj etaži, sa visokim stepenom raspoloživosti rudarske mehanizacije. Za proračun rezervi uglja gornjeg trakastog nivoa uzeti su zbirno svi proslojci koji zadovoljavaju toplotnom vrednošću potrebe termoelektrane, a izuzeti su proslojci uglja male toplotne vrednosti, jer isti stvaraju negativne efekte pri sagorevanju u kotlu termoelektrane (povećani šljaka i pepeo).

Ključne reči: povlatna zona, toplotna vrednost, rezerve, gornji trakasti nivo, srednji trakasti nivo

Abstract

Due to the movement of blocks on the overburden and coal, on the southern slope of field "C", where the main coal layer, with optimal quality characteristics, was exploited as fuel for TE Gacko, the exploitation of coal in the Central exploitation zone was completely suspended. Coal supply for the Gacko thermal power plant, from April 2024, is made exclusively from roof coal seams.

The upper strip level (¹²Ng) is represented by the increased participation of tailings in the coal layer with coal interlayers of small thickness, whose exploitation is difficult with mining machinery, due to the low coefficient of utilization of exploitation reserves. Smaller layers of coal are separated by packages of stratified tailings of greater thickness, so the exploitation of these coal reserves would be necessary for a longer period and would not provide continuity in the safe supply of energy fuel to the thermal power plant.

The only variant of using the coal reserves of the upper belt level is in combination with the middle coal layer in the deep layer, with a high degree of availability of mining machinery. For the calculation of coal reserves of the upper belt level, all strata that meet the heat value of the thermal power plant were taken collectively, and coal strata of low calorific value were excluded because they create negative effects during combustion in the boiler of the thermal power plant (increased slag and ash).

Keywords: yield zone, calorific value, reserves, upper strip level, middle strip level

1. UVOD

Stepen istraženosti rezervi uglja u pogledu njihovih količina i kvaliteta, kao i u pogledu geoloških karakteristika od interesa za eksploataciju, je različit. Činjenica je da za pouzdaniju ocenu mogućnosti razvoja energetike na bazi korišćenja uglja u rudniku uglja Gacko treba poznavati brojne parametre. To su, pre svega: količina i kvalitet geoloških rezervi uglja, rudarsko-geološke prilike, hidrogeološki uslovi eksploatacije, geomehanički parametri pratećih sedimenata, kvalitet i upotrebljivost uglja, mogućnost razvoja jeftinije površinske eksploatacije, mogućnost primene savremene osnovne mehanizacije na površinskim kopovima odnosno mehanizovanih visokoproduktivnih kompleksa u podzemnoj eksploataciji, troškovi pripreme uglja za potrošače (TE), mogućnosti i uslovi transporta od mesta proizvodnje do potrošača (TE), konkurentnost uglja drugim oblicima raspoložive primarne energije, mogućnost lokacije TE, specifične investicije i troškovi proizvodnje uglja i električne energije u zavisnosti od kapaciteta, uslovi eksploatacije, pripreme i dužine transporta u odnosu na specifične troškove proizvodnje električne energije, i dr. [1] Pored toga, bez obzira da li se radi o TE manje ili veće snage, rudnik treba da obezbedi snabdevanje energetskog goriva za celi vek TE [2].

U svrhu raspolaganja sa relevantnim podacima o kvalitativnim i kvantitativnim karakteristikama uglja i količinom otkrivke za obezbeđenje proračunatih rezervi uglja do „bajpasa“ korita reke Mušnice izvršena je podela tog dela ležišta po eksploatacionim blokovima. Eksploatacioni blokovi su okontureni na osnovu zakonomernosti strukturnih elemenata sklopa, ugljenih slojeva [3].

S obzirom da je eksploatacija uglja u polju „C“ privremeno obustavljena, zbog velikih količina vode u vodosabirnicima, kontinuitet u redovnom snabdevanju ugljem termoelektrane Gacko, moguć je jedino eksploatacijom uglja „krovinske ugljene serije“. [4] Na osnovu raspoloživih podataka iz pripadajućih bušotina, koje su uglavnom novijeg datuma (od 2015. godine do danas), može se sa tačnošću do cca 10%, sagledati raspoloživost sirovinske baze uglja pripadajućih kvalitativnih karakteristika. [5]

Pregledom poprečnih i podužnih profila, kroz ležište uglja, na kome su nataloženi krovinski ugljeni slojevi, može se sagledati, njihovo generelno pružanje i pad prema istoku, a isklinjenje prema severnim delovima ležišta. U severnom delu ugalj isklinjava sa najmanjim koeficijentom otkrivke dok u

centralnim delovima ugljeni slojevi padaju prema istoku i koeficijent otkrivke se neprestano povećava. Zanimajući činjenicu „raubovanja“ ležišta, tehnološki u periodu nemogućnosti obezbeđenja neophodnih količina uglja iz polja „C“, najprihvatljivije rešenje je eksploatacije uglja od centralnih delova prema zoni isklinjenja ugljenih slojeva.

U tu svrhu, neophodno je analizirati tehnološko rešenje izmeštanja „bajpasa“ samo u severnom delu, jer bi se time obezbedio ugalj zahtevanih kvalitativnih karakteristika u količinama sa dubinskim delovima za period od 2-3 godine. Olakšavajuća okolnost sa aspekta ekonomske opravdanosti izmeštanja „bajpasa“ leži u činjenici da bi se taj deo trase izmestio na „državnom“ zemljištu.

Radi preglednosti količina uglja koje bi se eksploatisale izmeštanjem „bajpasa“ u severnom delu formirani su eksploatacioni blokovi 1 i 2, koji su lokacijski prikazani na slici 1, a proračuni količina uglja i otkrivke u tabeli 1, kako sledi, posle slike 1 i slike 2.

U svrhu analize mineralno sirovinске baze uglja sa aspekta, kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika krovinskih ugljenih slojeva do „bajpasa“ reke Mušnice urađen je Izveštaj koji se sastoji iz sledećih delova:

1. Proračun količine rovnog uglja i slojne jalovine u ugljenom sloju za gornji trakasti nivo (^{12}Ng) koji toplotnom vrednošću zadovoljava potrebe bloka termoelektre.
2. Proračun količine rovnog uglja i slojne jalovine u ugljenom sloju za srednji ugljeni nivo (^{11}Ng) i dela donjeg trakastog nivoa (^{10}Ng) koji toplotnom vrednošću zadovoljava potrebe bloka termoelektre.
3. Proračun količine otkrivke u eksploatacionim blokovima 1, 2, 3 i 5 do rovnog uglja srednjeg ugljenog nivoa (glavnog sloja ^{11}Ng) povlatne ugljene zona sa pridruženim gornjim trakastim ugljenim nivoom (^{12}Ng).

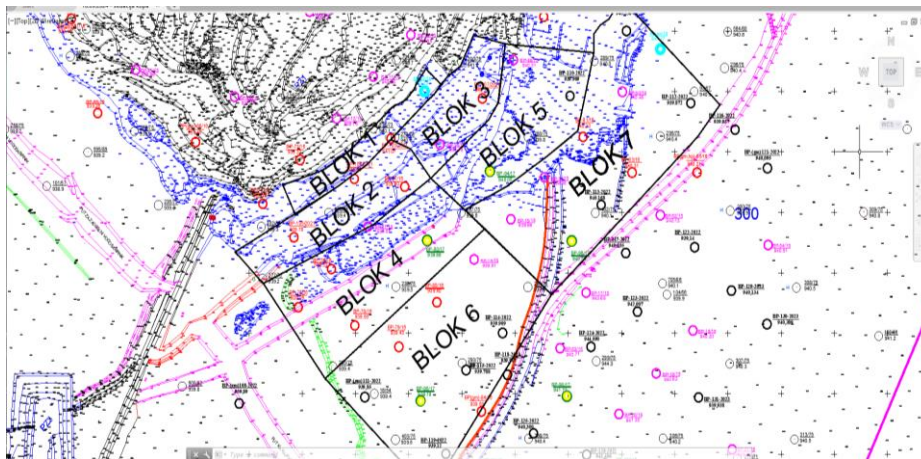
2. PRORAČUN KOLIČINE ROVNOG UGLJA I SLOJNE JALOVINE U UGLJENOM SLOJU ZA GORNJI TRAKASTI NIVO (^{12}Ng) KOJI TOPLOTNOM VREDNOŠĆU ZADOVOLJVA POTREBE BLOKA TERMoeLEKTRANE

Gornji trakasti nivo (^{12}Ng) predstavljen je povećanim učešćem jalovine u ugljenom sloju sa proslojcima uglja male debljine, čija je eksploatacija otežana sa rudarskom mehanizacijom, zbog malog koeficijenta iskorišćenja eksploatacionih rezervi. Manji proslojci uglja su razdvojeni paketima slojne jalovine veće debljine, te bi eksploatacijom ovih rezervi uglja bio neophodan duži vremenski period i ne bi se obezbedio kontinuitet u sigurnom snabdevanju termoelektre energetske gorivom.

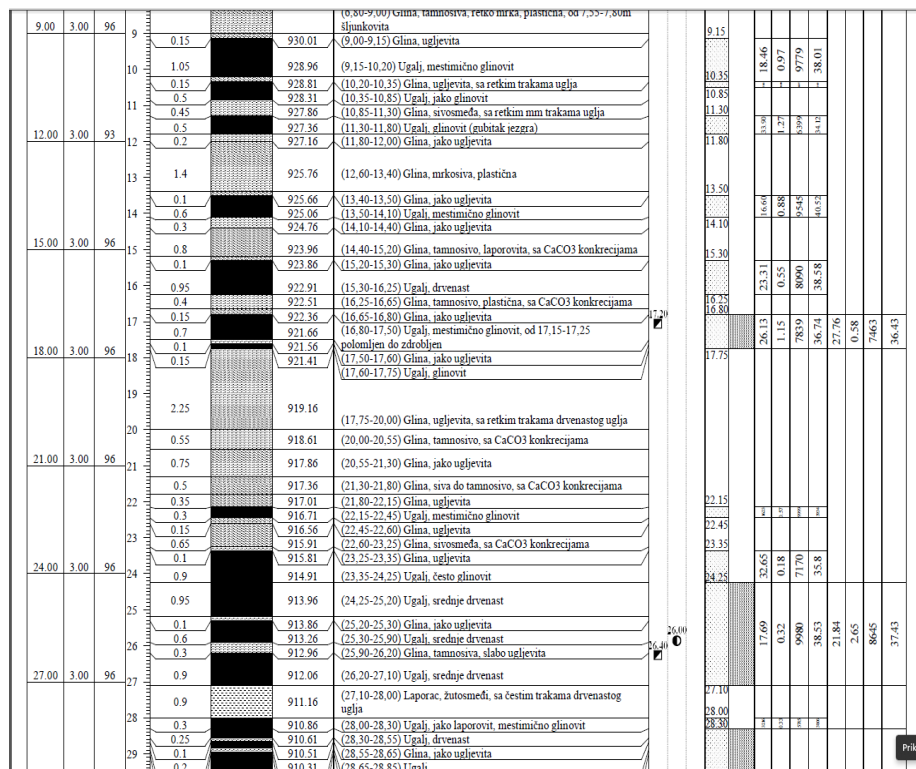
Jedina varijanta iskorišćenja rezervi uglja gornjeg trakastog nivoa jeste u kombinaciji sa srednjim ugljenim slojem u dubinskoj etaži, sa visokim stepenom raspoloživosti rudarske mehanizacije. Za proračun rezervi uglja gornjeg trakastog nivoa uzeti su zbirno svi proslojci koji zadovoljavaju toplotnom vrednošću potrebe termoelektrane, a izuzeti su proslojci uglja male toplotne vrednosti, jer isti stvaraju negativne efekte pri sagorevanju u kotlu termoelektrane (povećani šljaka i pepeo). Samo na nekim istražnim bušotinama i eksploatacionim blokovima, prikazanim u tabelama koje slede, odnos uglja i jalovine je ekonomičan i rentabilan za eksploataciju, ali ukupni odnos u gornjem trakastom nivou, ugalj/slojna jalovina je 1:1,7, što se može videti u zbirnoj/rekapitulacionoj tabeli za ovaj ugljeni sloj. Sve bušotine je neophodno prevashodno iskolčiti na terenu, kako bi se sa geoloških stubova pratila eventualna eksploatacija proslojaka uglja.

Kod otkopavanja otkrivke do „bajpasa“ korita reke Mušnice, neophodno je sa jalovinom otkopati sve proslojke uglja, koji su većinom u krovini ugljenog sloja, jer isti predstavljaju balast prilikom sagorevanja u kotlu termoelektrane. Za praćenje otkopavanja otkrivke tj. dubine otkopavanja, neophodno je označiti na situacionoj karti kote dubine otkopavanja, kako se ne bi otkopavala samo jalovina, već i proslojci uglja niske toplotne vrednosti.

Na slici 1 prikazana je situaciona karta „povlatne ugljene zone“ sa pozicijama obračunskih blokova sa stanjem 01.08.2024. godine.



Sl. 1. Podela po eksploatacionim blokovima rezervi uglja do „bajpasa“ korita reke Mušnice



Sl. 2. Grafički prikaz stuba istražne bušotine sa prikazom gornjeg trakastog nivoa [1]

Proračun količina čistog uglja po eksploatacionim blokovima, sa pripadajućom toplotnom vrednošću prikazan je u tabelama 1 i 2, tj. eksploatacionim blokovima 1-7. U rekapitulacionoj tabeli 3. prikazani su rezultati proračuna, količina rovnog uglja, čija toplotna vrednost zadovoljava potrebe bloka TE za gornji trakasti nivo (^{12}Ng) i proračun količina slojne jalovine.

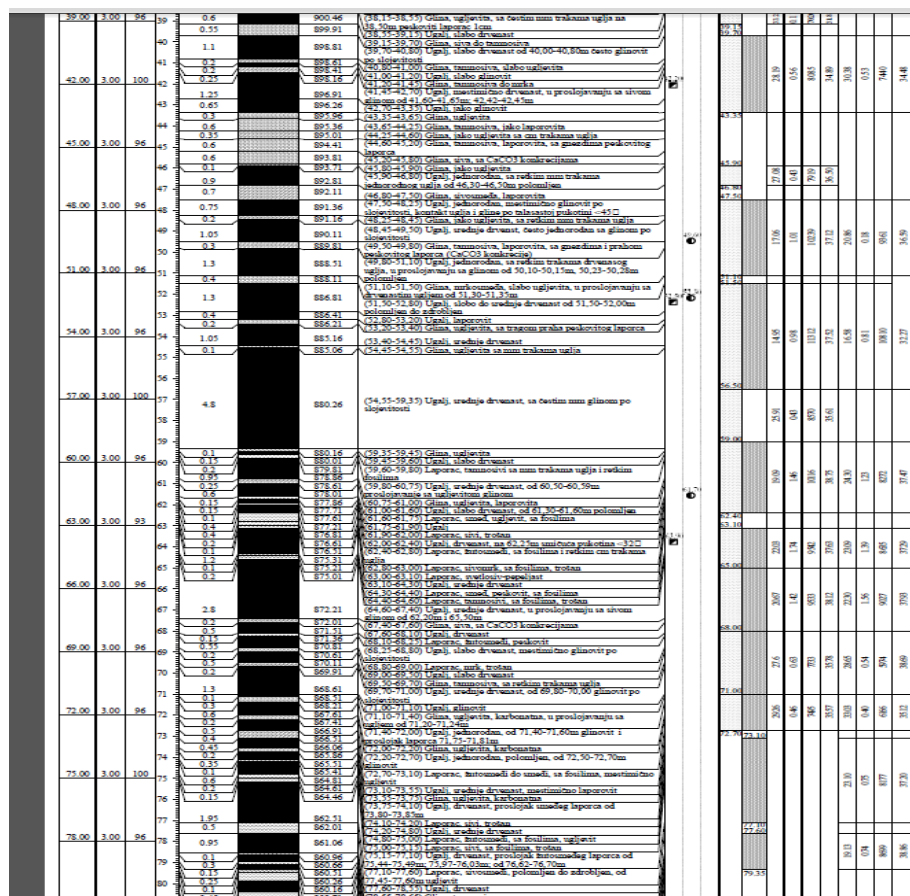
Tabela 1. Rekapitulacija proračuna količina rovnog uglja čija toplotna vrednost zadovoljava potrebe bloka TE za gornji trakasti nivo (^{12}Ng) i proračun količina slojne jalovine

Eksploatacioni blok	Količina rovnog uglja gornji trakasti nivo ^{12}Ng (t)	Prosečna donja toplotna vrednost (kJ/kg)	Količina slojne jalovine koju je potrebno selektivno odvojiti (m ³)
Blok 1	102.094	8523	140.410
Blok 2	190.548	8475	217.800
Blok 3	83.649	8295	102.150
Blok 4	328.528	8262	436.800
Blok 5	163.721	7920	194.750
Blok 6	321.300	7820	898.450
Blok 7	431.376	8020	747.110
Ukupno:	1.621.216	Prosek: 8187	2.737.470

3. PRORAČUN KOLIČINE ROVNOG UGLJA I JALOVINE U UGLJENOM SLOJU ZA SREDNJI UGLJENI NIVO (^{11}NG) I DELA DONJEG TRAKASTOG NIVO (^{10}NG) KOJI TOPLOTNOM VREDNOŠĆU ZADOVOLJVA POTREBE BLOKA TERMoeLEKTRANE

Središnji ugljeni sloj krovinske ugljene serije predstavlja najkompaktniji sloj, koji omogućava kontinuitet u sigurnom snabdevanju termoelektrane energetskim gorivom. Za proračun u tabelama koje slede, uzet je i krovinski deo donjeg trakastog ugljenog sloja, jer je kompaktan, visoke toplotne vrednosti i neophodno ga je otkopati zajedno sa srednjim ugljenim slojem. Središnji i podinski delovi donjeg trakastog ugljenog nivoa su dosta raslojeni tako da na sadašnjem stepenu iskorišćenja ležišta „povlatne ugljene zone“ i tehnologije eksploatacije ne mogu se rentabilno otkopavati.

Na slici 3, prikazan je karakteristični geološki stub središnjeg trakastog ugljenog nivoa povlatne ugljene zone.



Na geološkom stubu se jasno vidi kompaktnost ugljenog sloja sa neznatnim učešćem slojne jalovine i otkopavanjem ovog ugljenog sloja postižu se optimalni ekonomski efekti na bloku termoelektrane. Blok postiže veću snagu 220-240 MW, manje varijacije u energetske snazi bloka, a istovremeno i veći prihod u ekonomskom poslovanju kompanije RiTE Gacko. U Tabeli 2, prikazana je rekapitulacija, proračuna količine rovnog uglja srednji stratografski nivo (^{11}Ng), dela donjeg trakastog nivoa (^{10}Ng) i proračun količina slojne jalovine.

Tabela 2. *Rekapitulacija proračuna količine rovnog uglja srednji stratografski nivo (^{11}Ng), dela donjeg trakastog nivoa (^{10}Ng) i proračun količina slojne jalovine*

Eksploatacioni blok	Količina rovnog uglja srednjeg trakasti nivo ^{11}Ng i krovinskog dela donjeg trakastog sloja ^{10}Ng (t)	Prosečna donja toplotna vrednost (kJ/kg)	Količina slojne jalovine koju je potrebno selektivno odvojiti (m ³)
Blok 1	540.261	9296	109.060
Blok 2	898.872	9318	162.000
Blok 3	476.928	9463	84.487
Blok 4	1.220.793	9174	211.640
Blok 5	963.098	9450	114.800
Blok 6	1.422.611	9001	271.600
Blok 7	1.432.795	9119	283.010
Ukupno:	6.955.358	Prosek: 9260	1.236.597

4. PRORAČUN KOLIČINE OTKRIVKE U EKSPLOATACIONIM BLOKOVIMA 1, 2, 3 I 5 DO ROVNOG UGLJA SREDNJEG UGLJENOG NIVOVA (GLAVNOG SLOJA ^{11}Ng) POVLATNE UGLJENE ZONA SA PRIDRUŽENIM GORNJIM TRAKASTIM UGLJENIM NIVOM (^{12}Ng)

U proračun količine otkrivke u eksploatacionim blokovima 1, 2, 3 i 5 do rovnog uglja gornjeg trakastog nivoa (^{12}Ng), koji zadovoljava potrebe bloka termoelektrane, po toplotnoj vrednosti, uzeti su u obzir proslojci uglja male toplotne vrednosti i male debljine koji se ne mogu ekonomično i rentabilno eksploatirati.

Otkopavanjem sa otkrivanjem ugljenih slojeva male debljine i male toplotne vrednosti, dobijaju se veći ekonomski i tehnološki efekti kao i dinamika otkopavanja otkrivke do ugljenih slojeva koji se isporučuju termoelektrani. U tabeli 3, prikazan je proračun količina otkrivke koju je neophodno otkopati, da bi se dobile „rezerve uglja otvorene za eksploataciju“ po eksploatacionim blokovima 1, 2, 3 i 5. Ovi blokovi su prevashodno analizirani jer je planirana eksploatacija uglja iz istih u 2025. godini.

Tabela 3. *Rekapitulacija količine otkrivke u eksploatacionim blokovima 1, 2, 3 i 5 do rovnog uglja srednjeg ugljenog nivoa (^{11}Ng) povlatna ugljena zona sa uračunatim gornjim trakastim ugljenim nivoom (^{12}Ng)*

Eksploatacioni blok	Količina otkrivke (m ³)
Blok 1	162.900
Blok 2	762.000
Blok 3	408.600
Blok 5	1.160.300
Ukupno:	2.330.900

5. GEOLOŠKA ISTRAŽIVANJA U NAREDNOM PERIODU

U svrhu reprodukcije mineralno-sirovinske baze ležišta uglja Gacko, neophodno je sprovoditi detaljna geološka istraživanja [4].

Za sprovođenje detaljnih geoloških istraživanja, neophodna su istražna bušenja i laboratorijska ispitivanja u licenciranim laboratorijama.

Geološki podaci iz ranijih perioda istraživanja (period 1950.-1980. godina) nisu dali pouzdane podatke o debljini litoloških jedinica unutar krovinske ugljene serije, kao i rezultate o kvalitativnim karakteristikama ugljene materije.

Povlatni ugljeni sloj ima rezerve skoro za 20 godina proizvodnje električne energije TE „Gacko“. Međutim, ovaj ugalj, osim selektivnog otkopavanja na površinskom kopu treba da se pre korišćenja i oplemenjuje/prečišćava, odnosno da mu se DTM-donja toplotna vrednost dovede na vrednosti kakvu zahteva instalisana oprema, odnosno kotao u kome sagoreva.

Koncepcija detaljnih geoloških istraživanja mineralne sirovine uglja povlatne ugljene zone proistekla je iz analize raspoloživih podataka o položaju, prostornom rasprostranjenju ugljenih slojeva i njihovim strukturnim i kvalitativnim karakteristikama, pri čemu se došlo do sledećih zaključaka:

- da je u području istočnog, južnog i severnog dela povlatne ugljene zone, stepen geološke istraženosti prvog, drugog i trećeg krovinskog ugljenog sloja na nivou B kategorije;
- prekategorizacija rezervi iz B u A kategoriju je neophodna zbog malog stepena pouzdanosti geoloških podataka iz prethodnog perioda (do 2015. godine) o kvalitativnim karakteristikama uglja;
- da su položaj ugljenih slojeva, njihovo prostorno rasprostranjenje, te njihove strukturne i litološke karakteristike nedovoljno proučeni (zbog

nejasnoća geoloških stubova pojedinih bušotina iz ranijih perioda istraživanja);

- kao posledica neadekvatnog geološkog kartiranja i interpretacije geološkog stuba u toku izvođenja radova na istražnom bušenju pojedinih bušotina pojavio se problem eventualnog uticaja na prikaz rezultata kvalitativnih karakteristika uglja u ugljenim slojevima;
- da je za analizu izbora postrojenja za prečišćavanje uglja neophodno primeniti novu metodologiju oprobavanja uglja iz povlatne ugljene zone.

Geološke istražne bušotine projektovati u povlatnoj ugljenoj zoni za prekategoriizaciju rezervi iz B u A kategoriju raspoređene su po obračunskim geološkim profilima u mreži 100 x 100 m a rastojanja između bušotina po profilu je 100 metara.

6. ZAKLJUČAK

1. Kako bi se obezbedio kontinuitet u sigurnom snabdevanju termoelektrane Gacko, energetskim gorivom urađen je proračun geoloških rezervi uglja, slojne jalovine i otkrivke od sadašnjeg fronta otkopavanja uglja do „bajpasa“ korita reke Mušnice.
2. Urađeni su sledeći proračuni:
 - Proračun količine rovnog uglja i jalovine u ugljenom sloju za gornji trakasti nivo (^{12}Ng) koji toplotnom vrednošću zadovoljava potrebe bloka termoelektrane.
 - Proračun količine rovnog uglja i jalovine u ugljenom sloju za srednji ugljeni nivo (^{11}Ng) i dela donjeg trakastog nivoa (^{10}Ng) koji toplotnom vrednošću zadovoljava potrebe bloka termoelektrane.
 - Proračun količine otkrivke u eksploatacionim blokovima 1, 2, 3 i 5 do rovnog uglja srednjeg ugljenog nivoa (glavnog sloja ^{11}Ng) povlatne ugljene zone sa pridruženim gornjim trakastim ugljenim nivoom (^{12}Ng).
3. Za gornji trakasti nivo iz proračuna su izuzeti svi proslojci uglja male debljine i male toplotne vrednosti, jer je eksploatacija istih ispod granice produktivnosti, ekonomičnosti i rentabilnosti poslovanja u Rudniku tj. u PK „Gacko“. Eksploatacija ovih proslojaka u prethodnom periodu se manifestovala u povećanoj količini šljake i pepela prilikom sagorevanja u kotlu termoelektrane, maloj proizvodnoj snazi na bloku termoelektrane do granice ispadanja iz sistema kao i neostvarenju planiranih proizvodnih količina uglja i otkrivke na površinskom kopu.

Na osnovu svih relevantnih faktora i pokazatelja nameće se zaključak, da se ovi proslojci otkopaju zajedno sa otkrivkom, jer je efektivnost proizvodnje

veća, kao i obezbeđenje energetskog goriva optimalnih kvalitativnih karakteristika.

Bez obzira na stvaranje svesnog eksploatacionog gubitka, treba voditi računa o ekonomskoj efektivnosti proizvodnje uglja i električne energije.

4. Zbog napred navedenog, proračun za gornji trakasti ugljeni nivo, (¹²Ng), je prikazan samo za podinske delove ugljenog sloja koji se mogu eksploatisati samo uz kontrolu selektivne eksploatacije u terenskim uslovima.
5. Na kraju ovog rada, posebno su analizirani eksploatacioni blokovi 1, 2, 3 i 5 u kojima se obezbeđuje ugalj za termoelektiranu za period od jedne godine.
6. Najpovoljnija varijanta je otkopavanje otkrivke do srednjeg trakastog ugljenog nivoa (glavnog sloja), kako bi se obezbedio ugalj čija toplotna vrednost omogućava veću snagu na bloku termoelektirane. Eksploatacijom samo srednjeg ugljenog nivoa i gornjih delova donjeg trakastog ugljenog nivoa, obezbedio bi se kontinuitet u sigurnom snabdevanju termoelektirane energetskim gorivom, sa malim učešćem proslojaka slojne jalovine koji neznatno snižavaju toplotnu vrednost uglja u odnosu na geološke uslove obrazovanja ugljenih slojeva. Koeficijent otkrivke, ako bi se eksploatisao samo srednji ugljeni nivo (glavni sloj ¹¹Ng) i delovi donjeg trakastog nivoa (¹⁰Ng), koji zadovoljavaju toplotnom vrednošću potrebe termoelektirane iznose:

$$2.330.900 \text{ m}^3\text{čm (otkrivka)} + 417.347 \text{ m}^3\text{čm (slojna jalovina)} / 2.879.159 \text{ tona} = \\ = 0,95 \text{ m}^3\text{čm/toni [4]}$$

7. Na osnovu izvedenih proračuna, geološke građe obrazovanja ugljenih slojeva „povlatne ugljene zone“, kontinuiteta u sigurnom snabdevanju termoelektirane ugljem, sa većim stepenom iskorišćenja bloka, zaključna razmatranja, sa sigurnošću dovode do pozitivnih ekonomskih i tehnoloških efekata u proizvodnji uglja i električne energije na Rudniku i TE Gacko.

LITERATURA

- [1] Z. Ječmenica Elaborat o izvedenim dodatnim detaljnim geološkim i inženjersko-geološkim istraživanjima povlatne ugljene zone i istočnog polja u funkciji kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika ugljenih slojeva za potrebe izrade elaborata o rezervama i postrojenja za prečišćavanje uglja za period 2023.-2025. godina, Institut za rudarstvo i metalurgiju, Zvornik, 2024.

- [2] S. Stepanović, Uprošćeni rudarski projekat stabilizacije kosina u zoni južne završne kosine površinskog kopa Gacko-Centralno polje, 2024.
- [3] B. Vuković, Geološko-ekonomska ocena neobnovljivih energetske resursa Republike Srpske u funkciji nacionalne i komercijalne isplativosti, Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, 2011.
- [4] B. Vuković, Projekat detaljnih geoloških istraživanja povlatne ugljene zone na PK „Gacko“, Rudnik i TE, Gacko, 2025.

UDK: 658.567:621.355:669.24/.73(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2501023D

NAUČNI RAD

Oblast: Metalurško inženjerstvo

Primljen: 07.04.2025.

Prerađen: 10.04.2025.

Prihvaćen: 21.04.2025.

RECIKLAŽA NIKL-KADMIJUMSKIH AKUMULATORA RECYCLING OF NICKEL-CADMIUM BATTERIES

Stevan Dimitrijević¹, Silvana Dimitrijević², Borislava Vurdelja³

¹Inovacioni centar TMF u Beogradu d.o.o., Karnegijeva 4, 11120 Beograd, Srbija

²Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Alberta Ajnštajna 1, 19210 Bor, Srbija

³Tarkett Ltd., Industrijska zona 8, 21400 Bačka Palanka, Srbija

1 E-mail: sdimitrijevic@tmf.bg.ac.rs; Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6507-0259>

2 E-mail: silvana.dimitrijevic@irmbor.co.rs; Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1670-4275>

3 E-mail: pajkicborislava2@gmail.com; Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9923-6616>

Izvod

Elektrode Ni-Cd akumulatora sadrže teške metale poput Ni, Cd i Co, koji se moraju reciklirati u cilju rešavanja ekoloških problema. Istovremeno, Ni i Co koji se dobijaju u toku procesa imaju i značajnu ekonomsku vrednost i spadaju u strateški značajne metale (Critical Raw Materials po EU klasifikaciji). U radu je prikazan literaturni pregled postupaka za reciklažu Ni-Cd akumulatora sa posebnim osvrtom na luženje sumpornom kiselinom kao najčešće korišćenim postupkom. Ova jednostavna hidrometalurška tehnologija je idealna za pogone manjeg i srednjeg kapaciteta jer ne zahteva skupu opremu koja se koristi u pirometalurškoj tehnologiji koja primenjuje karbotermalnu redukciju na visokoj temperaturi. U radu su prikazani i rezultati fizičko-hemijske karakterizacije akumulatora nakon ručnog rasklapanja primenom ICP OES i SEM EDS metoda.

Ključne reči: Ni-Cd akumulatori, reciklaža, luženje, SEM EDS analiza, sumporna kiselina

Abstract

The electrodes of Ni-Cd batteries contain heavy metals such as Ni, Cd and Co, which must be recycled to solve environmental problems. At the same time, Ni and Co obtained during the process have significant economic value and belong to strategically important metals (Critical Raw Materials according to the EU classification). The paper presents a literature review of procedures for recycling Ni-Cd batteries with a special reference to leaching with sulfuric acid as the most commonly used procedure. This simple hydrometallurgical technology is ideal for small and medium-capacity plants because it does not require the expensive equipment used in pyrometallurgical technology that applies carbothermal reduction at a high temperature. The paper also presents the results of the physicochemical characterization of the battery after manual disassembly, performed by ICP OES and SEM-EDS analyses.

Keywords: Ni-Cd battery, recycling, leaching, SEM-EDS analysis, sulfuric acid

1. UVOD

Nikl-kadmijum (Ni-Cd) punjive baterije (akumulatori) su vrsta akumulatora koje koriste nikl (Ni) kao pozitivnu elektrodu i kadmijum (Cd) kao negativnu elektrodu, uz alkalni elektrolit (najčešće kalijum hidroksid). Ovaj tip baterije je bio vrlo popularan zbog svoje sposobnosti da izdrži mnoge cikluse punjenja i pražnjenja, dugotrajnosti i relativno niskih troškova proizvodnje, iako je danas u velikoj meri zamenjen drugim tehnologijama poput litijum-jonskih baterija. Ni-Cd baterije imaju visoku gustinu energije, dugačak životni ciklusa i niske stope samopražnjenja. Dobro rade u različitim aplikacijama i mogu da rade u širokom temperaturnom opsegu [1-2].

Ideja o akumulatorima sa ponovljivim punjenjem postoji još od kraja 19. veka. Prvi akumulator sa ovim principom punjenja, poznat kao "wet cell" baterija (olovni akumulator), razvio je francuski naučnik Gaston Planté 1860. godine [3]. Valdemar Jungner je 1899. godine patentirao Ni-Cd akumulator, što je bio prvi značajan korak u razvoju ove vrste baterija. Ovaj patent bio je prvi komercijalno uspešan model punjivog akumulatora koji je koristio nikl kao pozitivnu elektrodu i kadmijum kao negativnu elektrodu, uz alkalni elektrolit (kalijum hidroksid). Ovaj akumulator imao je veliku prednost u odnosu na prethodne tehnologije, jer je omogućavao višekratno punjenje i pražnjenje, što ga je učinilo vrlo praktičnim za različite primene [4].

Thomas Edison je najpoznatiji po svom radu u oblasti električne energije, a jedan od njegovih značajnih doprinosa bio je razvoj nikl-željeznih akumulatora. Edison je 1901. godine patentirao ovu vrstu baterije, koja je koristila nikl (Ni) i gvožđe (Fe) kao elektrode i KOH kao elektrolit. Njegov nikl-željezni (Ni-Fe) akumulator bio je punjiv, imao je dug životni vek i bio je otporan na prekomerno pražnjenje. Iako je bila popularna u nekim industrijama, Ni-Fe akumulator nije imao komercijalni uspeh u velikoj meri, jer je bio teži i imao niži energetska kapacitet u poređenju s drugim akumulatori. Godine 1906. Jungner je osnovao fabriku za proizvodnju punjivih Ni-Cd baterija u blizini Oskarshamna u Švedskoj [3-4]. Jungnerovo otkriće je u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) u velikoj meri bilo nepoznato u to vreme. Ni-Cd akumulator, proizvod kasnog XIX veka, pretrpeo je značajno poboljšanje dizajna 30-ih godina XX veka uvođenjem sinterovanih elektroda. Zapečaćeni oblik ove baterije, veliki napredak, pojavio se odmah nakon Drugog svetskog rata u SAD, sa prvom proizvodnjom džepnih baterija u SAD 1946 [5]. Šezdesetih godina prošlog veka došlo je do porasta primene ovih baterija u elektronici za prenosive uređaje, zahvaljujući razvoju kompanije Sanyo Corporation [6].

Ni-MH akumulatori su razvijeni kasnih 1980-ih i vrlo brzo su komercijalizovani u Japanu 1990. Oni imaju male, ali brojne (u skoro svakom tehničkom aspektu) prednosti u odnosu na Ni-Cd baterije [7]. Nedavno nakon toga, 1990-ih, pojavile su se litijum-jonski akumulatori koje se široko koriste u

prenosnim elektronskim uređajima [8-9]. Očekivalo se da će Ni-Cd baterije biti brzo zamenjene, uglavnom zato što ovi noviji tipovi akumulatora imaju bolje karakteristike i manje ekoloških problema. Međutim, Ni-Cd tip se i danas koristi ali je njihova upotreba strogo ograničena na globalnom nivou, uz najrigoroznije zakonodavstvo u EU, počevši od 'Direktive o baterijama' 2006/66/EC, koja je nedavno zamenjena Uredbom 2023/1542, koja zabranjuje Ni-Cd baterije i punjive baterije u prenosnim aplikacijama, od 18. avgusta 2025. [10]. Ipak, s upotrebom u posebnim aplikacijama i brojnim Ni-Cd baterijama koje se danas koriste, njihovo recikliranje je vrlo aktuelno i važno ekološko pitanje.

Reciklaža Ni-Cd akumulatora je ključna za smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu, jer oni sadrže toksični kadmijum koji može biti veoma štetan za tlo i vodu ako se ne odlaže pravilno. Kadmijum je izuzetno toksičan metal koji može imati ozbiljan negativan uticaj na zdravlje ljudi i životnu sredinu. Njegova toksičnost zavisi od načina i trajanja izlaganja, kao i količine kadmijuma kojoj je organizam izložen. Zbog svoje toksičnosti i sposobnosti da se akumulira u organizmu, važno je obratiti pažnju na pravilno upravljanje proizvodima koji sadrže kadmijum, kao i na odgovorno odlaganje otpada koji sadrži ovaj metal. Pravilna reciklaža, smanjenje upotrebe kadmijuma i povećanje javne svesti o njegovim opasnostima mogu značajno doprineti smanjenju rizika [11].

2. POSTUPCI ZA RECIKLAŽU Ni-Cd AKUMULATORA

Do sada je razvijen veliki broj metoda za reciklažu istrošenih Ni-Cd akumulatora. Pirometalurški i hidrometalurški procesi su dve najčešće tehnologije koje se široko koriste za reciklažu Ni-Cd akumulatora. Pirometalurški procesi uključuju pirolizu [12], karbotermičku redukciju i vakuum destilacijuciju [13-14], dok hidrometalurški procesi uključuju bioluženje, elektrohemijske postupke [15-16] i luženje neorganskim [17-18] i organskim kiselinama [19].

Pirometalurški procesi (zasnovani na Cd destilaciji) su uglavnom koriste za recikliranje Ni-Cd baterija. Ovaj tip postrojenja je u funkciji od 1980-ih i 1990-ih godina u EU i SAD [20] i još uvek je vodeća tehnologija za sve tipove ovih akumulatora. Postrojenja za reciklažu litijum-jonskih baterija obično su proširenje postojećih postrojenja za Ni-Cd i Ni-MH širom sveta. Kompanije SNAM (Francuska) i Accurec Recycling (Nemačka) poznate su po čisto pirometalurškim procesima, dok druge, kao što je Umicore (Belgija), obično kombinuju piro- i hidro-, a zatim primenjuju i elektrometalurgiju.

Atmosferska destilacija je proces koji je predlog US zavoda za rudnike (the Bureau of Mines). Ovaj proces može biti vrlo efikasan, ali zahteva pažljivo upravljanje energijom i emisijama, posebno kada je u pitanju kadmijum koji je toksičan. Dobre strane ovog postupka su: visok stepen efikasnosti, korišćenje jako malo hemikalija i visok stepen reciklaže metala dok su glavni nedostaci: visoka potrošnja energije, pažljiva kontrola emisije zbog visoke toksičnosti

kadmijuma (potrebno imati odgovarajuće sisteme za filtraciju i kondenzaciju kadmijumovih gasova) kao i velika preciznost u kontrolisanju temperature (u cilju postizanja visokog stepena iskorišćenja kadmijuma) [21].

Vakuum destilacija je visoko efikasan proces za reciklažu Ni-Cd baterija, jer omogućava precizno izdvajanje kadmijuma i nikla uz manju potrošnju energije i niže temperature u poređenju sa tradicionalnim metodama destilacije. Glavni nedostaci ovog postupka su visoki troškovi opreme i velika potrošnja energije [13-14].

Direktna (karbotermalna) redukcija je veoma efikasan metod za reciklažu Ni-Cd baterija, jer omogućava ekstrakciju nikla i kadmijuma kroz relativno jednostavan i energetski povoljan process gde se dobija Ni-Fe legura. Literaturni podaci kažu da su ukupni troškovi (uključujući i negativnu elektrodu) 1600-2000 €/t a da se dobijanjem legure može ostvariti tek oko 700 €/t (i značajno manje od Cd; ukupno max. 1000 €/t) [13-14].

Postrojenja za reciklažu zasnovana samo na hidrometalurškim procesima su još uvek retka (npr. Recupel u Francuskoj) [22]. Osim toga, većina preglednih radova objavljenih 2010-ih godina istražuje hidrometalurške metode [23], koje imaju niže investicione troškove, manji ugljenični otisak i ekonomičnije [24-25]. Nakon prethodnog tretmana (mehaničko rasklapanje i sečenje na šrederu), za kiselo luženje Ni-Cd elemenata obično se koriste jake neorganske kiseline, odnosno H_2SO_4 , HCl , HNO_3 i carska voda. Preko 95% izluženja metala je moguće čak i jednostavnim luženjem sumpornom kiselinom pod optimalnim uslovima [25]. Međutim, može se poboljšati na oko 99% kada se kombinuje sa elektrohemijskim postupcima ili uz pomoć odgovarajućeg oksidacionog sredstva (H_2O_2 , Fe^{3+} ili slično) [26]. Bioluženje je još uvek u fazi razvoja, a upotreba organskih kiselina ili glicina je bila obećavajuća, ali nije bila tako efikasna kao neorganska kiselina. Nedavna istraživanja luženja mravljom kiselinom (HCOOH) uz dodatak H_2O_2 pokazala su izluženja od 98,5% do 100% [17]. U ovom radu prikazan je pregled istraživanja o luženju otpada Ni-Cd akumulatora sumpornom kiselinom (H_2SO_4) u poslednje dve decenije kao i rezultati karakterizacije Ni-Cd akumulatora.

3. LUŽENJE SUMPORNOM KISELOM – PREGLED LITERATURE

Dosadašnja istraživanja su pokazala da je sumporna kiselina optimalno sredstvo za luženje Ni-Cd akumulatora [27-28]. Iako bi, prema nekim istraživanjima, HNO_3 [27,30] i HCl [27,31] mogle da dobiju slične, pa čak i nešto bolje rezultate kada je stepen izluženja u pitanju, obe ove kiseline nisu prikladne za luženje na višim temperaturama (preko 50°C) jer izazivaju isparenja koja stvaraju potrebu za dodatnim prečišćavanjem gasova, što povećava troškove i pogoršava uslove rada.

Brzina mešanja, vreme, odnos čvrsto:tečno (Č:T), temperatura i koncentracija H_2SO_4 imaju veliki uticaj na stepen izluženja nikla, kadmijuma i kobalta i njihov uticaj je dosta istraživani. Zbog svojih toksičnih svojstava, reciklaža Cd je najviše proučavana.

Brzina mešanja nije detaljno istražena, iako je izvesno da "ima pozitivan uticaj na luženje" [26]. U istraživanjima je najčešće korišćena magnetna mešalica sa brzinama od 200 do 300 o/min kao i mehanička mešalica sa 500 o/min [25]. Detaljna studija Ni-Cd reciklaže je pokazala da je radno kolo sa četiri lopatice sa 200, 500 i 1000 obrtaja u minuti dalo slične rezultate, potvrđujući pozitivan ali manje značajan uticaj brzine mešanja na stepen izluženja [31].

Vreme luženja takođe nije detaljno istraživano osim u kinetičkim studijama, pa čak i tada, sa različitim i nekonkretnim rezultatima. Istraživanja su pokazala da je optimalno vreme luženja između 3 i 5 h, sa stepenom izluženja Cd (i Co kada se proučava) preko 98% i Ni više od 95% [24-25]. Međutim, Ni sa anodne ploče (Cd) obično je imao stepen izluženja od samo 80% [20], ali se ovo smatra manjim problemom zbog niskog sadržaja. $Ni(OH)_2$ i Cd zahtevaju kraće vreme za skoro potpuno izluženje, 30 do 70 minuta [17, 31]. Detaljna ispitivanja vremenske zavisnosti otkrivaju da bi 3 h moglo biti optimalno vreme luženja [27, 31]. Međutim, maksimizacija izluženja zahteva do 4-5 h, što je zaključak većine istraživanja [28-29, 32]. Ovo važi posebno za Ni, dok je za Cd optimalno vreme 1 h za $pH < 2$ [34].

Temperatura luženja predstavlja drugi najvažniji faktor uticaja na stepen izluženja. Ovaj parametar je snažno povezan sa koncentracijom kiseline tako da se mogu posmatrati i analizirati zajedno. Istraživanja [32] su pokazala porast stepen izluženja Ni sa 50% na 95% (skoro duplo) dok su druge studije [34] pokazale skoro tri puta veći stepen izluženja pri porastu temperature sa $50^\circ C$ i $95^\circ C$. U svakom objavljenom istraživanju potvrđeni su znatno bolji rezultati izluženja pri višim temperaturama sa istom koncentracijom kiseline. Dvostruko veća koncentracija kiseline (5M naspram 2-3M) na $70^\circ C$ pokazala je nešto lošije rezultate ($\sim 90\%$ naspram $\sim 95\%$) [27, 32]. Optimalno utvrđen odnos Č:T najčešće je bio 20:1 [31] uz odstupanje od 17:1 [32] do 25:1 [27]. Druga istraživanja su utvrdila odnos Č:T od 10:1 kao optimalan [32].

Predtretman, granulometrijski sastav luženih delova kao i njihov fazni sastav su uvek pominjani kao bitan faktor, ali retko su detaljno analizirani. Predtretman uključuje rastavljanje, drobljenje, mlevenje i na kraju ispiranje. Rezač se uglavnom koristi sa prethodnim ručnim rastavljanjem zbog odvajanja elektrolita. Karakterizacija usitnjenih metalnih delova bila je tema nekoliko radova. Međutim, generalno se samo karakteriše hemijskim sastavom i slikom mlevenih delova ili procenjenom prosečnom veličinom istih, a ne granulometrijskom analizom, što je veoma važno za dalju obradu materijala elektrode. Nekoliko radova pokazuje da se veličina čestica kreće od nekoliko

desetina μm do nekoliko mm, na primer, $40\ \mu\text{m}$ -2,0 mm [32]. Zanimljivo je da je jedna studija pokazala rezultat koji se nije slagao sa opštom teorijom da povećanje specifične površine daje bolje rastvaranje [30]. Fazni sastav je još jedna stvar koja se često daje kvalitativno (XRD), ali nije uvek odvojena u hemijskoj analizi. Dakle, hidroksidi i oksidi metala (Ni, Cd) su prisutni i mogu biti u velikom sadržaju. Iako bi trebalo da bude slično za sav Ni-Cd, sastav može da varira u velikoj meri i da bude značajan faktor koji snažno utiče na kinetiku luženja sumpornom kiselinom. Zbog toga je važno konstatovati da su za luženje NiOOH i posebno Ni(OH)₂ potrebne niže koncentracije kiselina i sobna temperatura. Cela faza može se rastvoriti na sobnoj temperaturi i sa samo 0,1M H₂SO₄. Istovremeno, to je dovoljno čak i za metalne faze Co i Cd (izluženje preko 90%) [32].

4. KARAKTERIZACIJA NI-CD AKUMULATORA

Ni-Cd akumulator (slika 1), je ručno rasklopljen u cilju izdvajanja Ni i Cd elektroda kao i elektrolita (KOH). Karakterizacija Ni i Cd elektroda je urađena primenom sledećih metoda: Atomskom emisionom spektroskopijom sa induktivno spregnutom plazmom (ICP-OES), proizvođač: Spectro (Nemačka), model: Ciro Vision i skenirajućom elektronskom mikroskopijom na mikroskopu JEOL (Japan), model: JSM T330 sa EDS XMax (Aztec Oxford Instruments, Ujedinjeno Kraljevstvo). Hemijski sastav Ni i Cd elektroda određen ICP OES metodom prikazan je u tabeli 1.

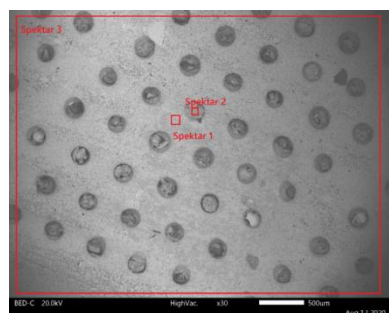


Sl. 1. Ni Cd akumulator

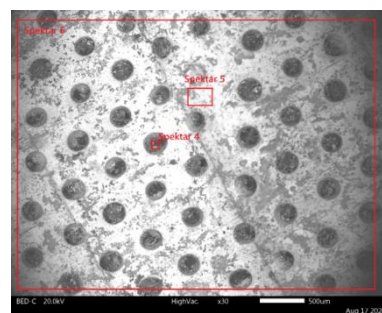
Tabela 1. Hemijski sastav Ni i Cd elektroda (ICP-OES)

Element	(%)
Ni elektroda	
Ni	53,65
Cd elektroda	
Cd	12,23

Na slikama 2-3 prikazane su SEM EDS slike sa označenim mestima na kojima je rađena EDS analiza: površina elektroda (slika 2) i poprečnih preseka (slika 3) koja je prikazana u tabeli 2.

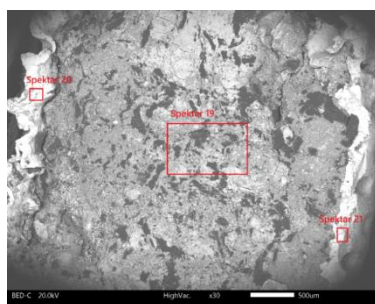


Ni elektroda

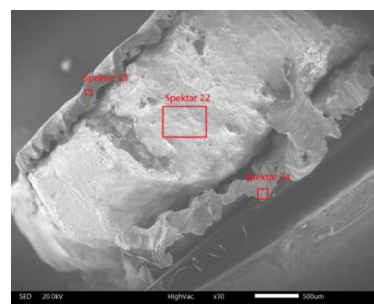


Cd elektroda

Sl. 2. SEM slike površina elektroda



Ni elektroda



Cd elektroda

Sl. 3. SEM slike poprečnog preseka elektroda

Tabela 2. Hemijski sastav Ni-Cd elektroda (EDS analiza)

Spektar	O	Al	Si	S	K	Fe	Ni	Cd	Σ
Ni elektroda (površina)									
Spektar 1	8,89	0,57	0,65		1,64	16,43	70,10	1,72	100,00
Spektar 2					13,33	26,91	48,51	11,25	100,00
Spektar 3	13,30	0,53	0,84		5,02	22,65	54,87	2,79	100,00
Cd elektroda (površina)									
Spektar 4					13,33	26,61	48,81	11,25	100,00
Spektar 5	12,72	0,47	0,61		2,02	73,75	2,57	7,86	100,00
Spektar 6	10,09	0,31	0,32		1,23	69,99	5,42	12,64	100,00
Ni elektroda (presek)									
Spektar 19						43,36	56,64		100,00
Spektar 20	10,07				1,72	66,61	20,85	0,75	100,00
Spektar 21	8,09	0,34	0,28	0,16	0,92	69,69	20,52		100,00
Cd elektroda (presek)									
Spektar 22	14,19	0,56	0,63			33,47	1,69	49,46	100,00
Spektar 24	6,07	0,30	0,42			80,00	6,54	6,67	100,00
Spektar 25	5,12	1,39	1,37		3,52	74,64	8,52	5,44	100,00

ICP OES metoda je pokazala da Ni elektroda sadrži 53,65% Ni a kadmijumska 12,23% Cd. EDS analiza je pokazala da se hemijski sastav značajno razlikuje od mesta analize. Spektar 3 (Ni elektroda – površina) je pokazao sadržaj Ni od 54,87% a spektar 6 (Cd elektroda – površina) je pokazao 12,64% Cd. Oba ova spektra su pokazala značajno slaganje sa rezultatima ICP OES metode. Rezultati istraživanja u ovom radu poslužiće kao osnova za dalja istraživanja hidrometalurškog postupka reciklaže Ni-Cd akumulatora.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je kratak pregled literature vezano za Ni-Cd akumulatora kao i rezultati sopstvenih istraživanja karakterizacije Ni i Cd elektroda primenom ICP OES i SEM EDS metoda.

Istraživanja drugih autora su pokazala da su optimalni uslovi luženja: vreme od 4-5 h, temperatura od 80 °C, min. odnos Č:T od 1:15 i koncentracija sumporne kiseline od 2,5M. Rezultati ICP OES metode su pokazali da Ni elektroda sadrži 53,65% Ni a kadmijumska 12,23% Cd. Rezultati EDS analize su pokazali sadržaj: nikla u Ni elektrodi u granicama 48,51-70,10% (površina elektrode) i 20,52-56,64% (poprečni presek); kadmijuma u Cd elektrodi u granicama 7,86-12,64% (površina elektrode) i 5,44-49,46% (poprečni presek).

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, kroz Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2025. godini sa Institutom za rudarstvo i metalurgiju Bor, broj: 451-03-136/2025-03/200052 i Inovacionog centra Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu, broj: 451-03-136/2025-03/200287.

LITERATURA

- [1] P. Breeze, Power System Energy Storage Technologies, Chapter 10, Power Generation Technologies (Third Edition), Newnes, (2019) 219-249.
- [2] C. Jeyaseelan, A. Jain, P. Khurana, D. Kumar, S. Thatai, Ni-Cd Batteries, Wiley Online Library, (2020) 125-135.
- [3] P. Kurzweil, Journal of Power Sources, 195(14) (2010) 4424-4434.
- [4] K. Rudisuela, The Role of Nickel in Batteries. In: Anderson, C., et al. Ni-Co 2021: The 5th International Symposium on Nickel and Cobalt. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, (2021).

- [5] T. Pang, The New Edison Storage Battery, IEEE YE-23, (2023).
- [6] I.R. Boddula, P. Ramyakrishna, M.A. Abdullah, Rechargeable Batteries: History, Progress, and Applications, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA, 2020.
- [7] S.-L. Lin, K.-L. Huang, I.-C. Wang, I.-C. Chou, Y.-M. Kuo, C.-H. Hung, C. Lin, J. Journal of the Air & Waste Management Association, 66(3) (2016) 296-306.
- [8] X. Zheng, Z. Zhu, X. Lin, Y. Zhang, Y. He, H. Cao, Z. Sun, Engineering, 4(3) (2018) 361-370.
- [9] M. Guarnieri, Secondary Batteries for Mobile Applications: From Lead to Lithium [Historical], in IEEE Industrial Electronics Magazine, 16(4) (2022) 60-68.
- [10] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/txt/html/?uri=celex:32023r1542>, 31 Jul 2024.
- [11] T. Vukićević, Toksični efekti kadmijuma, Acta medica Medianae, 51(4) (2012) 65-70.
- [12] A. Babakhani, F. Rashchi, A. Zakeri, E. Vahidi, Journal of Power Sources, 247 (2014) 127-133.
- [13] K. Huang, J. Li, Z. Xu, Environmental Science Technology, 43(23) (2009) 8974-8978.
- [14] Y.-Y. Hung, L.-T. Yin, J.-W. Wang, C.-T. Wang, C.-H. Tsai, Y.-M. Kuo, Environmental Progress and Sustainable Energy, 37(2) (2018) 645-654.
- [15] M.B.J.G. Freitas, T.R. Penha, S. Sirtoli, Journal of Power Sources, 163(2) (2007) 1114-1119.
- [16] R. Mayén-Mondragón, J.G. Ibanez, R.C. Vasquez, A. Baeza, M.T. Oropeza, Water Air Soil Pollutants, 194(1-4) (2008) 45-55.
- [17] E. Rudnik, M. Nikiel, Hydrometallurgical recovery of cadmium and nickel from spent Ni-Cd batteries, Hydrometallurgy, 89(1-2) (2007) 61-71.
- [18] A. Fernandes, J.C. Afonso, A.J. Bourdot Dutra, Journal of Power Sources, (2012) 220 286-291.
- [19] J.S. Ribeiro, T.F.M. Moreira, I.L. Santana, S.A.D. Ferreira, M.F.F. Lelis, M.B.J.G. Freitas, Materials Chemistry and Physics, 205 (2018) 186-194.
- [20] J. David, Journal of Power Sources, 57 (1-2) (1995) 71-73.
- [21] D.C.R. Espinosa, J.A.S. Tenório, Journal of Power Sources, 135 (2004) 320-326.
- [22] F. Larouche, F. Tedjar, K. Amouzegar, G. Houlachi, P. Bouchard, G.P. Demopoulos, K. Zaghib, Materials, 13 (2020) 801.

-
- [23] M. Assefi, S. Maroufi, Y. Yamauchi, V. Sahajwalla, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 24 (2020) 26-31.
 - [24] E. Asadi Dalini, G. Karimi, S. Zandevakili, M.A. Goodarzi, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 42 (7) (2020) 451-472.
 - [25] E. Blumbergs, V. Serga, E. Platacis, M. Maiorov, A. Shishkin, *Metals*, 11(11) (2021) 1714.
 - [26] M. Rana, M. I. H. Khan, T. Nshizirungu, Y.-T. Jo, J.-H. Park, *Chemical Engineering Journal*, Volume 455, 2023, 140626.
 - [27] A. Saleh, M. Muhammed; B., Hani M.; and Baghaffar, G. Ahmed, *Hadhramout University Journal of Natural & Applied Sciences*, 16(2) (2019) 193-206.
 - [28] N. S. Randhawa, K. Gharami, M. Kumar, *Hydrometallurgy*, 165(1) (2016) 191-198.
 - [29] M.M. Saleh, S.F. Bamsaoud, H.M. Barfed, *Journal of Physics: Conference Series*, 1900(1) (2021) 012018.
 - [30] C.-C. Yang, *Journal of Power Sources*, 115(2) (2003) 352-359.
 - [31] C.A. Nogueira, F. Margarido, *Environmental Technology*, 33(3) (2012) 359-366.
 - [32] C.A. Nogueiraa, F. Margarido, *Hydrometallurgy* 72(1-2) (2004) 111-118.

UDK: 631.11:628.516(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2501033N

NAUČNI RAD

Oblast: Inženjerstvo zaštite životne sredine

Primljen: 05.02.2025.

Prerađen: 10.03.2025.

Prihvaćen: 14.03.2025.

PROCENA ZAGAĐENJA I RIZIKA OD ZAGAĐENJA ZEMLJIŠTA U BORU PRIMENOM RAZLIČITIH INDEKSA

ASSESSMENT OF POLLUTION AND RISK OF SOIL POLLUTION IN BOR USING DIFFERENT INDICES

Violeta Nikolić^{1a}, Novica Staletović^{1b},
Vladanka Presburger-Ulniković^{1c}, Ivan Jovanović²

¹ Fakultet za ekologiju i zaštitu životne sredine,
Univerzitet "Union-Nikola Tesla", Beograd, Srbija

² Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Alberta Ajnštajna 1, 19201 Bor, Srbija

1a E-mail: violetanikolic22@unionnikolatesla.edu.rs, Orcid: <http://orcid.org/0000-0003-0933-3197>

1b E-mail: nstaletovic@unionnikolatesla.edu.rs, Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-8450-5564>

1c E-mail: vladanka.gsc@unionnikolatesla.edu.rs, Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-6144-3399>

2 E-mail: ivan.jovanovic@irmbor.co.rs, Orcid: <http://orcid.org/0009-0000-5174-3734>

Izvod

U radu je analiziran sadržaj zagađujućih i štetnih elemenata u zemljištu u Boru tokom 2022. godine. Koncentracije Cu, Ni, Cr, Pb i As u zemljištu su određene na 15 lokacija u blizini rudnika bakra i topionice u Boru. Zagađenje zemljišta na pojedinačnim lokacijama procenjeno je na osnovu izmerene koncentracije elemenata i određenih faktora i indeksa zagađenja (faktora kontaminacije (C_f), stepena kontaminacije (C_d), modifikovanog stepena kontaminacije (mCd), geo-akumulacionog indeksa (I_{geo}), indeksa opterećenja zagađenjem (PLI), Nemerovog indeksa zagađenja (PI_N), individualnog i ukupnog indeksa potencijalnog rizika po zagađenje životne sredine). Pirsonovi korelacioni koeficijenti ukazali su na jaku korelaciju između Cu i Pb (0,887), Cu i As (0,953), Pb i As (0,960) i Cr i Ni (0,889). Rezultati su pokazali da je na ispitivanom području neravnomerna distribucija zagađujućih i štetnih elemenata. Povišen sadržaj navedenih elemenata, utvrđen je najvećim delom za Cu, što je i očekivano, a samo na jednoj lokaciji i za Pb i As. Na osnovu dobijenih indeksa i faktora, ukupni kvalitet zemljišta na odabranim lokacijama je promenljiv. Utvrđeno je da lokaliteti variraju od nezagađenog do jako zagađenog zemljišta na lokaciji Park – stari centar Bora, koja je imala najveći rizik od zagađenja.

Ključne reči: zemljište, zagađenje, indeksi zagađenja

Abstract

The paper analyzed the content of pollutants and harmful elements in the soil in Bor during the year 2022. The concentrations of Cu, Ni, Cr, Pb and As in the soil were determined at 15 locations near the Bor Mining and Smelting Complex. Soil pollution at individual locations was assessed based on the measured concentration of elements and certain factors and pollution indices (contamination factor (C_f), degree of contamination (C_d), modified degree of contamination (mCd), geo-accumulation index (I_{geo}), pollution load index (PLI), Nemerow Pollution Index (PI_N), individual and total index of potential risk of environmental pollution). Pearson's correlation coefficients indicated a

strong correlation between Cu and Pb (0.887), Cu and As (0.953), Pb and As (0.960) and Cr and Ni (0.889). The results showed that there is an uneven distribution of pollutants and harmful elements in the investigated area. Elevated content of the mentioned elements was determined mostly for Cu, which is expected, and only at one location for Pb and As. Based on the obtained indices and factors, the overall quality of the soil in the selected locations is variable. It was found that the sites varied from uncontaminated to heavily polluted at the Park location - the old center of Bor, which had the highest risk of pollution.

Keywords: soil, pollution, pollution indices

1. UVOD

U svetu se velika pažnja posvećuje problemu zagađenja zemljišta različitim polutantima, naročito teškim metalima, koji dovode do narušavanja prirodne ravnoteže sistema životne sredine. Briga za životnu sredinu i zdravlje ljudi, nameće potrebu za stalnim praćenjem i merenjem kvaliteta zemljišta. U značajne antropogene izvore zagađenja zemljišta, pored industrijskih procesa, sagorevanja fosilnih goriva, izduvnih gasova motornih vozila, spadaju svakako i rudnici i topionice. U područjima gde je zastupljena intenzivna eksploatacija i prerada ruda, kao što je to slučaj sa opštinom Bor, naročito je važno proučavanje i praćenje kvaliteta zemljišta. Veoma je bitno da se utvrdi prostorna raspodela koncentracije zagađujućih i štetnih elemenata i stepen zagađenja zemljišta. U Srbiji postoji Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih, štetnih i opasnih materija u zemljištu [1] koja propisuje granične vrednosti i vrednosti koje ukazuju da su osnovne funkcije zemljišta ugrožene te zahtevaju remedijacione mere. Međutim, procena stanja zagađenja zemljišta različitim zagađujućim i štetnim elementima zasnovana samo na poređenju ukupnog sadržaja elemenata sa MDK ili literaturnim vrednostima za druga područja nije pouzdana metoda, jer ne daje holističke informacije o nivou zagađenja. Stoga su mnogi istraživači koristili faktore i indekse zagađenja u proučavanju zagađenja zemljišta [2,3,4].

Cilj istraživanja u ovom radu bio je da se na osnovu izmerenih koncentracija zagađujućih i štetnih elemenata (Cu, Ni, Pb, As, Cr) na području opštine Bor odredi kvalitet zemljišta primenom različitih parametara i indeksa rizika od zagađenja i ukoliko je potrebno, daju preporuke za izvođenje remedijacionih mera na pojedinačnim lokacijama.

2. MATERIJALI I METODE

ZiJin Copper doo Bor (ranije Rudarsko-topioničarski basen Bor, RTB Bor) predstavlja jedan od najvažnijih centara rudarstva bakra i metalurgije u istočnoj Evropi. Rudnik bakra se nalazi na severoistočnom obodu grada Bora, tako da površinski kop, metalurška topionica i flotacijsko jalovište čine granicu između urbane i industrijske zone [5].

Uzorkovanje zemljišta na ovom području je izvršeno tehnikom sondiranja na dubini od 30 cm na 15 mernih mesta, a GPS koordinate svake lokacije su date u Tabeli 1. Sadržaj prisustva zagađujućih elemenata određivan je ICP-OES tehnikom prema metodi EPA 6010C: 2000. Stanje/kvalitet zemljišta definiše se određenim referentnim faktorima, kao što su indeksi za procenu zagađenosti zemljišta. Za sveobuhvatnu procenu stanja zemljišta i rizika po životnu sredinu od zagađujućih i štetnih elemenata izvršena je deskriptivna statistička analiza i proračunati su sledeći parametri: faktor kontaminacije, stepen kontaminacije, indeks opterećenja zagađenjem, Nemerov indeks zagađenja, geo-akumulacioni indeks i indeksi individualnog i ukupnog rizika po životnu sredinu.

Tabela 1. GPS koordinate za sve lokacije na kojima je izvršeno uzorkovanje zemljišta

Oznaka lokacije	Naziv lokacije	N	E
L1	Park – stari centar Bora	44°04'34"	22°06'00"
L2	Brezonik (igralište)	44°05'53"	22°05'26"
L3	Krivelj	44°07'01"	22°06'12"
L4	Oštrelj 1 (blizu jalovšta)	44°04'15"	22°09'15"
L5	Oštrelj 2 (centar)	44°02'25"	22°09'47"
L6	Slatina 1 (centar park)	44°03'30"	22°06'47"
L7	Slatinsko naselje 2 (mesna zajednica)	44°00'42"	22°09'37"
L8	Slatina 3 (raskrsnica)	44°00'27"	22°09'12"
L9	Slatina 4 (put za aerodrom)	44°00'36"	22°08'51"
L10	Brestovac 1 (aerodrom)	43°59'58"	22°08'32"
L11	Metovnica 1	43°59'46"	22°07'34"
L12	Metovnica 2	43°59'40"	22°07'36"
L13	Metovnica 3	44°02'13"	22°05'35"
L14	Brestovac 2 (park)	44°04'09"	22°03'18"
L15	Šarbanovac (centar)	43°57'41"	22°04'30"

2.1. Obrada podataka i statistička analiza

2.1.1. Deskriptivna statistička analiza

Sadržaj ispitivanih zagađujućih i štetnih elemenata analiziran je deskriptivnom statističkom analizom. Pirsonov koeficijent korelacije je korišćen da bi se razumeli međusobni odnosi između parova elemenata i njihovo poreklo. Statistička analiza i proračuni indeksa urađeni su korišćenjem softverskog paketa Microsoft Excel 16, kao i grafički prikaz rezultata.

2.1.2. Indeksi zagađenja i rizika po životnu sredinu

Faktor kontaminacije

Faktor kontaminacije (Cfi), prema Hakansonu [6], je individualni indeks za procenu zagađenja elementom i i predstavlja odnos koncentracije elementa i na ispitivanoj lokaciji C_i i referentne prirodne koncentracije zagađujućeg i štetnog elementa u zemljištu bez antropogenog uticaja, tzv. pozadinske Cib (*background value*), prema formuli:

$$Cfi = C_i/Cib \quad (1)$$

Određivanje pozadinskih vrednosti ili nultog stanja kvaliteta zemljišta je neophodna mera prilikom procene zagađenosti zemljišta, s obzirom da geološki supstrat u svom sastavu već ima određenu količinu elementa koji ispitujemo. Vrednosti $Cfi < 1$ predstavljaju nizak faktor kontaminacije, vrednosti $1 \leq Cfi < 3$ umeren, a vrednosti $3 \leq Cfi < 6$ značajan, dok vrednosti $Cfi \geq 6$ predstavljaju visok kontaminacioni faktor [7].

Stepen kontaminacije

Stepen kontaminacije (Cd) koji predstavlja zbir faktora kontaminacije Cfi za sve ispitivane elemente i ima za cilj da kvantifikuje nivo ukupne kontaminacije na uzorkovanim lokacijama [8]. Definiše se kao suma svih faktora kontaminacije i računa prema formuli:

$$Cd = \sum Cfi \quad (2)$$

Mala kontaminacija je pri $Cd < n$ (gde je n ukupan broj ispitivanih zagađujućih elemenata), umerena kontaminacija za $n < Cd < 2n$, značajna kontaminacija za $2n < Cd < 4n$, dok $Cd > 4n$ predstavlja veoma visoku kontaminaciju zemljišta.

Modifikovani stepen kontaminacije zemljišta

Prema nekim autorima [9] modifikovani stepen kontaminacije zemljišta mCd se definiše kao suma svih kontaminacionih faktora podeljena brojem analiziranih elemenata n , prema formuli:

$$mCd = \sum Cfi/n \quad (3)$$

Vrednosti $mCd < 1,5$ ukazuju da nema kontaminacije ili da je nivo kontaminacije zemljišta nizak, vrednosti $1,5 \leq mCd \leq 2$ ukazuju na nisku kontaminaciju zemljišta, vrednosti $2 \leq mCd \leq 4$ na povećanu kontaminaciju zemljišta, vrednosti $4 \leq mCd \leq 8$ na značajnu kontaminaciju zemljišta, vrednosti $8 \leq mCd \leq 16$ veoma visoku kontaminaciju zemljišta, vrednosti $16 \leq mCd \leq 32$ na ekstremno visoku kontaminaciju zemljišta, a $mCd \geq 32$ na ultra visoku kontaminaciju zemljišta [7].

Indeks opterećenja zagađenjem zemljišta

Indeks opterećenja zagađenjem (PLI) se koristi za procenu kvaliteta životne sredine na ispitivanim lokacijama. Indeks opterećenja zagađenjem zemljišta određuje se kao n -ti koren proizvoda n faktora kontaminacije Cfi , prema formuli, koju je razvio Tomlinson [10]:

$$PLI = (Cf_1 \times Cf_2 \times Cf_3 \times \dots \times Cfn)^{1/n} \quad (4)$$

Cfi je faktor kontaminacije svakog elementa, n je ukupan broj elemenata zagađenja uključenih u analizu. Tomlinson je klasifikovao PLI u tri stepena da bi opisao nivo pogoršanja kvaliteta zemljišta. PLI je kategorisan kao: nizak, odnosno bez zagađenja za $PLI < 1$, pri $PLI = 1$ prisutan je osnovni nivo zagađenja, a visok za $PLI > 1$ [7]. Indeks opterećenja zagađenjem (PLI) koristan je u istraživanju rizika od ukupnog zagađenja zemljišta kombinovanjem uticaja svih ispitivanih elemenata zagađenja.

Nemerov indeks zagađenja zemljišta

Za procenu stanja kvaliteta zemljišta koristi se i Nemerov indeks zagađenja zemljišta (PI_N), koji odražava kompozitni indeks zagađenja uslovljen višestrukim zagađujućim elementima u zemljištu [7,11] i sličan je modifikovanom stepenu kontaminacije, jer koristi prosečnu vrednost faktora kontaminacije pojedinačnih zagađujućih elemenata. Ali takođe razmatra i uticaj kontaminacije elementom, koristeći maksimalni faktor kontaminacije. PI_N se izračunava prema jednačini:

$$PI_N = ((1/n(\sum Cfi))^2 + Cfi_{\max}^2/n)^{1/2} \quad (5)$$

Za vrednosti $PI_N < 0,7$ imamo izuzetno mali indeks zagađenja zemljišta, za $0,7 \leq PI_N < 1$ mali indeks zagađenja, za $1 \leq PI_N < 2$ umeren indeks zagađenja, za $2 \leq PI_N < 3$ visok indeks zagađenja, dok je za $PI_N > 3$ ekstremni indeks zagađenja [7].

Geo-akumulacioni indeks zagađenja zemljišta

Miller [12] je predložio indeks geoakumulacije (I_{geo}) za procenu intenziteta antropogenog zagađenja na površini zemljišta koji se izračunava prema formuli:

$$I_{geo} = \log_2(C_i/1.5 \cdot C_{ib}) \quad (6)$$

gde je C_i sadržaj elementa i , a C_{ib} je geohemijska pozadinska vrednost elementa i . Faktor korekcije 1,5 osnove matriksa koristi se za eliminisanje i ispravljanje mogućih razlika zbog uticaja litosfere. I_{geo} je korišćen da se odredi stepen kontaminacije zemljišta određenim elementom. Loska i saradnici [7,13] dali su sledeće tumačenje za I_{geo} : $I_{geo} < 0$ praktično nezagađeno zemljište,

$0 < I_{geo} < 1$ izuzetno mali indeks zagađenja zemljišta, $1 < I_{geo} \leq 2$ mali indeks zagađenja zemljišta, $2 < I_{geo} \leq 3$ umereni indeks zagađenja zemljišta $3 < I_{geo} \leq 4$ visok indeks zagađenja zemljišta $4 < I_{geo} \leq 5$ vrlo visok indeks zagađenja zemljišta i $I_{geo} > 5$ ekstremni indeks zagađenja zemljišta.

Indeks individualnog rizika po zagađenje zemljišta

Indeks individualnog rizika po zagađenje zemljišta (Eri) kvantitativno izražava potencijalni rizik po zagađenje zemljišta datim elementom i . Individualni rizik po zagađenje zemljišta zavisi od sadržaja pojedinačnog zagađujućeg elementa i i njegovog prirodnog fona [4,6,14]. Razvijen je da integriše osetljivost zemljišta i stepen toksičnosti elemenata sa njihovim koncentracijama [7]. Eri indeks se može kvantitativno odrediti sledećom formulom:

$$Eri = Ti * Ci/Cib, \quad \text{odnosno } Eri = Ti * Cfi \quad (7)$$

gde Ti predstavlja faktor toksičnosti zagađujućeg elementa i (i iznosi za Cu – 5, Ni – 5, Cr – 2, Pb – 5, As – 10). Granične vrednosti za tumačenje individualnog rizika po zagađenje zemljišta su: za vrednosti $Eri < 30$ nizak rizik po zagađenje zemljišta, za $30 \leq Eri < 60$ povećan rizik po zagađenje zemljišta, za $60 \leq Eri < 120$ visok rizik po zagađenje zemljišta, za $120 \leq Eri < 240$ vrlo visok rizik po zagađenje zemljišta i za $Eri \geq 240$, ekstremni rizik po zagađenje zemljišta.

Indeks ukupnog rizika po zagađenje zemljišta

Indeks ukupnog potencijalnog rizika po zagađenje zemljišta RI , uslovljen kombinovanim uticajem individualnih zagađujućih elemenata, dobija se sumiranjem indeksa individualnih rizika po zagađenje zemljišta pojedinih zagađujućih i štetnih elemenata Eri i računa se prema formuli [4,6,7,14]:

$$RI = \sum Eri \quad (8)$$

Korišćene granične vrednosti za indeks ukupnog rizika po zagađenje zemljišta su: za vrednosti $RI < 150$ nizak rizik zagađenja zemljišta, za $150 \leq RI < 300$ povećan rizik zagađenja zemljišta, za $300 \leq RI < 600$ visok rizik zagađenja zemljišta i za $RI \geq 600$ ekstremni rizik zagađenja zemljišta.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Ukupne koncentracije ispitivanih zagađujućih i štetnih elemenata u zemljištu na datim lokacijama, statistička deskriptivna analiza navedenih podataka, kao i pozadinske vrednosti datih zagađujućih elemenata za zemljišta Evrope i Srbije, granične i remedijacione vrednosti prema važećoj nacionalnoj Uredbi o graničnim vrednostima zagađujućih, štetnih i opasnih materija u zemljištu [1] date su u Tabeli 2. Može se zaključiti da je sadržaj bakra u

zemljištu iznad graničnih vrednosti propisanih navedenom Uredbom na svim lokacijama (označeno podebljanom crnom bojom), dok vrednosti na lokacijama L1, L2, L5, L6 i L7 (označene crvenom bojom) prelaze i remedijacione vrednosti propisane navedenom nacionalnom Uredbom o graničnim vrednostima zagađujućih, štetnih i opasnih materija u zemljištu.

Tabela 2. Ukupan sadržaj ispitivanih zagađujućih i štetnih elemenata u zemljištu (u mg/kg)

Oznaka lokacije	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)
L1	1183	16,8	15,2	128	86,1
L2	430	3,75	6,3	8,69	12,8
L3	130	5,07	6,58	12,4	8,22
L4	152	19,3	14,7	17,6	12,9
L5	216	16,5	20,0	21,7	22,3
L6	358	16,1	13,7	25,6	27,2
L7	388	12,4	13,1	20,0	24,9
L8	99,7	20,5	21,7	22,5	11,7
L9	97,0	19,30	19,3	25,2	12,8
L10	83,8	21,9	21,6	26,1	13,4
L11	67,6	7,99	6,42	15,9	5,56
L12	45,5	9,92	14	12,3	10,2
L13	97,3	11,0	10,4	15,9	9,55
L14	187	8,93	11,0	20,1	19,4
L15	79,60	19,4	14,4	13,4	5,43
MEAN	240,9	13,9	13,9	25,7	18,8
MIN	45,5	3,75	6,3	8,69	5,43
MAX	1183	21,9	21,7	128	86,1
MEDIAN	130,0	16,1	14,0	20,0	12,8
STDEV	288,1	5,87	5,19	28,8	19,8
CV*100%	119,5	42,2	38,7	112	105
Vrednost geohemijskog praga za evropska zemljišta [15]	69	105	92	58	36
Pozadinska vrednost za zemljišta centralne Srbije [15]	38,37	84,72	72,28	69,34	14,69
Granična vrednost (GV)	36	35	100	85	29
Remedijaciona vrednost (RV)	190	210	380	530	55

Visok sadržaj Cu na svim lokacijama ne čudi, jer dominira geohemijski izvor bakra, odnosno ovu oblast čine piritna ležišta bakra [5]. Međutim, izuzetno visoke koncentracije Cu na pojedinačnim lokacijama (prevashodno Lokacija 1) verovatno su posledica antropogenog (industrijskog) zagađenja. Koncentracije nikla i hroma ne prelaze granične vrednosti ni na jednoj lokaciji,

a vrednosti olova i arsena prelaze granične vrednosti samo na lokaciji L1, dok su na preostalim lokacijama ispod graničnih vrednosti. Posmatrano po lokacijama, može se uočiti da je samo lokacija L1 istovremeno opterećena povišenim sadržajem više elemenata (bakra, olova i arsena).

Vrednosti nekih zagađujućih i štetnih elemenata su jako dispergovane na šta ukazuje visoka vrednost koeficijenta varijacije CV (CV% vrednosti za Cu, Pb i As veće su od 100%). Poređenje srednje vrednosti i medijane za navedene zagađujuće i štetne elemente u zemljištu pokazalo je da je srednja vrednost veća od medijane naročito za Cu, a u manjoj meri i za Pb i As. To potvrđuje da su ovi zagađujući i štetni elementi u zemljištu imali visoke koncentracije na pojedinim lokacijama (pre svega već spomenuta lokacija L1). Velika disperznost ukazuje na veliku heterogenost područja. Nasuprot tome, srednja vrednost i medijana koncentracije za Cr, a pogotovo za Ni su veoma slične.

U ovom radu kao pozadinske vrednosti preuzete su pozadinske vrednosti za zemljišta na području centralne Srbije [15], dobijene računskom metodom [Median+2MAD], koja predstavlja stroži kriterijum za određivanje stepena zagađenosti potencijalnim polutantima. Osim toga, prikazane pozadinske vrednosti za zemljišta Evrope (koje su date samo radi poređenja) takođe su dobijene ovom metodom.

Tabela 3. *Pirsonove korelacije*

Metal	Cu	Ni	Cr	Pb	As
Cu	1,00				
Ni	-0,003	1,00			
Cr	-0,048	0,889	1,00		
Pb	0,887	0,262	0,203	1,00	
As	0,953	0,170	0,149	0,960	1,00

U cilju utvrđivanja međuelementnih odnosa u zemljištu, izračunati su Pirsonovi koeficijenti i prikazani u Tabeli 3. Parovi Cu - Pb ($r = 0,887$), Cu - As ($r = 0,953$), Ni - Cr ($r = 0,889$), As - Pb ($r = 0,960$) pokazuju visoke korelacije. Značajna pozitivna korelacija između ovih zagađujućih i štetnih elemenata, ukazuje da verovatno potiču iz istog materijala ili su istog porekla, odnosno da mogu imati isti put migracije ili isti izvor zagađenja. Istovremeno, postoji slaba korelaciona povezanost između ostalih parova zagađujućih i štetnih elemenata. Pirsonovi koeficijenti korelacije su pokazali povezanost sa antropogenim (industrijskim) inputima iz proizvodnje bakra za Cu–Pb i Cu–As ili sa prirodnim poreklom elemenata za Ni–Cr, što su uočili i drugi autori [16], prilikom ispitivanja sadržaja ovih zagađujućih i štetnih elemenata i u zemljištu i u biljkama.

Vrednosti faktora kontaminacije i geoakumulacionih indeksa pojedinačnih zagađujućih i štetnih elemenata (min, max i srednja vrednost) date su u Tabeli 4.

Tabela 4. Vrednosti faktora kontaminacije i geoakumulacionih indeksa zagađujućih i štetnih elemenata

Element	Cfi			Igeo		
	min	max	sr.vred.	min	max	sr.vred.
Cu	1,19	30,83	6,28	-0,34	4,36	1,47
Ni	0,04	0,26	0,16	-5,08	-2,54	-3,35
Cr	0,09	0,30	0,19	-4,11	-2,32	-3,07
Pb	0,13	1,85	0,37	-3,58	0,30	-2,38
As	0,37	5,86	1,28	-2,02	1,97	-0,63

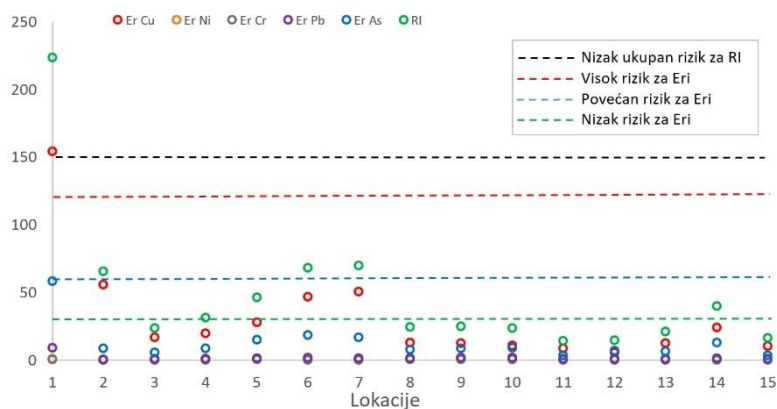
S obzirom da su samo srednje vrednosti faktora kontaminacije za bakar i arsen veće od 1, može se konstatovati kontaminacija ovim elementima. Pritom, srednja vrednost faktora kontaminacije za Cu veća od 6, ukazuje na značajnu kontaminaciju ovim elementom, dok vrednosti faktora kontaminacije za Pb i As samo na pojedinim lokacijama prelaze vrednost jedan, tako da je kontaminacija ovim elementima umerena. Vrednosti faktora kontaminacije za Ni i Cr na svim lokacijama su značajno ispod jedinice, što potvrđuje nisku kontaminaciju ovim elementima. Slično važi i za geoakumulacioni indeks koji ukazuje na umereno zagađenje pojedinačnih lokacija izazvano bakrom i arsenom. S druge strane, ne postoji zagađenje izazvano niklom, hromom i olovom. Dakle, prema vrednostima geoakumulacionog indeksa za Ni, Cr, Pb i As većina lokacija je nezagađena sa malim indeksom zagađenja zemljišta.

U Tabeli 5. prikazane su vrednosti proračunatih indeksa rizika za procenu kvaliteta zemljišta i vizuelno je označeno stanje kvaliteta zemljišta na pojedinačnim lokacijama. Na osnovu stepena zagađenja može se uočiti da je lokacija L1 ekstremno zagađena, dok su lokacije L2, L6 i L7 jako zagađene. Naravno, treba imati u vidu uticaj geološkog faktora. Isti trend pokazuje i modifikovani stepen zagađenja, samo što je stepen kontaminacije za klasu niži, odnosno lokacija L1 je značajno, a lokacije L2, L6 i L7 umereno zagađene. Indeks opterećenja zagađenjem PLI, kojim se procenjuje kvalitet životne sredine, ukazuje da je stepen opterećenja zagađenjem nizak na svim ispitivanim lokacijama, jer je PLI manje od 1, osim na lokaciji L1, gde je stepen opterećenja visok. Nemerov indeks PI_N pokazuje sličan trend na svim lokacijama, kao i faktor zagađenja, jer se od njega i sastoji, ali naglašava uticaj kontaminacije jednim elementom, koristeći maksimalni faktor kontaminacije, zbog čega je i zagađenje procenjeno Nemerovim indeksom veće nego u slučaju proračunatog faktora kontaminacije.

Tabela 5. Različiti indeksi za procenu stanja kvaliteta zemljišta na ispitivanim lokacijama

Lokacija	Cd	mCd	PLI	PI _N	Oznaka za stanje zagađenja
1	38,95	7,79	1,693	14,22	Ekstremni indeks zagađenja
2	12,33	2,47	0,343	5,13	
3	4,28	0,86	0,284	1,56	Jako visok indeks zagađenja
4	5,52	1,10	0,528	1,84	
5	7,93	1,59	0,679	2,62	Visok indeks zagađenja
6	11,93	2,39	0,745	4,31	
7	12,42	2,48	0,666	4,66	Povećan indeks zagađenja
8	4,26	0,85	0,547	1,22	
9	4,26	0,85	0,546	1,19	Mali indeks zagađenja
10	4,03	0,81	0,566	1,04	
11	2,55	0,51	0,264	0,82	Vrlo mali indeks zagađenja
12	2,37	0,47	0,319	0,57	
13	3,69	0,74	0,371	1,18	Izuzetno mali indeks zagađenja
14	6,74	1,35	0,496	2,26	
15	3,07	0,61	0,368	0,97	

Na osnovu vrednosti rizika po životnu sredinu *Eri* (Slika 1) za većinu ispitivanih lokacija, klasifikacija svrstava sve proučavane zagađujuće i štetne elemente u kategoriju oblasti niskih rizika. Jedino na lokaciji L1, postoji visok individualni rizik po životnu sredinu koji se može pripisati Cu i u manjoj meri As, a koji istovremeno doprinose i ukupnom riziku po životnu sredinu. Međutim, i ukupni rizik po životnu sredinu na lokaciji L1 je nizak do umeren (manji od 300).

**Sl. 1.** Indeksi individualnog i ukupnog potencijalnog rizika po životnu sredinu

S obzirom da se metod indeksa potencijalnog rizika po životnu sredinu koristi za procenu potencijalnih rizika i utvrđivanje koje oblasti treba da budu prioritetne za sanaciju, jasno je da povišene vrednosti ukupnog rizika po životnu sredinu potvrđuju da su delovi grada – Park (lokacija L1) najbliži metalurškom kompleksu pod uticajem zagađenja i preporuka je razmotriti metode sanacije navedene lokacije.

4. ZAKLJUČAK

Stanje kvaliteta zemljišta u Boru procenjeno je na osnovu ukupne koncentracije zagađujućih i štetnih elemenata (Cu, Ni, Cr, Pb i As) na 15 lokacija i na osnovu proračunatih parametara i indeksa rizika od zagađenja zemljišta (C_f , C_d , mCd , I_{geo} , PLI , PI_N , Eri i RI). Pirsonove korelacije ukazale su na jaku korelaciju između Cu i Pb (0,887), Cu i As (0,953), Pb i As (0,960) i Cr i Ni (0,889). Na osnovu rezultata može se zaključiti da je na ispitivanom području neravnomerna distribucija zagađujućih i štetnih elemenata. Povišen sadržaj zagađujućih i štetnih elemenata utvrđen je najvećim delom za Cu, što je i očekivano i u manjoj meri za As. Na osnovu proračunatih indeksa rizika po zagađenje zemljišta, ukupni status/kvalitet zemljišta na odabranim lokacijama je promenljiv. Utvrđeno je da lokaliteti variraju od nezagađenog do jako zagađenog, pri čemu je najveći rizik od kontaminacije imala lokacija Park – stari centar Bora, gde je preporuka primena određenih mera sanacije i rekultivacije.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2025. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-136/2025-03/200052.

LITERATURA

- [1] Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih, štetnih i opasnih materija u zemljištu (Sl. Glasnik RS 30/2018 I i 64/2019)
- [2] G. Qingjiea, D. Juna, X. Yunchuanb, W. Qingfeib, Y. Liqiangb, Journal of China University of Geosciences, 19(3) (2008) 230–241.
- [3] Y. Hu, X. Liu, J. Bai, K. Shih, E.Y. Zeng, H. Cheng, Environ Sci Pollut Res, 20(9) (2013) 6150–6159.
- [4] C.O. Ogunkunle, P.O. Fatoba, Pol. J. Environ. Stud. (2013) 22(2) 487-493.
- [5] M. Dimitrijević, A. Kostov, V. Tasić, N. Milosević, J. Hazard. Mater. 164

- (2-3) (2009) 892–899.
- [6] L. Hakanson, *Water Research* 14 (1980) 975–1001.
 - [7] J.L. Elizabeth, J. Urrutia, J. Bech, C. Herrera, Í.L. Montofré, V. Zetola, F.A. Álvarez, M. Cánovas, *Environ Geochem Health*, 45 (2023) 409–426.
 - [8] R. Lacatusu, *European Soil Bureau Research Report*, 4 (2000) 393–402.
 - [9] G.M.S. Abraham, R.J. Parker, *Environmental Monitoring and Assessment*, 136 (2008) 227–238.
 - [10] D.C. Thomilson, D.J. Wilson, C.R. Harris, D.W. Jeffrey, *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33(1–4) (1980) 566–575.
 - [11] N.L. Nemerow, *Stream, Lake, Estuary, and Ocean Pollution*, Van Nostrand Reinhold Publishing C, 1985.
 - [12] G. Muller, *Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River*, *Geo Journal*, 2 (1969) 108–118.
 - [13] K. Loska, J. Cebula, J. Pelczar, D. Wiechula, J. Kwapulinski, *Water, Air and Soil Pollution*, 93 (1997) 347–365.
 - [14] W. Luo, Y. Lu, J.P. Giesy, T. Wang, Y. Shi, G. Wang, Y. Xing, *Environmental Geochemistry and Health*, 29(6) (2007) 459–471.
 - [15] V. Mrvić, B. Sikirić, D. Jaramaz, N. Koković, M. Nikoloski, *Ratar. Povrt.*, 56 (2019) 1-6.
 - [16] A.A. Radojevic, S.M. Serbula, T.S. Kalinović, J.V. Kalinović, M.M. Steharnik, J.V. Petrović, J.S. Milosavljević, *Environ Sci Pollut Res*, 24 (2017) 10326–10340.

UDK: 614.715(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2501045I

NAUČNI RAD

Oblast: Inženjerstvo zaštite životne sredine

Primljen: 22.01.2025.

Prerađen: 31.03.2025.

Prihvaćen: 02.04.2025.

KOLIČINA I SADRŽAJ UKUPNIH TALOŽNIH MATERIJA U BORU U PERIODU OD 2016. DO 2023. GODINE

QUANTITY AND CONTENT OF TOTAL ATMOSPHERIC DEPOSITION IN BOR IN THE PERIOD FROM 2016 TO 2023

Aleksandra Ivanović^{1a}, Tatjana Apostolovski-Trujić^{1b},
Viša Tasić^{1c}, Nevena Ristić^{1d}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Bor

^{1a} E-mail: aleksandra.ivanovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0562-2824>

^{1b} E-mail: tanja.trujic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9369-160X>

^{1c} E-mail: visa.tasic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6710-6529>

^{1d} E-mail: nevena.ristic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1408-237X>

Izvod

U ovom radu prikazani su rezultati analiza količine i hemijskog sastava (As, Cd, Pb) ukupnih taložnih materija (UTM) u gradu Boru u periodu 2016.-2023. godine. Prikazani su rezultati analize za tri merna mesta u urbanoj sredini grada Bora (Tehnički fakultet - TF, Gradski park - TP i Institut za rudarstvo i metalurgiju - IN). U posmatranom periodu zabeležena su četiri prekoračenja maksimalno dozvoljene koncentracije UTM od $450 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dan}^{-1}$ u mesečnim uzorcima na lokaciji TF i dva prekoračenja na lokaciji TP. Na lokaciji IN zabeleženo je 8 prekoračenja i to u periodu 2022.-2023. godine, kada su se u blizini ovog mernog mesta izvodili građevinski radovi. U posmatranom periodu prosečna pH vrednost UTM za sva merna mesta iznosila je 7.6. Na svim posmatranim lokacijama uočeno je prisustvo veoma jake ($r > 0.8$) i jake ($0.8 > r > 0.6$) korelacije (Pearson's) između As, Cd i Pb u UTM što ukazuje na zajedničko poreklo ovih elemenata.

Ključne reči: arsen, kadmijum, olovo, ukupne taložne materije, kvalitet vazduha

Abstract

This paper analyzes the amount and chemical composition (As, Cd, Pb) of total atmospheric deposition (TAD) in Bor from 2016-2023. The analysis results for three measurement sites in the urban environment of Bor (Technical Faculty - TF, City Park - TP, and Institute of Mining and Metallurgy - IN) are presented. In the observed period, four exceedances of the maximum permitted TAD concentration of $450 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ were recorded in monthly samples at the TF location, and two at the TP location. At the IN location, 8 exceedances were recorded in 2022-2023, when construction works were carried out near this measuring point. In the observed period, the average pH value of TAD for all measuring points was 7.6. At all observed locations, the presence of a very strong ($r > 0.8$) and strong ($0.8 > r > 0.6$) correlation (Pearson's) between As, Cd, and Pb detected in TAD was observed, which indicates the common origin of these elements.

Keywords: Arsenic, Cadmium, Lead, total atmospheric deposition, air quality

1. UVOD

Grad Bor se nalazi u jugoistočnom delu Republike Srbije, blizu granice sa Bugarskom i Rumunijom. Prostire se na površini od 856 km², na kojoj živi oko 41000 stanovnika (prema popisu iz 2022. godine), sa gustinom naseljenosti od 48 stanovnika po km². Početkom prošlog veka, 1903. godine, u Boru je otkriveno nalazište rude bakra, što znači da se u Boru više od jednog veka vrši otkopavanje i prerada rude bakra [1]. Industrijske aktivnosti u Boru nisu bile bez posledica po životnu sredinu, ostavljajući primetne negativne uticaje na kvalitet vazduha, vode i zemljišta u okolini [2]. Kontaminacija vazduha česticama (PM) i sumpor-dioksidom (SO₂) u Boru uglavnom potiče od emitovanja prašine sa površinskih kopova, rudničkih i flotacijskih jalovišta i emisija otpadnih gasova iz topionice bakra [3,4]. Nova tehnologija topljenja koncentrata bakra (flash smelting) u topionici u Boru promenila je intenzitet i sastav otpadnih gasova iz procesa topljenja [5].

2. MATERIJALI I METODE

U ukupnim taložnim materijama dominiraju lebdeće čestice aerodinamičkog prečnika većeg od 10 µm, koje zbog svoje mase ne ostaju suspendovane u vazduhu, već se talože na površinama u relativnoj blizini izvora emisije. Na proces taloženja utiču faktori poput veličine i gustine čestica, temperature, brzine emisije, brzine vetra i vlažnosti vazduha. Čestice sa aerodinamičkim prečnikom većim od 10 µm su suviše krupne da bi mogle da prodru u respiratorni trakt ljudi putem udisanja. One se zadržavaju na nosnim dlakama ili se talože na sluzokoži nosa, ždrela i grla, odakle se mehanički uklanjaju procesima kao što su kihanje, brisanje nosa ili gutanje.



Sl. 1. Prikaz položaja mernih mesta u odnosu na topionicu bakra u Boru (1. Tehnički fakultet u Boru - TF, 2. Gradski park - TP, 3. Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor - IN)

Međutim, krupne čestice doprinose degradaciji kvaliteta vazduha u životnoj sredini. Isto tako, njihovo taloženje na površinama biljaka može zatvoriti stome, ometajući fotosintezu i normalan razvoj biljaka. Pored toga, one kontaminiraju tlo i površinske vode, što indirektno može negativno uticati na ljudsko zdravlje i ekosistem.

Rezultati predstavljeni u ovom radu dobijeni su na osnovu uzorkovanja sprovedenih od januara 2016. do decembra 2023. godine na tri lokacije u urbanoj zoni grada Bora (Tehnički fakultet u Boru - TF, Gradski park - TP i Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor - IN), kako je prikazano na slici 1. Merno mesto TF nalazi se u blizini Tehničkog fakulteta u Boru, oko 1 km severno-severozapadno u odnosu na topionicu bakra. Merno mesto TP nalazi se blizu gradskog parka u Boru, oko 1 km zapadno u odnosu na topionicu bakra. Merno mesto IN nalazi se blizu Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor, oko 2 km južno-jugozapadno u odnosu na topionicu bakra. Ukupno je sakupljeno 288 mesečnih uzoraka, po 96 uzoraka sa svake tačke uzorkovanja. Kampanje uzorkovanja vršene su u skladu sa programom monitoringa kvaliteta vazduha na teritoriji grada Bora, usvojenim od strane nadležnog ministarstva i lokalne samouprave [6].

Za prikupljanje ukupnih taložnih materija korišćen je "Bergerhoff" kolektor [7]. Ovaj kolektor predstavlja cilindričnu plastičnu posudu definisanog prečnika otvora i zapremine, koja se na terenu postavlja radi ekspozicije atmosferskim uticajima tokom perioda od 30 ± 2 dana. Nakon završetka uzorkovanja, uzorci se transportuju u laboratoriju, gde se, nakon pripremnih postupaka, gravimetrijskom metodom određuje masa istaložene materije u uzorku. Analiza uzoraka UTM sprovedena je u skladu sa standardom SRPS EN 15841[8]. Ovaj standard je identičan standardu EN 15841:2009 CEN/TC 264 i propisuje opšte zahteve za opremu za uzorkovanje i različite strategije uzorkovanja u zavisnosti od tipa lokacije.

3. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

U radu su analizirane prosečne mesečne i godišnje koncentracije UTM, sadržaj hemijskih elemenata (Pb, Cd i As) u UTM i pH vrednost UTM. Sumarna statistika sadržaja UTM, za godišnji period usrednjavanja, prikazana je u Tabeli 1.

Prosečne vrednosti koncentracija UTM određene iz mesečnih uzoraka prikazane su na slici 2. U posmatranom periodu prekoračene su maksimalno dozvoljene godišnje vrednosti koncentracija UTM i to: na mernom mestu (m.m.) TF u toku 2016. i 2017. godine; na m.m. TP tokom 2019. godine; i na m.m. IN u periodu 2021.-2023. godine.

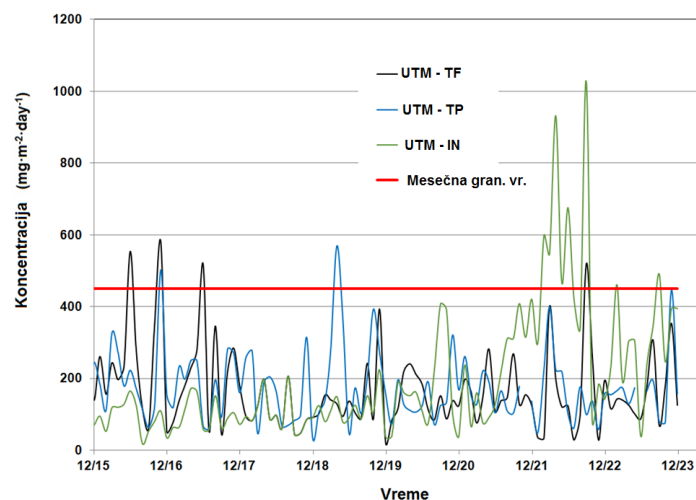
Srednja godišnja vrednost i srednje mesečne vrednosti UTM u Republici Srbiji prikazuju se u **Godišnjem izveštaju o kvalitetu vazduha u Republici Srbiji, Agencije za zaštitu životne sredine** [9]. Najviša prosečna godišnja koncentracija UTM u 2021. godine u Srbiji je zabeležena u Kragujevcu, ($453 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$), dok je m.m. IN u Boru na 9. mestu ($207 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$) [10].

Najviša prosečna godišnja koncentracija UTM u 2022. godine u Srbiji je zabeležena u Kragujevcu, ($442 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$), dok je m.m. IN u Boru na 2. mestu ($430 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$) [11]. Najviša prosečna godišnja koncentracija UTM u 2023. god. u Srbiji je zabeležena u Pirotu ($517 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$), dok je m.m. IN u Boru na 2. mestu ($303 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$) [12].

Povećane koncentracije UTM na m.m. IN u periodu 2021.-2023. godine posledica su građevinskih radova u blizini ovog mernog mesta (rekonstrukcija jednog i izgradnja dva nova industrijsko/poslovna objekta).

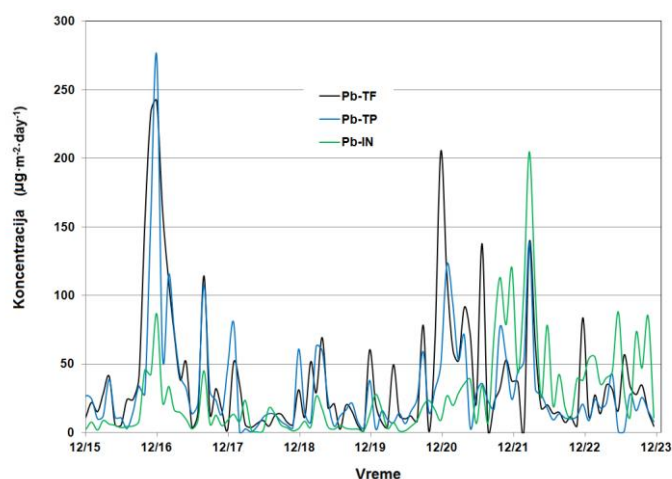
Tabela 1. Prosečna koncentracija UTM u Boru ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$), prosečan sadržaj Pb, Cd i As određen u UTM ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$) i prosečan pH u periodu 2016.-2023. godine

Parametar	Jedinica	2016. g.	2017. g.	2018. g.	2019. g.	2020. g.	2021. g.	2022. g.	2023. g.
UTM-TF	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	256.4	211.8	101.1	140.8	145.7	161.1	169.7	159.8
UTM-TP	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	202.4	181.8	150.7	234.5	145.9	159.4	159.4	174.4
UTM-IN	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	91.7	97.7	101.1	113.7	170.3	228.4	430.3	303.1
Pb-TF	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	69.3	52.4	15.4	25.3	39.6	57.8	34.5	25.6
Pb-TP	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	51.7	48.1	17.0	22.8	21.0	50.3	32.4	17.5
Pb-IN	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	18.7	15.4	7.7	7.5	11.6	48.5	60.5	47.8
Cd-TF	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	2.4	1.3	0.6	0.5	1.1	1.1	0.8	1.4
Cd-TP	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	2.0	0.9	0.3	0.6	0.3	0.8	0.7	0.8
Cd-IN	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	0.6	0.4	0.2	0.3	0.2	0.7	1.1	1.8
As-TF	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	62.5	49.2	30.8	19.0	31.3	28.0	27.7	14.3
As-TP	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	44.2	38.9	16.7	21.4	11.8	27.9	27.0	10.9
As-IN	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	9.1	10.1	6.7	6.0	3.9	25.6	43.6	30.4
pH-TF	pH	7.5	8.1	7.4	7.9	7.5	7.7	7.4	7.6
pH-TP	pH	7.3	8.0	7.5	7.9	7.5	7.8	7.2	7.3
pH-IN	pH	7.3	7.9	7.5	8.0	7.5	7.7	7.1	7.4



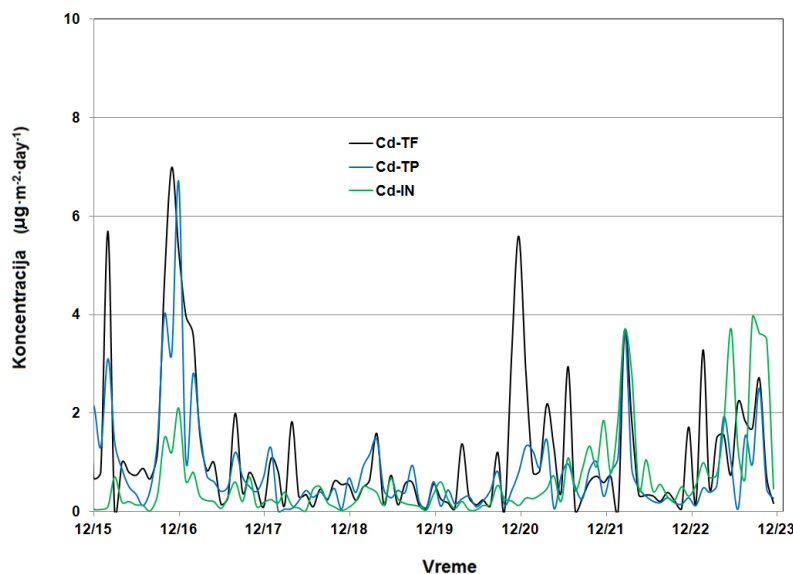
Sl. 2. Prosečna koncentracija UTM u periodu 2016-2023. god. (Tehnički fakultet u Boru - TF, Gradski park - TP, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor - IN)

Srednje godišnje koncentracije Pb u UTM u Boru u posmatranom periodu varirale su od 7.5 do 69.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, u zavisnosti od količine Pb u uvoznim koncentratima bakra koji se prerađivao u Topionici i meteoroloških uslova u vreme njihove prerade. Uočena je jaka linearna zavisnost koncentracija Pb u UTM između m.m. TF i TP ($r=0.75$). Prosečne vrednosti koncentracija Pb u UTM koje su određene iz mesečnih uzoraka prikazane su na slici 3.



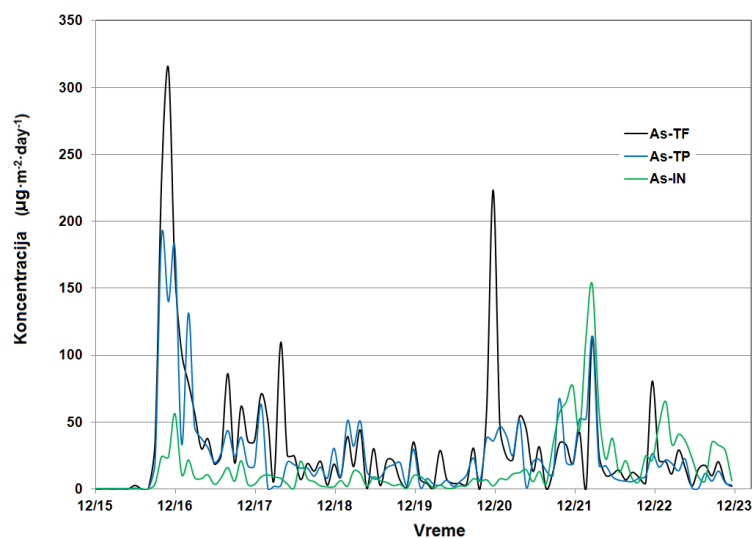
Sl. 3. Prosečan sadržaj Pb u UTM u periodu 2016-2023. god. (Tehnički fakultet u Boru - TF, Gradski park - TP, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor - IN)

Srednje godišnje koncentracije Cd u UTM u Boru u posmatranom periodu varirale su od 0.2 do 2.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, u zavisnosti od količine Cd u koncentratima bakra koji se prerađivao u Topionici i meteoroloških uslova u vreme njihove prerade. Uočena je jaka linearna zavisnost koncentracija Cd u UTM između m.m. TF i TP ($r=0.71$). Prosečne vrednosti koncentracija Cd u UTM koje su određene iz mesečnih uzoraka prikazane su na slici 4.

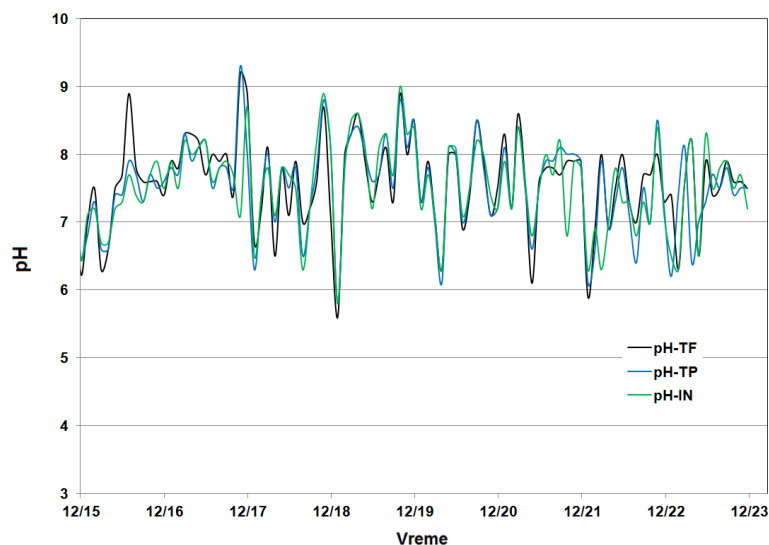


Sl. 4. Prosečan sadržaj Cd u UTM u periodu 2016-2023. god. (Tehnički fakultet u Boru - TF, Gradski park - TP, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor - IN)

Srednje godišnje koncentracije As u UTM u Boru u posmatranom periodu varirale su od 3.9 do 62.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, u zavisnosti od količine As u koncentratima bakra koji se prerađivao u Topionici i meteoroloških uslova u vreme njihove prerade. Uočena je jaka linearna zavisnost koncentracija As u UTM između m.m. TF i TP ($r=0.76$). Prosečne vrednosti koncentracija As u UTM koje su određene iz mesečnih uzoraka prikazane su na slici 5. Jaka linearna zavisnost koncentracija Pb, Cd i As koje su određene u UTM na m.m. TF i TP govori o prisustvu zajedničkog izvora emisije ovih hemijskih elemenata za ova dva merna mesta. Merno mesto IN nije na dominantnom pravcu vetra u odnosu na izvore emisije UTM iz Topionice, tako da je na ovom m.m. prisutan i određen uticaj drugih izvora UTM u odnosu na m.m. TF i TP.



Sl. 5. Prosečan sadržaj As u UTM u periodu 2016.-2023. godine (Tehnički fakultet u Boru - TF, Gradski park - TP, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor - IN)



Sl. 6. Prosečna pH vrednost UTM u periodu 2016.-2023. godine (Tehnički fakultet u Boru - TF, Gradski park - TP, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor - IN)

Srednje godišnje vrednosti pH UTM u Boru u posmatranom periodu varirale su od 7.1 do 8.1 pH. Uočena je jaka linearna zavisnost pH UTM između svih m.m. ($0.79 > r > 0.73$).

Prosečne pH vrednosti UTM koje su određene iz mesečnih uzoraka prikazane su na slici 6.

U Tabeli 2 prikazan je prosečan godišnji fluks hemijskih elemenata (Pb, Cd i As) u UTM na m.m. u Boru, zajedno sa rezultatima dobijenim u drugim regionima u Svetu.

Tabela 2. *Prosečni godišnji fluks depozicije Pb, Cd i As ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$) u različitim regionima*

Lokacija	Period	Pb	Cd	As	Izvor podataka
TF	2016-2023	14.6	0.4	12.0	Ovaj rad
TP	2016-2023	11.9	0.3	9.1	Ovaj rad
IN	2016-2023	9.9	0.2	6.2	Ovaj rad
Beograd, Srbija	2002-2006	21.7	0.2		[13]
Tokyo Bay, Japan	2004-2005	9.9	0.4	2.9	[14]
Seine Estuary, France	2001-2002	18.0	0.4		[7]
Paris, France	2001-2002	4.2	0.2		[7]
Pearl River delta, China	2001-2002	13.0	0.1		[15]
Lake Superior, USA	1993-1994	1.5	0.5	0.2	[16]
North Sea	1992-1994	3.7		0.3	[17]

Na osnovu podataka iz Tabele 2, očigledno je da su prosečne godišnje vrednosti flukseva atmosferske depozicije Pb utvrđeni na svim m.m. u Boru, uporedivi sa onima zabeleženim u Beogradu [13], Francuskoj [7] i Kini [15]. Isto tako, prosečni godišnji fluksevi atmosferske depozicije Cd, zabeleženi na svim m.m. u Boru uporedivi su sa rezultatima iz ostalih navedenih studija. Nasuprot tome, prosečni godišnji fluksevi atmosferske depozicije As utvrđeni na svim m.m. u Boru viši su u poređenju sa rezultatima iz drugih studija. Rezultati prikazani u Tabeli 2 ukazuju na poboljšano stanje životne sredine u urbanim delovima Bora nakon primene nove tehnologije topljenja u Topionici, kada su u pitanju prosečni godišnji fluksevi atmosferske depozicije Pb i Cd [18]. Prosečni godišnji fluksevi atmosferske depozicije As, na svim posmatranim m.m. su i dalje visoki, što je direktna posledica prerade koncentrata bakra u Topionici u Boru koji sadrže visok procenat As.

ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su rezultati analize UTM na tri merna mesta u Boru (TF, TP i IN) u periodu 2016.-2023. godine. Može se reći da rezultati ukazuju na to da je stanje životne sredine poboljšano u pogledu količine UTM u urbanim delovima Bora nakon primene nove tehnologije topljenja u Topionici. Povećanje pH vrednosti UTM u posmatranom periodu posledica je boljeg

tretmana otpadnih gasova iz Topionice (pre svega SO₂). Povećanje sadržaja Pb, Cd i As u UTM na svim posmatranim m.m. može se pripisati višoj koncentraciji navedenih elemenata u koncentratima bakra koji su se prerađivali u Topionici.

U posmatranom periodu prosečna pH vrednost UTM za sva merna mesta iznosila je 7.6 pH. Na svakom m.m. analiziranom u ovom radu uočeno je prisustvo veoma jake ($r > 0.8$) i jake ($0.8 > r > 0.6$) korelacije (Pearsons) između As, Cd, i Pb u UTM, što ukazuje na zajedničko poreklo ovih elemenata. Ovo nedvosmisleno ukazuje na to da je dominantan izvor navedenih elemenata isti – Topionice bakra Bor.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2025. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-136/2025-03/ 200052.

LITERATURA

- [1] <https://irmbor.co.rs/o-nama/istorijat/> (pristupljeno 15.03.2025.)
- [2] T. Apostolovski-Trujić, B. Radović, V. Tasić, R. Kovačević, N. Ristić, T. Urošević, V. Kamenović, Kvalitet vazduha u gradu Boru u 2023. godini, Bakar, Vol. 49, 1 (2024) 1-10.
- [3] V. Tasić, R. Kovačević, B. Maluckov, T. Apostolovski-Trujić, M. Cocić, B. Matić, M. Šteharik, The content of As and heavy metals in TSP and PM10 near copper smelter in Bor, Serbia, Water Air and Soil Pollution, (2017), 228:230.
- [4] J. Gonzales-Castanedo, T. Moreno, R. Fernandez-Camacho, A. Sanchez de la Campa, A. Alastuey, X. Querol, J. De la Rosa, Size distribution and chemical composition of particulate matter stack emissions in and around a copper smelter, Atmos. Environ., 98 (2014) 271–282.
- [5] I.V. Kojo, A. Jokilaakso, P. Hanniala, Flash smelting and converting furnaces: A 50 year retrospect. JOM, 52 (2) (2000) 57–61.
- [6] <https://bor.rs/wp-content/uploads/2024/03/br8-parna-god4-18.03.2024-1.pdf> (pristupljeno 15.03.2025.)
- [7] A. Motelay-Massei, D. Ollivon, K. Tiphagne, B. Garban, Atmospheric bulk deposition of trace metals to the Seine River Basin, France: concentrations, sources and evolution from 1988 to 2001 in Paris, Water Air and Soil Pollution, 164 (2005) 119–135.

-
- [8] https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:31253, SRPS EN 15841:2011: Kvalitet vazduha ambijenta — Standardna metoda za određivanje arsena, kadmijuma, olova i nikla iz taložnih materija (pristupljeno 15.03.2025.)
 - [9] <https://sepa.gov.rs/publikacije/> (pristupljeno 15.03.2025.)
 - [10] <https://sepa.gov.rs/wp-content/uploads/2024/10/Vazduh2021.pdf> (pristupljeno 15.03.2025.)
 - [11] <https://sepa.gov.rs/wp-content/uploads/2024/10/Vazduh2022.pdf> (pristupljeno 15.03.2025.)
 - [12] <https://sepa.gov.rs/wp-content/uploads/2024/10/Vazduh2023.pdf> (pristupljeno 15.03.2025.)
 - [13] M. Tasić, Z. Mijić, S. Rajšić, A. Stojić, M. Radenković, J. Joksić, Source apportionment of atmospheric bulk deposition in the Belgrade urban area using positive matrix factorization. In *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 162 (2009) 12-18.
 - [14] M. Sakata, Y. Tani, T. Takagi, Wet and dry deposition fluxes of trace elements in Tokyo Bay, *Atmospheric Environment*, 42 (2008) 5913–5922.
 - [15] C.S.C. Wong, X.D. Li, G. Zhang, S.H. Qi, X.Z. Peng, Atmospheric deposition of heavy metals in the Pearl River Delta, China, *Atmospheric Environment*, 37 (2003) 767–776.
 - [16] C.W. Sweet, A. Weiss, S.J. Vermette, Atmospheric deposition of trace metals at three sites near the great lakes, *Water Air and Soil Pollution*, 103 (1998) 423–439.
 - [17] J. Injuk, R.V. Grieken, G.D. Leeuw, Deposition of atmospheric trace elements into the North Sea: coastal, ship, platform measurements and model predictions, *Atmos. Environ.*, 32 (1998) 3011–3025.
 - [18] V. Tasić, A. Ivanović, T. Apostolovski-Trujić, S. Dimitrijević, M. Cocić, The Impact of a New Copper Smelting Technology on the Total Atmospheric Deposition in Bor, Serbia, *Proceedings (CD) of the 6th International Conference on Renewable Electrical Power Sources*, Sava centar 11.-12.10.2018, Belgrade, Serbia, pp. 61-68. ISBN: 978-86-81505-87-8

UDK: 614.71:681.325(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2501055T

NAUČNI RAD

Oblast: Inženjerstvo zaštite životne sredine

Primljen: 25.03.2025.

Prerađen: 01.04.2025.

Prihvaćen: 15.04.2025.

**PRIMENA XGBOOST ALGORITMA ZA KALIBRACIJU
PRENOSNOG PAQMON 1.0 PM MONITORA U
USLOVIMA SPOLJAŠNJE SREDINE**

**XGBOOST-BASED CALIBRATION OF THE PORTABLE
PAQMON 1.0 PM MONITOR IN OUTDOOR CONDITIONS**

Dušan B. Topalović^{1a}, Ivana D. Smičiklas^{1b}, Mirjana B. Radenković^{1c},
Srboľjub Stanković^{1d}, Ivana Ź. Pepić^{1e,2}, Aca Božilov^{3a}, Milan Protić^{3b}

¹Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Institut za nuklearne
nauke „Vinča“ Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju,
Univerzitet u Beogradu, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11351 Beograd, Srbija

²Departman za fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu,
Trg Dositeja Obradovića 4, 21000 Novi Sad, Srbija

³Fakultet zaštite na radu, Univerzitet u Nišu, Čarnojevića 10a, 18000 Niš, Srbija

^{1a} E-mail: dusan.topalovic@vin.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5976-963X>

^{1b} E-mail: ivanat@vin.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7384-7312>

^{1c} E-mail: mirar@vin.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1055-4862>

^{1d} E-mail: srbas@vin.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6952-5604>

^{1e, 2} E-mail: ivana.pepic@vin.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-0336-7660>

^{3a} E-mail: aca.bozilov@znrfak.ni.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7032-4789>

^{3b} E-mail: milan.protic@znrfak.ni.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4957-7882>

Izvod

U ovom radu su ispitane mogućnosti primene XG kalibracione procedure za PAQMON 1.0 prenosnu platformu u terenskim uslovima. Iako je PAQMON 1.0 portabilna platforma u kojoj je moguća integracija dodatnih senzorskih modula, za potrebe ovog istraživanja je korišćena verzija koja je prilagođena za monitoring masenih koncentracija respirabilnih čestica, kao i meteoroloških parametara. Merenja su sprovedena u Boru, tokom grejnog (GP) i negrejnog (NGP) perioda, kako bi se uzele u obzir sezonske razlike u klimatskim uslovima i kvalitetu vazduha, pri čemu platforma nije pokazala značajniji drift signala i stabilno je funkcionisala bez kvarova. Korelacija $PM_{2.5}$ koncentracija sa referentnim Grimm EDM180 monitorom tokom GP iznosila je $R = 0.65$ ($p \leq 0.001$) i $R = 0.40$ ($p \leq 0.001$) tokom NGP. Primena XGBoost (XG) modela je u značajnoj meri poboljšala tačnost $PM_{2.5}$ merenja u poređenju sa linearnim regresionim modelima. Dobijene vrednosti $adjR^2$ bile su 0.68 za GP i 0.44 za NGP, dok su NRMSE vrednosti varirale od 0.43 do 0.83. Iako su performanse XG modela bile nešto slabije tokom NGP, kalibracija ovom metodom omogućila je PAQMON 1.0 platformi da dostigne DQO od 50% tokom obe kampanje merenja. Rezultati potvrđuju praktičnu primenljivost XG kalibracije za unapređenje preciznosti jeftinih senzorskih sistema prilikom monitoringa kvaliteta vazduha.

Ključne reči: XGBoost, kalibracija, monitoring

Abstract

This study examines the applicability of the XG calibration procedure for the PAQMON 1.0 portable platform in field conditions. Although PAQMON 1.0 is designed to accommodate additional sensor modules, this study utilized a version adapted explicitly for monitoring respirable particulate matter concentrations and meteorological parameters. Measurements were conducted in Bor, Serbia, during both the heating (GP) and non-heating (NGP) periods to account for seasonal climate and air quality variations. The platform demonstrated stable performance without significant signal drift or hardware failures. The correlation between $PM_{2.5}$ concentrations and the reference Grimm EDM180 monitor was $R = 0.65$ ($p \leq 0.001$) during GP and $R = 0.40$ ($p \leq 0.001$) during NGP. The application of the XGBoost (XG) model significantly improved the accuracy of $PM_{2.5}$ measurements compared to linear regression models. The adjusted R^2 values were 0.68 for GP and 0.44 for NGP, while NRMSE values ranged from 0.43 to 0.83. Although the XG model exhibited slightly lower performance during NGP, its calibration enabled the PAQMON 1.0 platform to achieve a Data Quality Objective (DQO) of 50% in both measurement campaigns. These findings confirm the practical applicability of XG calibration for enhancing the accuracy of low-cost sensor systems in air quality monitoring.

Keywords: XGBoost, calibration, monitoring

1. UVOD

Zagađenje vazduha, naročito izloženost finim ($PM_{2.5}$) respirabilnim česticama, predstavlja jednu od najvećih pretnji po ljudsko zdravlje [1]. Ove čestice su povezane sa respiratornim bolestima i povećanom stopom prevmene smrtnosti [2-4]. Kako bi se umanjili štetni efekti zagađenja i u cilju zaštite javnog zdravlja, na nivou Evropske unije (EU) usvojena je Direktiva [5] koja bi trebala da doprinese smanjenju nivoa $PM_{2.5}$ i drugih zagađivača. Pouzdane metode procene izloženosti zagađenju vazduha finim česticama su ključne za adekvatno sagledavanje negativnih zdravstvenih efekata [6]. Takođe, precizna procena izloženosti od suštinskog je značaja za donosiocce odluka prilikom definisanja različitih strategija za redukciju emisija i ublažavanje posledica zagađenja [7]. Tradicionalne stanice za monitoring kvaliteta vazduha (Air Quality Monitoring Station-AQMS), koje su u Republici Srbiji pod kontrolom Agencije za zaštitu životne sredine (Serbian Environmental Protection Agency-SEPA), pružaju precizne podatke o koncentracijama $PM_{2.5}$. Međutim, zbog stacionarnog karaktera i visokih troškova održavanja, one su ograničene na mali broj lokacija i samim tim ne omogućavaju adekvatnu procenu prostorne zavisnosti zagađenja [6].

Zbog toga, paralelno sa razvojem novih tehnologija, sve više se istražuju alternativne metode za procenu koncentracija $PM_{2.5}$ [8]. Ove metode se obično zasnivaju na korišćenju malih i relativno jeftinih optičkih merača i senzora koji omogućavaju prikupljanje podataka visoke prostorne i vremenske rezolucije [9]. Većina optičkih senzora za $PM_{2.5}$ se karakterišu relativno brzim odzivom i malom potrošnjom energije [10]. Ovi senzori konvertuju svetlosni signal u električne impulse, čime se određuju broj i veličina čestica, dok se masena koncentracija izračunava algoritmom na osnovu brojčane koncentracije, gustine,

težinskog faktora, indeksa refrakcije i higroskopnosti [10]. Dosadašnja istraživanja su pokazala da mnogi spoljašnji faktori utiču na kvalitet merenja uključujući i meteorološke uslove, poput temperature (T) i relativne vlažnosti (RH) [11,12]. Takođe, zanimljivo je napomenuti da konverzija bročane u masenu koncentraciju zavisi od godišnje sezone kada se sprovodi merenje [13]. Dakle, jedan od glavnih izazova u primeni jeftinih optičkih merača se odnosi na obezbeđivanje adekvatnog kvaliteta rezultata merenja [14]. U vezi sa tim, evropski propisi [5] zahtevaju da merna nesigurnost indikativnih merenja za $PM_{2.5}$ ne prelazi 50% (Data Quality Objective-DQO).

Razvoj naprednih metoda kalibracije i validacije ključan je za smanjenje merne nesigurnosti senzorski merenja [11]. Tradicionalno, kalibracija u laboratorijskim uslovima koristi univarijantnu linearnu regresiju (ULR), koja pretpostavlja linearnu zavisnost između senzorskih i referentnih merenja. Međutim, u složenijim uslovima spoljašnje sredine primenjuju se multivarijantna linearna regresija (MLR) [15] i višedimenzionalni modeli za opisivanje nelinearnih odnosa između prediktora i ciljnih varijabli [16]. U poslednje vreme, sve češće se koriste nelinearni modeli zasnovani na XGBoost (XG) regresiji, koji pokazuju sposobnost dobre generalizacije [17].

U ovom radu ispitane su performanse Shandong Nova SDS011 optičkog senzora za određivanje koncentracije $PM_{2.5}$, koji je integrisan u PAQMON 1.0 (kodna oznaka u radu-N21) platformu. Ova platforma je razvijena u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor, Republika Srbija, i uključuje i senzor za temperaturu i relativnu vlažnost. U okviru ove studije, tačnost senzora je testirana u terenskim uslovima tokom grejnog i negrejnog perioda merenja u Boru. Kalibracija jeftinog (Low Cost Sensor-LCS) senzora izvršena je primenom ULR, MLR i XG modela, a zatim su analizirani i upoređeni dobijeni rezultati.

2. MATERIJALI I METODE

2.1 Opis kampanja merenja

Outdoor kampanje merenja su sprovedene u Boru. Bor je industrijski centar sa razvijenom rudarskom, metalском i prerađivačkom industrijom, tako da je glavni izvor aerozagađenja rudarsko-metalurški kompleks, koji uključuje topionicu bakra [18-20]. Proces topljenja bakra dovodi do emisije različitih zagađivača vazduha, kao što su između ostalog i respirabilne čestice [18]. Dodatno, značajan doprinos emisiji respirabilnih čestica dolazi i od sagorevanja fosilnih goriva (ugalj) tokom grejne sezone. Da bi se istražio uticaj promene kompozicije i koncentracije respirabilnih čestica na rad LCS-a i performanse kalibracionih modela, sprovedene su dve kampanje merenja. Prva kampanja je obuhvatila grejni period (GP) od 30. marta 2021. god. do 8. aprila 2021. god., dok je druga kampanja obuhvatila negrejni period (NGP) od 31. maja 2021.

god. do 7. juna 2021. god. PAQMON 1.0 platforma je bila kolocirana sa Grimm EDM180 PM monitorom na automatskoj mernoj stanici Gradski park (44° 4' 33" N, 22° 5' 58" N) koja je u sastavu državne mreže monitoringa kvaliteta vazduha Republike Srbije.

2.2 Razvoj i evaluacija modela

Korišćene su dve vrste kalibracionih modela koji se zasnivaju na linearnoj (ULR, MLR) i XG regresiji. ULR predstavlja statističku metodu modelovanja linearnog odnosa između zavisne (targetne) varijable i nezavisne (prediktorske) varijable:

$$z_i = w_0 + w_1 x_i + \varepsilon_i, \quad i = \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

gde je n -broj statističkih jedinica, z_i je zavisna varijabla, x_i je nezavisna varijabla, w_0 (intercept) i w_1 (slope) su regresioni koeficijenti, dok je ε_i neopservirana slučajna varijabla (greška modela) koja unosi šum između z i x . Ukoliko je potrebno modelovati linearnu zavisnost između jedne targetne varijable i više prediktorskih varijabli, tada se umesto ULR koristi MLR statistička metoda koja se može predstaviti sledećom jednačinom:

$$z_i = w_0 + w_1 x_{i,1} + \dots + w_k x_{i,k} + \varepsilon_i = \mathbf{x}_i^T \mathbf{w} + \varepsilon_i, \quad i = \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

gde je k broj prediktorskih varijabli, a $\mathbf{x}_i^T \mathbf{w}$ predstavlja unutrašnji proizvod vektora $\mathbf{x}_i^T$ i $\mathbf{w}$.

Sa druge strane, XG je skalabilan algoritam ansambla zasnovan na stablima odlučivanja koji koristi gradijentno pojačanje [17]. Ovo je iterativni model koji počinje početnom predikcijom, koja se često podešava na nulu. Nakon toga, svako novo stablo se dodaje kako bi se smanjile greške. Matematički, model se može predstaviti kao:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), \quad (3)$$

gde je $\hat{y}_i$ konačna predviđena vrednost za i -ti uzorak, K je broj stabala u ansamblu, a $f_k(x_i)$ predstavlja predikciju k -tog stabla za i -ti uzorak. Objektna funkcija XG algoritma sastoji se iz dva dela: funkcije gubitka i regularizacionog člana. Funkcija gubitka meri koliko dobro model odgovara podacima, dok regularizacioni član pojednostavljuje kompleksna stabla. Opšti oblik funkcije gubitka je:

$$\text{obj}(\theta) = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k), \quad (4)$$

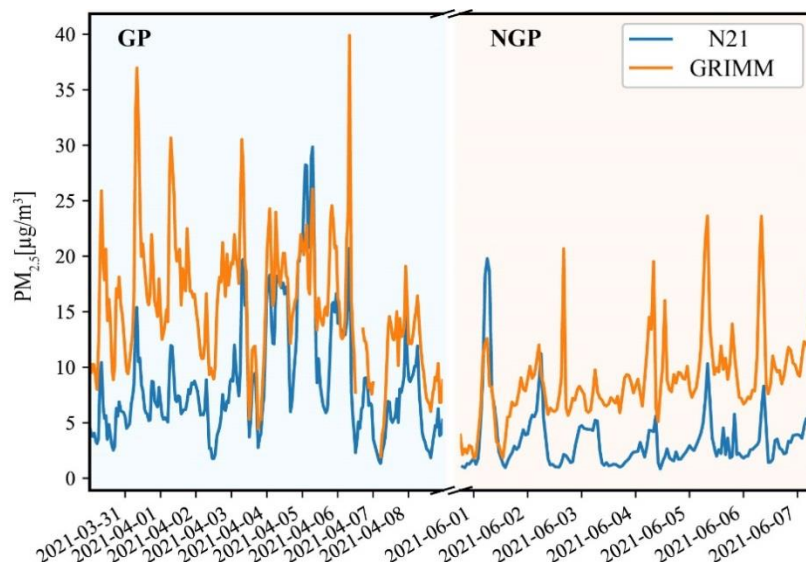
gde je $l(y_i, \hat{y}_i)$ funkcija gubitka koja računa razliku između stvarne i predviđene vrednosti, dok je

$\Omega(f_k)$ regularizacioni član koji sprečava prekomerno prilagođavanje modela složenim stablima. Za ULR i MLR ne postoje hiperparametri koji bi se podešavali tokom validacije. Sa druge strane, za XG model je izvršeno

podešavanje hiperparametra pomoću grid procedure koja evaluira sve moguće kombinacije unapred definisanih vrednosti hiperparametara. Za evaluaciju rezultata modela korišćena su dva standardna statistička testa: 1) indeks slaganja $\text{adj}R^2$ i 2) srednja kvadratna greška (NRMSE) koja je normalizovana interkvartilnim opsegom referentnih merenja.

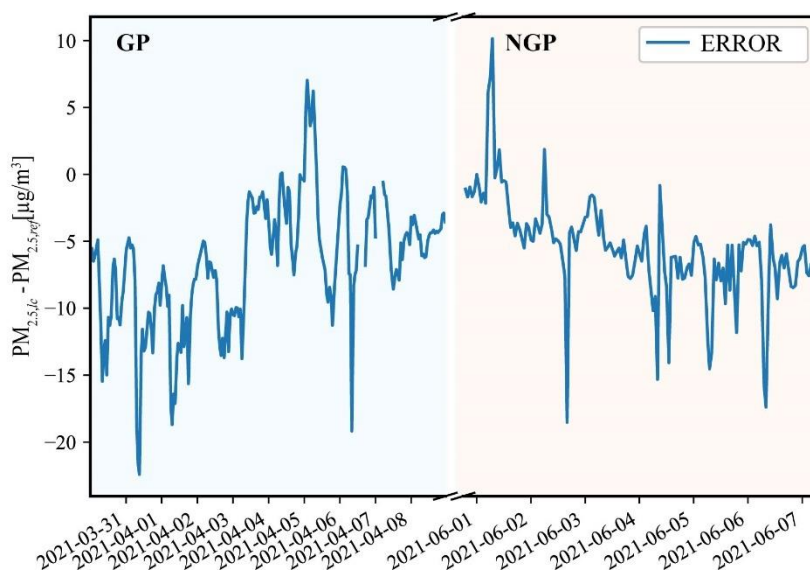
3. REZULTATI I DISKUSIJA

Slika 1 prikazuje $\text{PM}_{2.5,lc,ref}$ vremenske serije dobijene pomoću PAQMON 1.0 platforme i GRIMM EDM180 monitora. Merenja su imala 1h vremensku rezoluciju i na slici su predstavljeni rezultati za GP i NGP. Generalno, tokom kampanje merenja LCS-ovi (NOVA SDS011 i AM2302/DHT22) integrisani u PAQMON 1.0 platforme su bili stabilni, pouzdani i bez očiglednih grešaka što je u saglasnosti sa prethodnim istraživanjima. S obzirom da je procenat uzoraka sa nedostajućim vrednostima tokom oba perioda merenja bio mali, iskorišćeno je listwise uklanjanje uzoraka. Nakon toga, analizirano je da li postoje outlajeri u vremenskim serijama varijabli kvaliteta vazduha. Sa slike 1 se mogu primetiti vrednosti u podacima za $\text{PM}_{2.5,lc,ref}$ varijable koje tokom oba perioda u značajnijoj meri odstupaju od ostalih rezultata merenja. Povišene vrednosti se najverovatnije javljaju usled aktivnosti topionice bakra, ali i sagorevanja fosilnih goriva naročito u GP [18].



Sl. 1. Rezultati merenja za $\text{PM}_{2.5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] koja su sprovedena pomoću PAQMON 1.0 platforme i GRIMM EDM180 monitora tokom GP i NGP

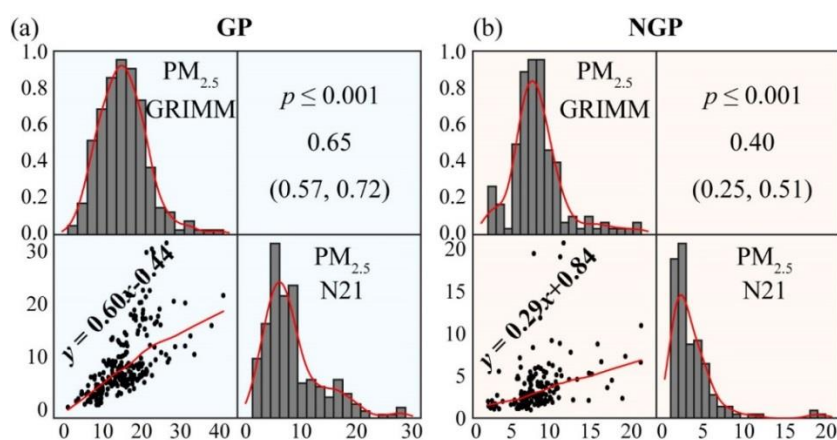
Ukoliko se uporede sa greškom merenja senzora iz PAQMON 1.0 platforme sa slike 2, jasno se uočava da su upravo u periodima incidentnih povećanja koncentracije polutanata (koncentracije za $PM_{2.5,ref}$ veće od $20 \mu g/m^3$) zabeležene i najveće greške u merenjima koje u uobičajenim situacijama ne prelaze približno $\pm 15 \mu g/m^3$ za $PM_{2.5,lc}$. Sa slike 2 se takođe može jasno videti da su tokom većeg dela kampanje merenja, i u GP i u NGP, izmerene vrednosti za $PM_{2.5,lc}$ bile niže u odnosu na $PM_{2.5,ref}$. Potcenjivanje vrednosti koncentracija se vrlo verovatno javlja zbog činjenice da ventilatori NOVA SDS011 senzora nisu imali snagu za uspostavljanje dovoljno visokog protoka vazduha unutar PAQMON 1.0 kućišta.



Sl. 2. Vremenska serija greške (ERROR) merenja PAQMON 1.0 platforme tokom GP i NGP

Na slici 3, podaci dobijeni pomoću PAQMON 1.0 platforme (N21) su upoređeni sa podacima sa GRIMM EDM180 monitora. Na glavnoj dijagonali slike se nalaze histogrami varijabli sa odgovarajućim Kernel Density Distribution (KDD) funkcijama. Na donjoj dijagonali matrica prikazani su scatter plot-ovi sa Locally Weighted Regression (LWR) funkcijama. NOVA SDS011 senzor je pokazao visok stepen korelacije sa referentnim/ekivalentnim monitorom, za $PM_{2.5}$. Između $PM_{2.5,lc}$ i $PM_{2.5,ref}$ varijabli, Pearson-ov koeficijent korelacije tokom GP je imao vrednost 0.65 ($p \leq 0.001$), dok je tokom NGP iznosio 0.40 ($p \leq 0.001$). Izračunate korelacije su statistički značajne što ukazuje na postojanje izražene pozitivne linearne povezanosti između merenja LCS-a i referentnog/ekvivalentnog monitora. Korelacije tokom GP su više u poređenju

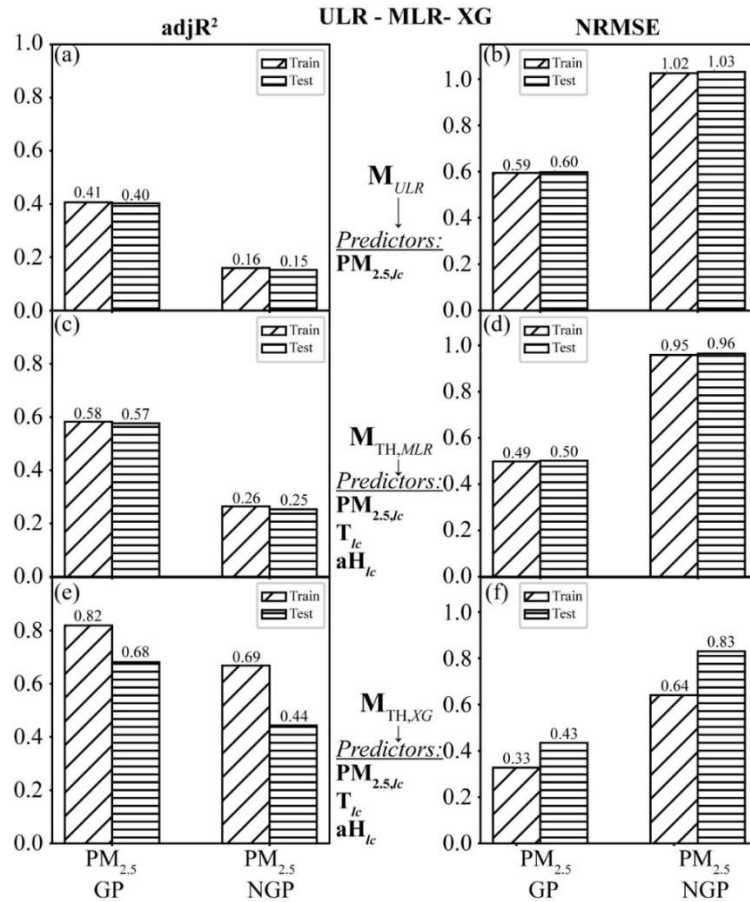
sa korelacijama tokom NGP, što ukazuje na jaču linearnu povezanost vremenskih serija tokom zime. Lošije performanse tokom leta se mogu objasniti uticajem promena meteoroloških parametara koje su izraženije tokom letnjeg perioda. Treba svakako imati u vidu da su ovi rezultati dobijeni za nekalibrisana merenja, dok će potencijalna poboljšanja nakon kalibracije biti analizirana u nastavku. Sa slike 3 se može primetiti da je slope uspostavljenih regresionih modela za $PM_{2.5}$ tokom GP i NGP bio ispod 1, što je indikacija za potcenjivanje vrednosti $PM_{2.5}$ masenih koncentracija od strane PAQMON 1.0 platforme.



Sl. 3. Pearson-ova matrica korelacija za $PM_{2.5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] tokom (a) GP i (b) NGP. Zajedno sa Pearson-ovim korelacijama, predstavljeni su p vrednost i 95 % interval poverenja

Posle analize nekroigovanih rezultata merenja, kao drugi pokazatelj kvaliteta LCS-a može se iskoristiti performansna statistika jednostavnog modela koji se zasniva na univarijantnoj linearnoj regresiji (M_{ULR}). Treba napomenuti, da u ovom radu uspostavljeni M_{ULR} modeli nisu koristili tehnike L_1 i L_2 regularizacije. To je urađeno zbog jednostavnosti, ali i zato što regularizacija ne igra značajniju ulogu u sprečavanju overfitovanja u relativno jednostavnim regresionim modelima, sa jednim ili pak manjim brojem prediktora. Performansna statistika za M_{ULR} modele je predstavljena na slici 4 (a) i (b) i uključuje rezultate za $\text{adj}R^2$ i NRMSE između kalibrisanih vrednosti PAQMON 1.0 platformu i podataka dobijenih pomoću GRIMM EDM180 monitora tokom GP i NGP. Kvalitativno gledano, može se lako primetiti da se rezultati dobijeni korišćenjem podataka iz trening skupa skoro poklapaju sa rezultatima iz test skupa (razlike su približno oko 2%). To znači da nije došlo do pojave overfitovanja. Platforma je pokazala bolje performanse tokom GP u odnosu na NGP. Na primer, vrednosti prilagođenog koeficijenta korelacije ($\text{adj}R^2$) za $PM_{2.5,lc}$ u sezonama GP i NGP iznose 0.40 i 0.15, što znači da je tokom GP model objasnio 40% varijanse koncentracije $PM_{2.5,ref}$, dok tokom NGP

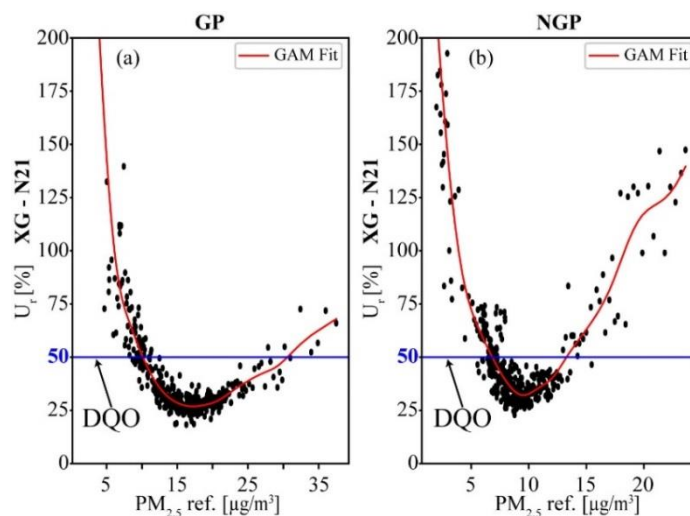
objašnjava 15%. Vrednosti NRMSE-a za $PM_{2.5,lc}$ M_{ULR} modele tokom GP i NGP iznose 60% i 103% interkvartilnog opsega referentnog $PM_{2.5,ref}$ merenja, respektivno.



Sl. 4. Stupčani grafikoni $adjR^2$ i NRMSE između referentnog monitora i jeftinog senzora kalibrisanog pomoću tri kalibraciona modela: (a), (b) M_{ULR} ; (c), (d) $M_{TH,MLR}$ i (e), (f) $M_{TH,XG}$

Kako bi dodatno poboljšali rezultate kalibracije, koristili smo složenije modele sa većim brojem prediktora koji uključuju temperature (T) i relativnu vlažnost (rH) konvertovanu u (aH) [11]. To su MLR i XG modeli. Performansna statistika za $M_{TH,MLR}$ je predstavljena na slici 4 (c) i (d). Sa slike se vidi da se za $M_{TH,MLR}$ kvalitativno može potvrditi da su vrednosti $adjR^2$ i NRMSE dobijene korišćenjem podataka iz trening skupa imale dobro poklapanje sa rezultatima dobijenim pomoću podataka iz test skupa. To znači da

je ovaj model pokazao dobru sposobnost generalizacije i da nije došlo do pojave overfitovanja. Za $\mathbf{M}_{TH,MLR}$ kalibracioni model, vrednost $adjR^2$ je veća tokom GP u odnosu na NGP. Kvantitativno gledano, vrednost $adjR^2$ za $PM_{2.5,lc}$ tokom GP i NGP iznosi 0.57 i 0.25, respektivno. Dobijeni rezultati ukazuju na to da dodatni prediktori za $PM_{2.5}$ poboljšavaju rezultate kalibracije. Vrednost objašnjene varijanse za $PM_{2.5}$ iznosi 57% i 25% tokom GP i NGP, redom. Takođe, vrednost NRMSE za $PM_{2.5,lc}$ $\mathbf{M}_{TH,MLR}$ model u GP i NGP je sada 50% i 96% interkvartilnog opsega referentnog $PM_{2.5,ref}$ merenja. Konačno, najsloženiji model koji je korišćen u ovom radu za kalibraciju senzora u PAQMON 1.0 platformi se zasniva na XG regresiji. Na slici 4 (e) i (f) su prikazane vrednosti $adjR^2$ i NRMSE za $\mathbf{M}_{TH,XG}$ model. Ukoliko se uporede rezultati za $\mathbf{M}_{TH,MLR}$ i $\mathbf{M}_{TH,XG}$ može se doći do sledećeg zaključka. Vrednost objašnjene varijanse za $PM_{2.5,lc}$ se povećava nakon kalibracije sa $\mathbf{M}_{TH,XG}$ sa 57% na 68%, i sa 25% na 44% u GP i NGP, redom. Sa druge strane, primećeno je i smanjenje vrednosti NRMSE-a nakon kalibracije pomoću $\mathbf{M}_{TH,XG}$. Vrednost za $PM_{2.5,lc}$ je unapređena sa 50% na 43%, odnosno sa 96% na 83% interkvartilnog opsega $PM_{2.5,ref}$ referentnog merenja, u GP i NGP, respektivno.



Sl. 5. Relativna proširena nesigurnost (U_r) merenja jeftinog senzora kao funkcija referentnog GRIMM EDM180 merenja. Rezultati su predstavljeni za PAQMON 1.0 platformu za: (a) GP i (b) NGP

Kada je u pitanju nesigurnost mernih rezultata, $\mathbf{M}_{TH,XG}$ modeli su se pokazali kao najbolje rešenje. To se može potvrditi na osnovu slike 5, gde je prikazana relativna proširena nesigurnost (U_r) merenja low-cost senzora kao funkcija referentnog GRIMM EDM180 merenja. Rezultati su dobijeni isključivo korišćenjem podataka iz test skupa. Radi lakše interpretacije dobijenih rezultata,

na slici je prikazan i fit generalizovanog aditivnog modela (GAM), dok se plava horizontalna linija odnosi na data quality objective (DQO) za indikativna PM merenja [5]. Sa slike se jasno može videti da je korišćenjem $M_{TH,XG}$ modela za kalibraciju, merna platforma tokom obe kampanje merenja dostigla DQO od 50%. Relativna proširena nesigurnost (U_r) za $PM_{2.5}$ je ispod 50% (presek DQO i GAM fit-a) za koncentracije približno između $10 \mu g/m^3$ i $30 \mu g/m^3$ i $7 \mu g/m^3$ i $13 \mu g/m^3$ tokom GP i NGP, respektivno.

4. ZAKLJUČAK

Ova istraživanja potvrdila su pouzdanost i stabilnost PAQMON 1.0 platforme u terenskim uslovima, uz primenu XG kalibracione procedure za poboljšanje tačnosti merenja. Uređaj je pokazao konzistentne performanse bez značajnog drifta signala tokom dve različite sezone, pri širokom spektru meteoroloških parametara. Dalja analiza je potvrdila visoku korelaciju memnih rezultata sa referentnim instrumentima, što ukazuje na validnost sistema za praćenje kvaliteta vazduha. Implementacija metoda mašinskog učenja omogućila je ispitivanje potencijala PAQMON 1.0 kao samobučavajućeg senzorskog sistema. Posebno su analizirani efekti dodatnih meteoroloških parametara kao prediktora u okviru različitih modela kalibracije. Pokazano je da primena naprednih modela, zasnovanih na XGBoost regresiji, omogućava poboljšanje tačnosti merenja u poređenju sa klasičnim linearnim modelima. Da bi se osigurala robustnost modela, sprovedena je rigorozna statistička obrada, uključujući preprocesiranje signala, augmentaciju podataka i optimizaciju hiperparametara. Rezultati istraživanja ukazuju na praktičnu primenu predložene metodologije u unapređenju performansi senzorskih sistema za monitoring kvaliteta vazduha. Efikasnost XG kalibracije potvrđena je kroz dosledne rezultate u različitim sezonskim uslovima, pri čemu je platforma dostigla odgovarajući nivo kvaliteta podataka u skladu sa standardima za ocenu kvaliteta merenja. Ovi nalazi otvaraju mogućnost za dalju optimizaciju i širu primenu adaptivnih kalibracionih strategija u sličnim sistemima senzorskih mreža.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao u sklopu istraživanja na istraživačkoj temi „Istraživanja koncentracionih profila, transfera, transformacije i novih tehnika za uklanjanje i remedijaciju perzistentnih zagađujućih supstancija u životnoj sredini“ br. 0602502 i finansijski je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučno-istraživačkog rada u 2025. godini za Institut za nuklearne nauke Vinča, Univerzitet u Beogradu, br. 451-03-136/2025-03/200017, za Fakultet zaštite na radu, Univerzitet u Nišu, br. 451-03-137/2025-03/200148 i za Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, br. 451-03-66/2025-03/200125.

LITERATURA

- [1] WHO Regional Office for Europe, Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: technical report, World Health Organization, Regional Office for Europe, 2021.
<https://www.who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2013-4101-43860-61757> (pristupljeno 10.03.2025.).
- [2] J. Lu, K. Wu, X. Ma, J. Wei, Z. Yuan, Z. Huang, W. Fan, Q. Zhong, Y. Huang, X. Wu, Short-term effects of ambient particulate matter (PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀) on influenza-like illness in Guangzhou, China. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 247 (2023) 114074.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2022.114074>
- [3] A. Aryal, A.C. Harmon, T.R. Dugas, Particulate matter air pollutants and cardiovascular disease: Strategies for intervention, *Pharmacol. Ther.*, 223 (2021) 107890. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2021.107890>
- [4] W. Kihal-Talantikite, P. Legendre, P. Le Nouveau, S. Deguen, Premature Adult Death and Equity Impact of a Reduction of NO₂, PM₁₀, and PM_{2.5} Levels in Paris—A Health Impact Assessment Study Conducted at the Census Block Level, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16 (2019) 16010038. <https://doi.org/10.3390/ijerph16010038>
- [5] Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, *Off. J. Eur. Union*, L 152, 1–44. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0050> (pristupljeno 10.03.2025.)
- [6] Y. Jiang, X. Zhu, C. Chen, Y. Ge, W. Wang, Z. Zhao, J. Cai, H. Kan, On-field test and data calibration of a low-cost sensor for fine particles exposure assessment, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 211 (2021) 111958. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111958>
- [7] J. Li, S.K. Guttikunda, G.R. Carmichael, D.G. Streets, Y.-S. Chang, V. Fung, Quantifying the human health benefits of curbing air pollution in Shanghai, *J. Environ. Manage* 70 (2004) 49–62.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2003.10.007>
- [8] Citi-Sense, Retrieved from <http://www.citi-sense.eu/> 2017. (pristupljeno u aprilu 2023.)
- [9] M. Jovašević-Stojanović, A. Bartonova, D. Topalović, I. Lazović, B. Pokrić, Z. Ristovski, On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter, *Environ. Pollut.*, 206 (2015) 696–704. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.035>
- [10] J. Venkatraman Jagatha, A. Klausnitzer, M. Chacón-Mateos, B. Laquai, E. Nieuwkoop, P. Van der Mark, U. Vogt, C. Schneider, Calibration Method for Particulate Matter Low-Cost Sensors Used in Ambient Air, *Quality Monitoring and Research. Sensors*, 21 (2021) 21123960. <https://doi.org/10.3390/s21123960>

-
- [11] D.B. Topalović, M.D. Davidović, M. Jovanović, A. Bartonova, Z. Ristovski, M. Jovašević-Stojanović, In search of an optimal in-field calibration method of low-cost gas sensors for ambient air pollutants: Comparison of linear, multilinear and artificial neural network approaches, *Atmos. Environ.*, 213 (2019) 640–658. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.028>
- [12] H. Khreis, J. Johnson, K. Jack, B. Dadashova, E.S. Park, Evaluating the Performance of Low-Cost Air Quality Monitors in Dallas, Texas. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19 (2022) 19031647. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031647>
- [13] F. Karagulian, M. Barbieri, A. Kotsev, L. Spinelle, M. Gerboles, F. Lagler, N. Redon, S. Crunaire, A. Borowiak, Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring, *Atmosphere*, 10 (2019) 10090506. <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>
- [14] X. Liu, R. Jayaratne, P. Thai, T. Kuhn, I. Zing, B. Christensen, R. Lamont, M. Dunbabin, S. Zhu, J. Gao, D. Wainwright, D. Neale, R. Kan, J. Kirkwood, L. Morawska, Low-cost sensors as an alternative for long-term air quality monitoring, *Environ. Res.*, 185 (2020) 109438. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109438>
- [15] M.L. Zamora, J. Rice, K. Koehler, One year evaluation of three low-cost PM2.5 monitors, *Atmos. Environ.*, 235 (2020) 117615. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117615>
- [16] P. Nowack, L. Konstantinovskiy, H. Gardiner, J. Cant, Machine learning calibration of low-cost NO2 and PM10 sensors: non-linear algorithms and their impact on site transferability, *Atmos. Meas. Tech.*, 14 (2021) 5637–5655. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5637-2021>
- [17] M. Si, Y. Xiong, S. Du, K. Du, Evaluation and calibration of a low-cost particle sensor in ambient conditions using machine-learning methods, *Atmos. Meas. Tech.*, 13 (2020) 1693–1707. <https://doi.org/10.5194/amt-13-1693-2020>
- [18] V. Tasić, M. Jovašević-Stojanović, S. Vardoulakis, N. Milošević, R. Kovačević, J. Petrović, Comparative assessment of a real-time particle monitor against the reference gravimetric method for PM10 and PM2.5 in indoor air, *Atmos. Environ.*, 54 (2012) 358–364. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.030>
- [19] V. Tasić, T. Apostolovski-Trujić, B. Radović, R. Kovačević, N. Ristić, T. Urošević, V. Kamenović, Merjenje kvaliteta vazduha u aglomeraciji Bor u 2022. godini u periodu rekonstrukcije topionice bakra u Boru, *Bakar*, 48 (2023) 53–62. <https://doi.org/10.5937/bakar2301053T>
- [20] T. Apostolovski-Trujić, B. Radović, R. Kovačević, N. Ristić, T. Urošević, V. Tasić, V. Kamenović, Kvalitet vazduha u gradu Boru u 2023. godini, *Bakar*, 49 (2024) 1–10. <https://doi.org/10.5937/bakar2401001A>

UDK: 614.71:681.325(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2501067T

NAUČNI RAD

Oblast: Inženjerstvo zaštite životne sredine

Primljen: 25.03.2025.

Prerađen: 01.04.2025.

Prihvaćen: 15.04.2025.

ISPITIVANJE KARAKTERISTIKA PRENOSNIH PM MONITORA U LABORATORIJSKIM USLOVIMA

TESTING THE CHARACTERISTICS OF PORTABLE PM MONITORS IN LABORATORY CONDITIONS

Viša Tasić^{1a}, Dušan Topalović², Bojan Radović^{1b}, Vladan Kamenović^{1c},
Renata Kovačević^{1d}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Alberta Ajnštajna 1, 19210 Bor

²Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Vinča

^{1a} E-mail: visa.tasic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6710-6529>

^{1b} E-mail: bojan.radovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4884-1418>

^{1c} E-mail: vladan.kamenovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9476-5378>

^{1d} E-mail: renata.kovacevic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4108-0855>

² E-mail: dusan.topalovic@vin.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5976-963X>

Izvod

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja karakteristika prenosnih PM monitora u laboratorijskim uslovima. Ispitivanje je vršeno u Laboratoriji za primenjenu informatiku i računarsko inženjerstvo Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor u toku februara 2025. godine. Upoređivani su rezultati merenja koncentracija suspendovanih čestica PM_{10} i $PM_{2.5}$ dobijeni primenom referentne gravimetrijske metode merenja sa rezultatima PM monitora koji za određivanje koncentracija suspendovanih čestica koriste jeftine senzore koji rade na principu rasejanja svetlosti. Rezultati merenja koncentracija PM pomoću prenosnih monitora niži su od rezultata dobijenih gravimetrijskom metodom za 20-30%, za obe posmatrane frakcije PM. Koeficijenti korelacije (Pearson-ov) između rezultata PM monitora viši su od 0.98 što ukazuje na izuzetnu podudarnost rezultata merenja PM monitora. Takođe, vršena su i upoređivanja rezultata merenja temperature i relativne vlažnosti vazduha referentnog instrumenta sa rezultatima senzora temperature i relativne vlažnosti koji su ugrađeni u PM monitore. Odstupanja rezultata merenja temperature u odnosu na referentni instrument su u granicama od ± 1 °C, a u slučaju relativne vlažnosti vazduha odstupanja su u granicama od $\pm 5\%$ RH u odnosu na referentni instrument (srednje satne vrednosti).

Gljučne reči: suspendovane čestice, kvalitet vazduha, monitoring

Abstract

This paper presents the results of testing the characteristics of portable PM monitors in laboratory conditions. The test was conducted in the Laboratory for Applied Informatics and Computer Engineering of the Mining and Metallurgy Institute Bor during February 2025. The results of measuring the concentrations of suspended particles PM_{10} and $PM_{2.5}$ obtained using the reference gravimetric measurement method were compared with the results of PM monitors, which use low-cost sensors based on the principle of light scattering to determine the concentrations of suspended particles. The results of measuring PM concentrations using portable monitors are lower than the results obtained using the

gravimetric method by 20-30%, for both observed PM fractions. The correlation coefficients (Pearson's) between the PM monitor results are higher than 0.98, which indicates an exceptional agreement between the PM monitor measurement results. Also, comparisons were made between the results of measuring the temperature and relative humidity of the reference instrument and the results of the temperature and relative humidity sensors installed in the PM monitors. Deviations of temperature measurement results compared with the reference instrument are within the limits of ± 1 °C, and in the case of relative air humidity, the deviations are within the boundaries of $\pm 5\%$ RH compared with the reference instrument (average hourly values).

Keywords: suspended particles, air quality, monitoring

1. UVOD

Ljudi provode znatan deo svog vremena u zatvorenom prostoru, najčešće bez informacija o tome kakav je kvalitet vazduha u unutrašnjem prostoru objekata u kojima borave, i kako taj kvalitet vazduha utiče na kvalitet njihovog života i dužinu životnog veka. U vazduhu u zatvorenom prostoru izolovano je više od 400 hemijskih vrsta u veoma raznolikim koncentracijama. Neke od njih su bezopasne, dok druge mogu ozbiljno uticati na naše zdravlje (neke čak imaju dokazane kancerogene efekte, poput formaldehida, benzena, itd.). Skoro svaki zatvoreni prostor (domaćinstvo, zatvoreni javni prostor, bolnica itd.) u određenoj meri je zagađen suspendovanim česticama (Particulate Matter - PM). Veličina ovih čestica varira od 0,001 μm do 100 μm . Glavna opasnost po ljudsko zdravlje koja se odnosi na izloženost PM dolazi iz činjenice da su čestice prenosnici hemijskih supstanci iz unutrašnjeg vazduha u naša tela. Većina krupnijih čestica se zadržava u nosnim prolazima, dok fine čestice (prečnika manjeg od 2.5 μm , PM_{2.5}) i ultrafine čestice (prečnika između 1 i 100 nm), dospevaju u pluća i mogu prodreti dalje u naš krvotok, što može imati ozbiljne štetne zdravstvene efekte. Hemijske supstance i suspendovane čestice u vazduhu u zatvorenom prostoru značajno utiču na kvalitet unutrašnjeg vazduha (Indoor Air Quality - IAQ), koji zavisi od nekoliko faktora.

Prvo, većina spoljašnjih čestičnih i gasovitih zagađivača prodire unutra, što predstavlja dominantan i uobičajen izvor degradacije IAQ u gotovo svim zatvorenim prostorima. Drugo, prisustvo i aktivnosti stanara (kuvanje, čišćenje, pušenje itd.) takođe značajno doprinose (kratkoročno) koncentraciji PM. Na kraju, emisije iz građevinskih materijala, nameštaja i drugih objekata unutar domaćinstava dodatno pogoršavaju IAQ. Kontaminacija vazduha suspendovanim česticama u Boru uglavnom potiče od emitovanja prašine sa površinskih kopova, rudničkih i flotacijskih jalovišta i emisija otpadnih gasova iz topionice bakra [1,2]. Nova tehnologija topljenja koncentrata bakra (flash smelting) u topionici u Boru promenila je intenzitet i sastav otpadnih gasova iz procesa topljenja [3].

Centar za promociju nauke Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija raspisao je krajem 2024. godine Javni poziv za finansiranje projekata građanskih naučnih istraživanja (GNI). Tim istraživača iz Instituta za rudarstvo

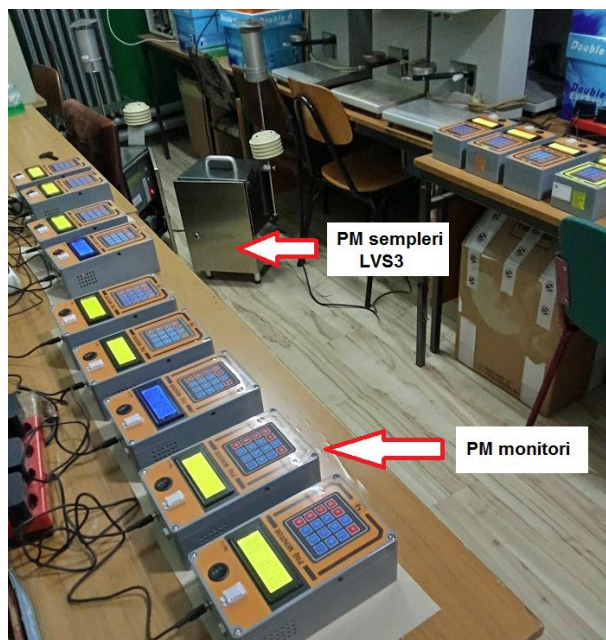
i metalurgiju Bor, sa partnerskom organizacijom civilnog društva Građanska čitaonica Evropa Bor, konkurisao je na ovaj javni poziv sa projektom pod nazivom 'Joint research on air quality in our apartments'. Projekat je odobren za finansiranje i njegova realizacija je počela 1. januara 2025. godine. Pomenuti projekat ima za cilj merenje koncentracija suspendovanih čestica u odabranim stanovima, zajedno sa praćenjem aktivnosti stanara, kao i simultanim praćenjem koncentracija PM u spoljašnjem vazduhu, kako bi se odredio odnos koncentracija PM utrašnjeg i spoljašnjeg vazduha (Indoor/Outdoor - I/O).

Za vreme trajanja projekta (dve kalendarske godine) merenje koncentracija suspendovanih čestica izvršiće se u 60 stanova u Boru. Na osnovu anketiranja zainteresovanih građana, biće odabrani stanovi priključeni na centralni sistem grejanja u kojim su stanari nepušači. Stanovi će se birati tako da svi delovi grada budu ravnomerno zastupljeni. Biraće se stanovi slične starosti i veličine a merenja će biti sprovedena u svakom stanu u trajanju od po 40-50 dana u grejnoj i isto toliko u negrejnoj sezoni. Takvom dinamikom merenja moći će da se ispita postojanje sezonskih razlika u odnosu koncentracija suspendovanih čestica unutar stanova i u ambijentalnom vazduhu. Stanari će učestvovati u projektnim aktivnostima tako što će za vreme merenja u njihovim stanovima voditi dnevnik aktivnosti, što će biti veoma važno za određivanje uticaja njihovih svakodnevnih aktivnosti na koncentracije suspendovanih čestica u stanovima.

Merenja koncentracija suspendovanih čestica u stanovima vršiće se prenosnim PM monitorima koji će rezultate merenja beležiti u svoju internu memoriju svakog minuta. Ovi prenosni PM monitori za određivanje koncentracija suspendovanih čestica koriste jeftine (low-cost) senzore koji rade na principu skretanja svetlosti (light scattering). Iz tog razloga, pre postavljanja prenosnih PM monitora u odabrane stanove, treba izvršiti proveru karakteristika PM senzora upoređivanjem rezultata merenja PM senzora sa rezultatima dobijenim referentnom gravimetrijskom metodom merenja suspendovanih čestica.

2. MATERIJAL I METODE

Uporedna merenja koncentracija PM čestica vršena su u Laboratoriji za primenjenu informatiku i računarsko inženjerstvo u Institutu za rudarstvo i metalurgiju u Boru u periodu od 19.02.2025. do 25.2.2025. godine. Prenosni PM monitori postavljeni su u laboratoriji na visini od 1 m u odnosu na pod, kao što je prikazano na slici 1.



Sl. 1. PM monitori i gravimetrijski uzorkivači postavljeni u laboratoriji za vreme uporednih merenja koncentracija suspendovanih čestica

Prenosni PM monitori koriste se za merenje koncentracija suspendovanih čestica frakcija PM_{10} i $PM_{2.5}$ iz opsega od 0 - 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pomoću senzora Nova SDS011 [4], dok se za merenje temperature (od -10 do $+40^\circ\text{C}$) i relativne vlažnosti (RH) ambijentalnog vazduha (od 10 do 90% RH) koriste senzorski moduli DHT22 [5] koji su sastavni deo prenosnih PM monitora. U centralni deo laboratorije su postavljeni i gravimetrijski uzorkivači (Sven/Leckel LVS3) [6] sa glavama za uzorkovanje suspendovanih čestica frakcija PM_{10} i $PM_{2.5}$ (slika 1). Za uzorkovanje suspendovanih čestica korišćeni su filtri tipa Whatman QMA prečnika 47 mm. Gravimetrijski uzorci uzimani su jednom dnevno (u 17 h). Pre i posle uzorkovanja merena je masa filtera, saglasno proceduri propisanoj standardom SRPS EN12341:2015 [7]. Na osnovu razlike masa eksponiranih i neeksponiranih filtera i poznatog protoka vazduha kroz uzorkivače sračunate su srednje dnevne masene koncentracije suspendovanih čestica PM_{10} i $PM_{2.5}$. Kao referentni instrument za merenje temperature i relativne vlažnosti vazduha u laboratoriji korišćen je etalonirani digitalni termohigrometar MicroLog ProII [8] čiji je opseg rada od -40 do 80°C i od 5 do 95% RH.

3. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

Na osnovu srednje minutnih koncentracija PM_{10} i $PM_{2.5}$, koje su izmerene prenosnim PM monitorima, sračunate su srednje dnevne koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ i upoređene su srednje dnevnom koncentracijama PM_{10} i $PM_{2.5}$ koje su dobijene primenom gravimetrijske metode (označene kao $PM_{10} G$ i $PM_{2.5} G$ u tabeli 1). Primer osnovne statistike pri upoređivanju srednje dnevni koncentracija PM za jedan od testiranih prenosnih PM monitora prikazan je u tabeli 1.

Iz tabele 1 uočava se da su srednje dnevne koncentracije PM koje daje prenosni PM monitor za 12-29% niže u odnosu na koncentracije PM dobijene referentnom gravimetrijskom metodom za obe posmatrane frakcije PM.

Vrednost u koloni "Tačnost" u tabeli 1 prikazuje stepen bliskosti izmerene vrednosti dobijene pomoću prenosnog PM monitora i referentne vrednosti, dobijene pomoću gravimetrijske metode. Tačnost se izračunava pomoću jednačine (1) u kojoj je *REF* koncentracija PM dobijena gravimetrijskom metodom, dok je *Unit* je koncentracija PM dobijena prenosnim PM monitorom.

$$Tačnost = 100 - \left| \frac{REF - Unit}{REF} \right| \times 100 \quad (1)$$

Vrednosti u koloni "Preciznost" u tabeli 1 su izračunate pomoću jednačine (2).

$$Preciznost = \left| \frac{REF - Unit}{Average(REF, Unit)} \right| \quad (2)$$

Kako bi se rezultati merenja prenosnih PM monitora korigovali na osnovu rezultata dobijenih primenom gravimetrijske metode merenja primenjen je neznatno modifikovan metod opisan u referenci [6]. Korekcionni faktor *K* određen je primenom jednačine (3):

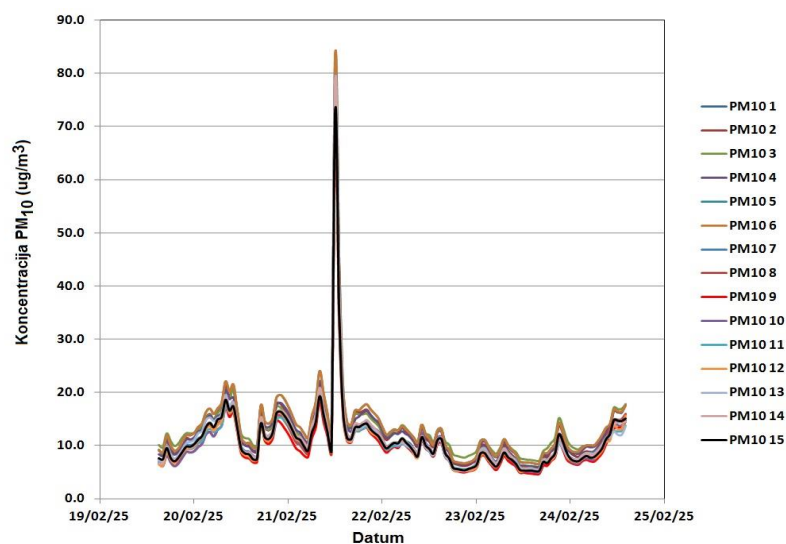
$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{M_i} \quad (3)$$

U jednačini (3) *K* predstavlja faktor korekcije, *n* - broj dana, *G_i* - srednje dnevna vrednost PM koncentracija za *i*-ti dan merenja dobijena primenom gravimetrijske metode, dok je *M_i* - srednje dnevna vrednost koncentracije PM dobijena primenom prenosnog PM monitora za *i*-ti dan merenja. Rezultati merenja prenosnih PM monitora korigovani se tako što se pomnoženi odgovarajućim faktorom korekcije *K*. Na slikama 2 i 3 prikazane su koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ u laboratoriji primenom prenosnih PM monitora.

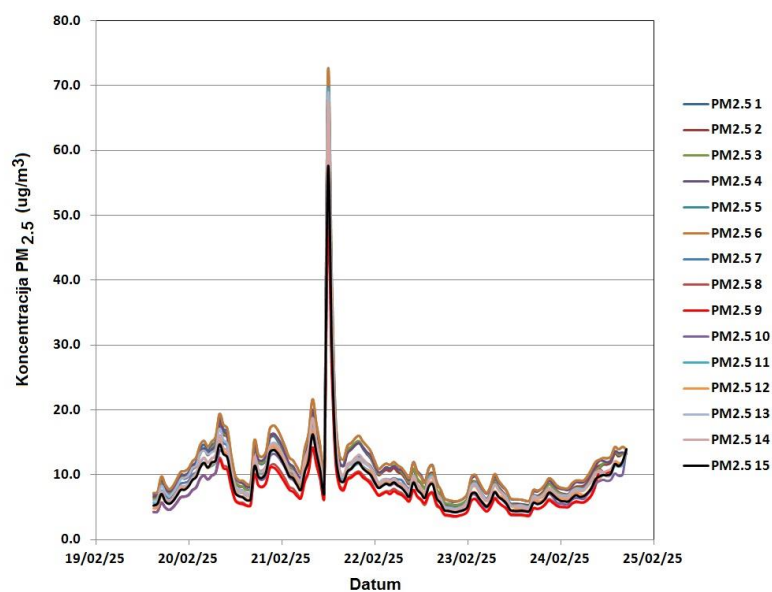
Tabela 1. Osnovna statistika srednje dnevne koncentracije PM tokom testiranja u laboratoriji, na primeru jednog prenosnog PM monitora (K -faktor korekcije rezultata merenja)

Frakcija PM	Datum	PM ₁₀ G [µg/m ³]	PM10 1 [µg/m ³]	Tačnost [%]	Preciznost	K
PM10 in	19.2.	19.0	14.7	77.5	0.25	1.29
PM10 in	20.2.	23.0	18.4	79.8	0.22	1.25
PM10 in	21.2.	16.0	12.6	79.0	0.23	1.27
PM10 in	22.2.	12.0	10.0	83.3	0.18	1.20
PM10 in	23.2.	14.5	12.2	84.1	0.17	1.19
PM10 in	24.2.	13.0	11.1	85.4	0.16	1.17
PM10 in	25.2.	11.5	10.3	89.6	0.11	1.12
	average	15.6	12.8	82.7	0.19	1.21

Frakcija PM	Datum	PM _{2.5} G [µg/m ³]	PM2.5 1 [µg/m ³]	Tačnost [%]	Preciznost	K
PM2.5 in	19.2.	16.0	13.1	81.9	0.20	1.22
PM2.5 in	20.2.	20.0	15.9	79.6	0.23	1.26
PM2.5 in	21.2.	14.0	10.8	77.3	0.26	1.29
PM2.5 in	22.2.	11.0	9.0	81.8	0.20	1.22
PM2.5 in	23.2.	12.0	9.2	77.0	0.26	1.30
PM2.5 in	24.2.	10.2	8.9	87.3	0.14	1.15
PM2.5 in	25.2.	9.3	8.0	86.0	0.15	1.16
	average	13.2	10.7	81.6	0.20	1.23



Sl. 2. Rezultati merenja koncentracija PM10 u laboratoriji
primenom prenosnih PM monitora



Sl. 3. Rezultati merenja koncentracija PM2.5 u laboratoriji
primenom prenosnih PM monitora

Koeficijenti korelacije (Pearson-ov) između rezultata PM monitora prikazani su u tabelama 2 i 3. Visoke vrednosti koeficijenata korelacije ($r > 0.98$) ukazuju na izuzetnu podudarnost rezultata merenja PM monitora.

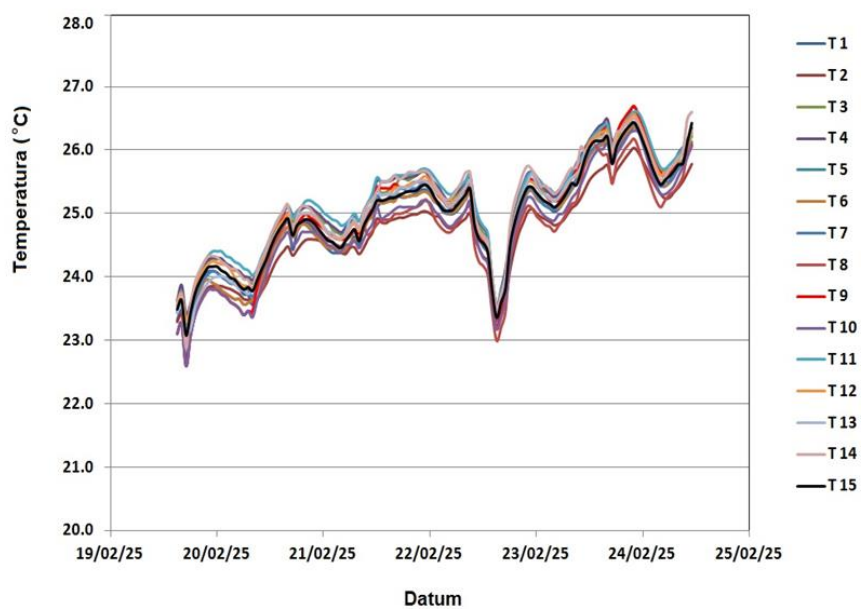
Tabela 2. Koeficijenti korelacije između koncentracija PM₁₀ izmerenih pomoću prenosnih PM monitora

	PM10 1	PM10 2	PM10 3	PM10 4	PM10 5	PM10 6	PM10 7	PM10 8	PM10 9	PM10 10	PM10 11	PM10 12	PM10 13	PM10 14	PM10 15
PM10 1	1.000	0.998	0.997	0.996	0.998	0.998	0.995	0.999	0.998	0.997	0.992	0.998	0.993	0.997	0.999
PM10 2		1.000	0.993	0.995	0.997	0.997	0.992	0.996	0.996	0.994	0.988	0.995	0.990	0.994	0.996
PM10 3			1.000	0.992	0.994	0.994	0.993	0.998	0.997	0.995	0.992	0.994	0.990	0.995	0.997
PM10 4				1.000	0.999	0.999	0.998	0.996	0.997	0.996	0.996	0.998	0.997	0.998	0.996
PM10 5					1.000	1.000	0.998	0.997	0.997	0.996	0.995	0.998	0.997	0.999	0.998
PM10 6						1.000	0.998	0.997	0.997	0.996	0.995	0.998	0.997	0.999	0.998
PM10 7							1.000	0.996	0.996	0.996	0.999	0.997	0.998	0.999	0.996
PM10 8								1.000	0.999	0.997	0.994	0.997	0.994	0.998	0.999
PM10 9									1.000	0.998	0.994	0.997	0.993	0.998	0.998
PM10 10										1.000	0.995	0.997	0.991	0.997	0.997
PM10 11											1.000	0.995	0.996	0.998	0.994
PM10 12												1.000	0.996	0.999	0.999
PM10 13													1.000	0.997	0.995
PM10 14														1.000	0.998
PM10 15															1.000

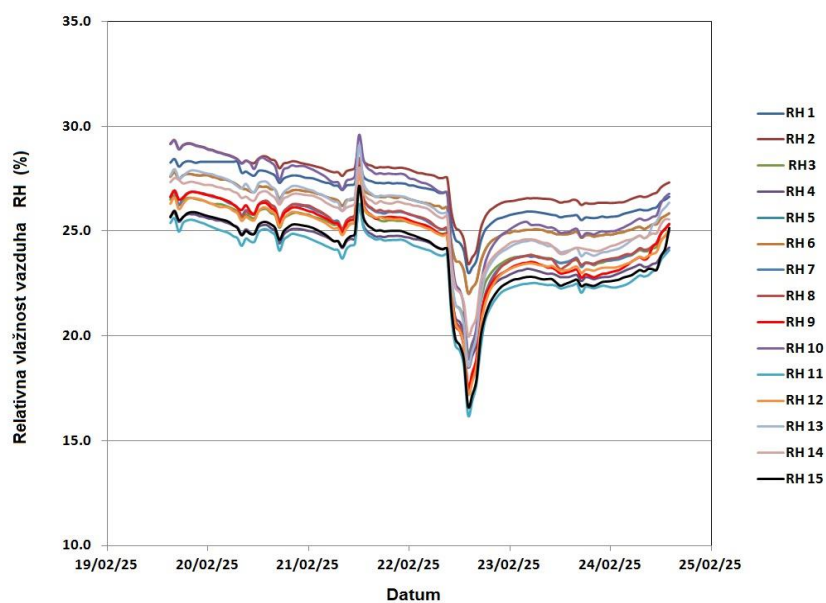
Tabela 3. Koeficijenti korelacije između koncentracija PM_{2.5} izmerenih pomoću prenosnih PM monitora

	PM2.5 1	PM2.5 2	PM2.5 3	PM2.5 4	PM2.5 5	PM2.5 6	PM2.5 7	PM2.5 8	PM2.5 9	PM2.5 10	PM2.5 11	PM2.5 12	PM2.5 13	PM2.5 14	PM2.5 15
PM2.5 1	1.000	0.998	0.998	0.997	0.998	0.998	0.992	0.993	0.993	0.991	0.986	0.995	0.993	0.994	0.997
PM2.5 2		1.000	0.999	0.999	1.000	1.000	0.995	0.995	0.994	0.996	0.990	0.997	0.994	0.997	0.998
PM2.5 3			1.000	0.998	0.999	0.999	0.996	0.996	0.994	0.995	0.992	0.998	0.995	0.997	0.998
PM2.5 4				1.000	0.999	0.999	0.998	0.996	0.994	0.997	0.995	0.998	0.996	0.998	0.998
PM2.5 5					1.000	1.000	0.997	0.996	0.994	0.996	0.993	0.998	0.996	0.998	0.999
PM2.5 6						1.000	0.997	0.996	0.994	0.996	0.993	0.998	0.996	0.998	0.999
PM2.5 7							1.000	0.995	0.992	0.996	0.998	0.998	0.998	0.999	0.997
PM2.5 8								1.000	0.999	0.993	0.992	0.995	0.992	0.996	0.997
PM2.5 9									1.000	0.991	0.989	0.994	0.990	0.994	0.995
PM2.5 10										1.000	0.994	0.997	0.992	0.997	0.995
PM2.5 11											1.000	0.994	0.996	0.997	0.993
PM2.5 12												1.000	0.997	0.999	0.999
PM2.5 13													1.000	0.998	0.997
PM2.5 14														1.000	0.998
PM2.5 15															1.000

U posmatranom periodu vršena su i upoređivanja rezultata merenja temperature i relativne vlažnosti vazduha referentnog instrumenta sa rezultatima dobijenih sa senzora temperature i relativne vlažnosti koji su ugrađeni u PM monitore.



Sl. 4. Rezultati merenja temperature vazduha u laboratoriji



Sl. 5. Rezultati merenja relativne vlažnosti vazduha u laboratoriji

Odstupanja rezultata merenja temperature u odnosu na referentni instrument bila su u granicama od ± 1 °C, a u slučaju relativne vlažnosti vazduha odstupanja su u bila u granicama od $\pm 5\%$ RH u odnosu na referentni instrument (upoređivane su srednje satne vrednosti). Na slikama 4 i 5 prikazane su vrednosti temperature i relativne vlažnosti vazduha u laboratoriji dobijene primenom senzorskih modula DHT22 na prenosnim PM monitorima.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja karakteristika prenosnih PM monitora u laboratorijskim uslovima. Poslednjih godina se sve češće, kao moguća alternativa konvencijalnim sistemima za monitoring kvaliteta vazduha, koriste sistemi monitoringa sa low-cost senzorima i senzorske mreže. Ovaj rad opisuje proveru karakteristika 15 prenosnih PM monitora istog tipa koji koriste senzorski modul Nova SDS011 za merenje koncentracija PM, sa ciljem da se pruži uvid u odstupanje njihovih rezultata merenja u odnosu na referentnu metodu merenja koncentracija PM pre njihovog korišćenja.

Rezultati merenja koncentracija PM pomoću prenosnih monitora niži su od rezultata dobijenih gravimetrijskom metodom za 20-30%, za obe posmatrane frakcije PM. Na osnovu rezultata dobijenih primenom gravimetrijske metode merenja PM određen je koeficijent korekcije koji će biti primenjen pri merenju koncentracija PM u unutrašnjem prostoru. Preciznost merenja koncentracija PM prenosnih PM monitora kada se njihovi rezultati merenja porede sa rezultatima gravimetrijske metode bila je u granicama od 0.1 do 0.3 što je prihvatljivo za instrumente koji se koriste za indikativna merenja. Prosečna tačnost očitavanja prenosnih PM monitora u odnosu na gravimetrijsku metodu merenja uglavnom je bila veća od 80%.

Koeficijenti korelacije (Pearson-ov) između rezultata PM monitora viši su od 0.98 što ukazuje na izuzetnu podudarnost rezultata merenja PM monitora.

Odstupanja rezultata merenja temperature senzorskim modulom DHT22 u odnosu na referentni instrument su u granicama od ± 1 °C, kada se porede srednje satne vrednosti. Odstupanja rezultata merenja relativne vlažnosti vazduha su u granicama od $\pm 5\%$ RH u odnosu na referentni instrument, kada se porede srednje satne vrednosti.

Na osnovu svih prethodno navedenih činjenica, može se zaključiti da su karakteristike testiranih prenosnih PM monitora odgovarajuće za indikativna merenja koncentracija PM u vazduhu u zatvorenom prostoru u uslovima kada je RH<70% i temperatura vazduha T<40 °C.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2025. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-136/2025-03/200052, i za Institut za nuklearne nauke Vinča, Univerzitet u Beogradu, br. 451-03-136/2025-03/200017.

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Centra za promociju nauke, Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji projekta građanskih naučnih istraživanja br. 1383/24 od 18.12.2024. godine.

LITERATURA

- [1] V. Tasić, R. Kovačević, B. Maluckov, T. Apostolovski-Trujić, M. Cocić, B. Matić, M. Šteharik, The content of As and heavy metals in TSP and PM10 near copper smelter in Bor, Serbia, Water Air and Soil Pollution, 228 (2017) 230.
- [2] J. Gonzales-Castanedo, T. Moreno, R. Fernandez-Camacho, A. Sanchez de la Campa, A. Alastuey, X. Querol, J. De la Rosa, Size distribution and chemical composition of particulate matter stack emissions in and around a copper smelter, Atmos. Environ., 98 (2014) 271–282.
- [3] I.V. Kojo, A. Jokilaakso, P. Hanniala, Flash smelting and converting furnaces: A 50 year retrospect, JOM, 52(2) (2000) 57–61.
- [4] <https://microcontrollerslab.com/nova-pm-sds011-dust-sensor-pinout-working-interfacing-datasheet/> (pristupljeno 15.03.2025.)
- [5] V. Tasić, V. Kamenović, B. Radović, N. Mišić, I. Zlatković, Merenje kvaliteta vazduha i termalnog komfora u kancelarijama primenom low-cost senzora i monitora, Bakar, 48(1) (2023) 43-52.
- [6] LVS3/6RV: <https://www.leckel.de/devices/lvs3b/> (pristupljeno 15.03.2025.)

-
- [7] SRPS EN12341:2015; Ambient Air—Standard Gravimetric Measurement Method for the Determination of the PM10 or PM2.5 Mass Concentration of Suspended Particulate Matter., Institute for Standardization of Serbia, Belgrade, Available Online: <https://iss.rs/en/project/show/iss:proj:49389> (pristupljeno 15.03.2025.)
 - [8] http://www.fouriersystems.com/files/download_center/micrologpro_qsg.pdf (pristupljeno 15.03.2025.)

UDK: 622.68(045)=163.41
DOI: 10.5937/bakar2501079V
NAUČNI RAD
Oblast: Elektrotehnika

Primljen: 02.04.2025.
Prerađen: 07.04.2025.
Prihvaćen: 11.04.2025.

NAJČEŠĆI KVAROVI ELEKTRO GENERATORA NA DAMPERIMA BELAZ 75135

THE MOST COMMON FAILURES OF ELECTRIC GENERATORS AT DUMPERS BELAZ 75135

Jovan Vujić¹, Božo Ilić², Nebojša Đenić³

¹Jugoinpekt Beograd A.D. Čika Ljubina 8/V, 11000 Beograd

²Visoka tehnička škola strukovnih studija u Novom Sadu, Školska 1,
21000 Novi Sad

³Narodna Skupština Republike Srbije, Trg Nikole Pašića 13, 11000 Beograd

¹ E-mail: vujicjovan12@mts.rs

² E-mail: ilic@vtsns.edu.rs

³ E-mail: nebojsa.djenic@parlament.rs

Izvod

Cilj ovoga rada je da ukaže na elektro-opremu koja je podložna čestim kvarovima kod dampera BELAZ 75135, 75145 i ostalim tipovima kamiona dampera koji su zastupljeni na našim rudnicima odnosno površinskim kopovima. Prenos snage od dizel motora do pogonskih točkova vrši se pomoću sinhronog generatora (elektro generatora) koji je u elastičnoj vezi sa dizel motorom i pogonskih elektro motora koji su smešteni u reduktoru točkova. Najčešći kvarovi su na elektro generatoru koji proizvodi električnu energiju i kontakterima pomoću kojih se vrši upravljanje prenosom snage od elektro-generatora do elektro motora. Kod elektro generatora kvarovi uglavnom nastaju na rotoru: pregrevanje polova namotaja rotora što izaziva njihovo pregorevanje kao i pucanje samoga pola rotora takozvanog lastinog repa. Uzroci ovih kvarova su uglavnom povećane vibracije samih polova rotora, a posledica su nepravilnog balansiranja i popuštanja kajlova za učvršćenje tokom vremena. Kako su uzroci kvara uglavnom mehaničke prirode poseban akcenat ćemo posvetiti tom problemu.

Ključne reči: damper, elektro generator, pol rotora, vibracije, elektro motor, dizel motor

Abstract

The aim of this paper is to point out the electrical equipment that is subject to frequent breakdowns in BELAZ dumpers 75135, 75145 and other types of dumper trucks that are represented in our mines especially in open-pit mines. The transmission of power from the diesel engine to the drive wheels is carried out using a synchronous generator (electric generator) which is in an elastic connection with the diesel engine and the drive electric motors, which are located in the reducer wheels. The most common failures are on the electric generator that produces electric energy and the contactors with which it is produced management of power transmission from electric generator to electric engine. In the case of electric generators, failures mostly occur on the rotor: overheating of the poles of the rotor winding, which causes their burning as well as

cracking of the so-called dovetail rotor half. The causes of these failures are mainly increased vibrations of the rotor poles themselves and are the result of improper balancing and loosening of the anchor bolts during the time. As the causes of failure are mostly mechanical in nature, we will devote special emphasis to that problem.

Keywords: *dumper, electric generator, rotor pole, vibrations, electric motor, diesel engine*

1. UVOD

Nagli razvoj industrije u XX veku prati i razvoj rudnika koji obezbeđuju sirovine za industriju. Rudnici mogu biti sa podzemnom i površinskom eksploatacijom. Rudnici sa podzemnom eksploatacijom se koriste kada su u pitanju iskopi manje količine rude koja se nalazi na većim dubinama i nepristupačnim terenima. Za dobijanje velikih količina rude površinski rudnici odnosno površinski kopovi su najracionalnije rešenje.

Retko kada je ruda na površini, izuzetak su kamenolomi gde je ruda u gornjim slojevima. U većini slučajeva da bi se došlo do sloja rude mora se skinuti sloj otkrivke odnosno jalovine. Zavisno od vrste i vrednosti rude zavisi koliki je sloj otkrivke ekonomski opravdano skidati. Odnos sloja otkrivke i rude uglja na površinskom kopu Bogutovo Selo u Ugljeviku do odnosa oko 7:1 smatra se ekonomski isplativim.

Za skidanje otkrivke i kopanje rude na površinskom kopu koristi se razna rudarska mehanizacija. Uglavnom su to bageri rotacioni ili sa kašikom. Gde je zemljište rastresito i gde se kopa lignit primat imaju rotacioni bageri. Poznat je sistem BTO (bager-traka-odlagač). Na ostalim površinskim kopovima za kopanje rude koristimo bagere i kamione dampere.

Bageri kopaju rudu ili jalovinu i utovaraju je u kamione dampere koji tu masu transportuju na predviđenu lokaciju [1,2,3].

Na našim prostorima (Ugljevik, Banovići, Gacko, Majdanpek, itd.), danas uglavnom preovladavaju damperi tipa BELAZ iz Belorusije odnosno bivšeg SSSR-a. Pored ovog proizvođača, imamo još proizvođača dampera koji se takođe koriste na površinskim kopovima: Faun, Untring, Terex, Caterpillar, i drugi.

2. ISTORIJA BELAZA

BELAZ (Beloruski automobilski zavod) osnovan je 1948. godine u bivšem SSSR-u današnjoj Belorusiji sa sedištem u Žodzinu [4]. Kompanija radi u skladu sa međunarodnim standardom ISO 9000. Istorija kompanije BELAZ:

- 1948. – izrađena mašina za vađenje treseta
- 1951. – kompanija proširuje delatnost na izradu mašina za izgradnju puteva
- 1958. – kompanija preimenovana u BELAZ i u početku proizvodi kamione MAZ
- 1961. - proizveden prvi 27- tonski BELAZ za kamenolome

- 1990. – proizveden 280 tonski kamion
- 2005. – planovi za proizvodnju kamiona BELAZ – 7600 sa 320 tona nosivosti
- 2006. – isporučen kamion 75600
- 2013. – proizveden najveći damper na svetu BELAZ 75710 sa nosivošću 410 tona

Na slici 1 je BELAZ 75710 najveći damper na svetu. Masa praznog kamiona: 360 t, nosivost: 450 t, dužina: 20,6 m, širina: 10,62 m, visina: 8,17 m, visina utovara: 6,47 m, prečnik okretanja: 19,8 m, kapacitet: 268,3 m³, maksimalna brzina: 64 km/h, brzina pri usponu 10%: 40 km/h, snaga: 1715 kW, ukupni okretni moment: 18626 Nm, dva dizel V-16 motora, broj cilindara motora: 16, potrošnja goriva: dizel 1300 litara/100 km.



Sl. 1. Kamion - damper BELAZ 75710

3. KAMION DAMPER BELAZ 75135

Na površinskom kopu Bogutovo Selo zastupljeni su kamioni damperi BELAZ 75135. Radni vek ovih mašina je 8 – 10 godina posle čega se ne isplati održavati ih, jer su troškovi održavanja znatni u odnosu na prihode koje donose. Ovi kamioni se iz Belorusije dopremaju u delovima i na licu mesta se vrši montaža istih. Moramo konstatovati da gotovo na svim rudnicima postoje ekipe koje su se specijalizovale za ovaj posao kao i za održavanje istih. Takođe, bitno je napomenuti da je cena ovih kamiona na svetskom tržištu mnogo pristupačnija od konkurencije sa zapada, kao i pokrivenost ovih prostora mrežom servisa i nabavkom rezervnih delova. Najveći problem kod kamiona dampera je napraviti gumu koja može da nosi predviđeni teret. Kompanija BELAZ je to uspešno rešila i

zato je u vrhu proizvođača kamiona dampera u svetu. Na slici 2 je prikazan kamion damper BELAZ 75135, a u nastavku i tehnički podaci za ovaj kamion [5].



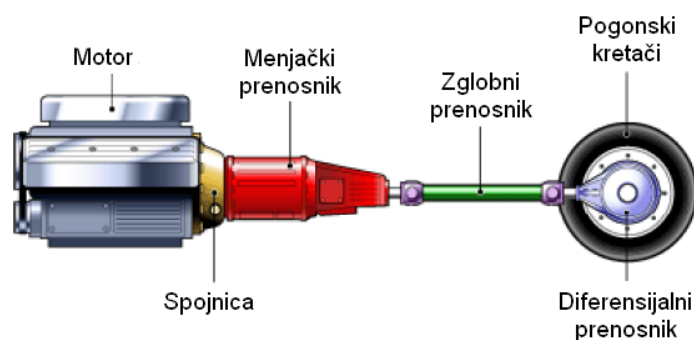
Sl. 2. Kamion damper BELAZ 75135

Tehnički podaci za kamion damper BELAZ 75135:

- masa: 100 t
- nosivost: 110 t
- ukupna masa: 210 t
- nosivost prve osovine: 33 %
- nosivost zadnje osovine: 67 %
- transportna dužina: 11,5 m
- transportna širina: 7 m
- transportna visina: 5,9 m
- visina utovara: 4,8 m
- prečnik okretanja: 13 m
- kapacitet platforme: 71,2 m³
- maksimalna brzina punog kamiona: 42 km/h
- kočioni put kamiona sa punom masom pri brzini 30 km/h: 21 m
- vreme podizanja pune platforme: 20 s
- vreme spuštanja platforme: 18 s
- motor: CUMMINS KTA 38-C
- snaga motora: 895 kW
- maksimalni moment: 4726 Nm
- broj obrtaja pri max. momentu: 1300 o/min
- broj cilindara: 12

4. PRENOS SNAGE KOD KAMIONA DAMPERA

Prenos snage kod klasičnih kamiona vrši se sa dizel motora preko elemenata za prenos snage: spojnice, menjača, reduktora, zglobnog vratila, diferencijalnog prenosnika i poluosovina (a po nekada i reduktora u samoj glavčini točka) na točku. Regulacija brzine kretanja vrši se linearnom promenom broja obrtaja samog dizel motora i stepenastom promenom prenosnog odnosa broja obrtaja u menjaču odnosno reduktoru. Na slici 3 prikazan je klasični prenos snage od motora do točka.



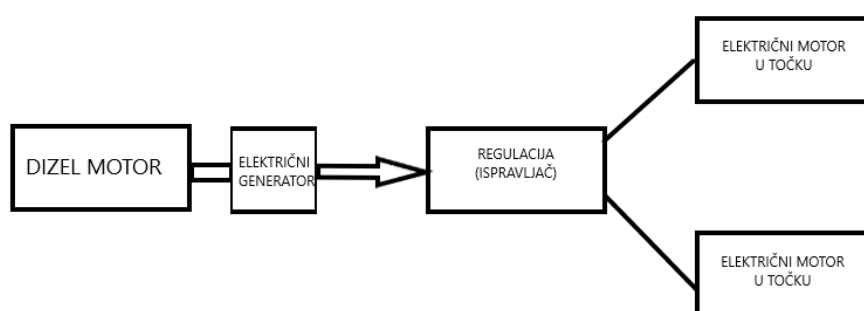
Sl. 3. Klasični prenos snage

Ovakav prenos snage kod velikih kamiona dampera nije funkcionalan. Zbog velikih snaga i obrtnih momenata elementi za prenos snage morali bi biti gabaritni. Prenosni elementi posebno zupčanici teško bi mogli da izdrže nagle udare usled iznenadne promene brzine uzimajući u obzir veliku masu natovarenog kamiona dampera. Takođe, elementi klasičnog prenosa bi zauzimali veliki deo unutrašnjeg prostora samog kamiona dampera, znatno povećavali masu istog, a i servisiranje tih sklopova bilo bi komplikovano posebno prilikom montaže i demontaže istih.

Zbog toga se kod kamiona dampera prišlo prenosu snage pomoću električne energije odnosno primenom električne vuče. Naime dizel motor proizvodi snagu i obrtni moment koji se zatim preko elastične veze prenosi na elektro generator koji proizvodi električnu struju - energiju. Prenos električne energije – struje odnosno snage od električne generatora do pogonskih elektro motora koji su smešteni u samom točku kamiona dampera vrši se pomoću električnih vodova. Dakle, nema gabaritnih klasičnih elemenata za prenos snage. Regulacija brzine kretanja vozila vrši se takođe linearnom promenom brzine obrtanja dizel motora i elektronskom regulacijom broja obrtaja elektro motora u samom točku.

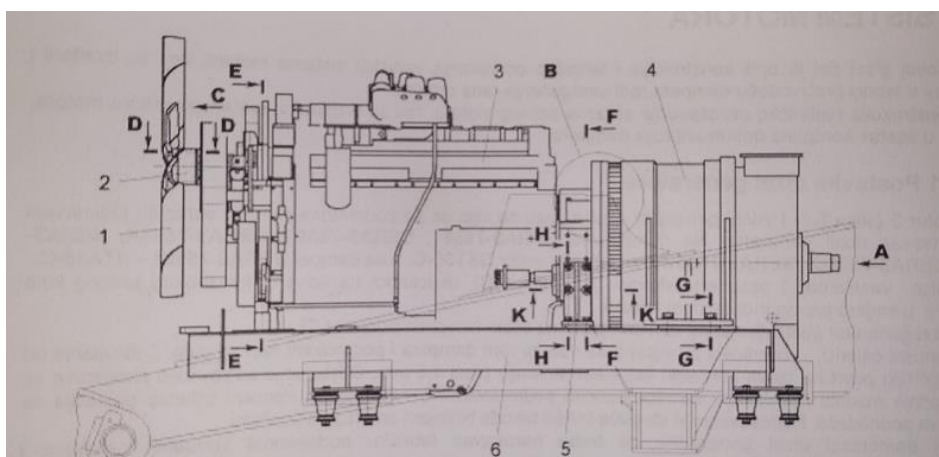
Elektro motori mogu biti za jednosmernu ili naizmeničnu struju. Ako su u pitanju jednosmerni motori tada se naizmenična struja iz elektro generatora ispravlja u jednosmernu struju i tada je neophodan ispravljački sklop.

Regulacija broja obrtaja jednosmernih motora doskora je bila lakša i jednostavnija. Međutim, razvojem energetske elektronike i upotrebom mikroprocesora i kontrolera ta prednost se gotovo izgubila [6,7]. Tako da danas imamo kamione dampere koji koriste istosmerne i naizmjenične elektro motore za pogon vozila. Obe vrste imaju određene prednosti i nedostatke, ali su svakako pouzdaniji od klasičnih prenosnika snage. Na slici 4 je prikazan princip prenosa električne snage kod kamiona dampera.



Sl. 4. Prenos mehaničke i električne snage kod kamiona dampera

Na slici 5 je postavka dizel motora i elektro generatora na samom vozilu.



Sl. 5. Postavka dizel motora i elektro generatora na vozilu: 1. Ventilator, 2. Glavčina ventilatora, 3. Dizel motor, 4. Elektro generator, 5. Nosač, 6. Ram

5. KVAROVI ELEKTRO GENERATORA NA KAMIONU BELAZ 75135

Na kamion damper BELAZ 75135 ugrađen je sinhroni generator sledećih karakteristika:

Proizvođač: УЭТМ - РОССИЯ

Tip: СГД 89/38-8

Broj obrtaja: 1500/1900 o/min

Snaga: 800 kW

Napon: 700/490 V

Struja: 380/510 A

Sprega statora: YY30°

Frekvencija: 6~100/127 Hz

Klasa izolacije: F



Sl. 6. Sinhroni generator СГД 89/38-8 i tablica sa tehničkim podacima

Najčešći kvarovi koji se dešavaju na ovom generatoru su pregorevanje namotaja rotora i pucanje pola rotora takozvanog lastinog repa. Rotor je izrađen od dinamo limova i u njega su ubačeni polovi rotora po njegovom obodu. Razlozi za ove kvarove su uglavnom mehaničke prirode tj. zbog povećanih vibracija. Povećane vibracije često izazivaju oštećenje izolacije na namotajima pola rotora što za posledicu ima pregorevanje istoga. Takođe, povećane vibracije izazivaju i pucanje pola rotora odnosno kidanje dinamo limova u obliku lastinoga repa (slika 7).

Uzrok povećanih vibracija kod fabrički novih rotora je popuštanje kajlova kojima su namotaji rotora učvršćeni, usled eksploatacije. Rotor se vrti brzinom 1500/1900 o/min i to se stalno menja zavisno od broja obrtaja dizel motora kojim upravlja vozač vozila. Velike oscilacije u broju obrtaja negativno utiču na mehaničku čvrstoću rotora. Drugi razlog pojave ovih kvarova je nepravilno balansiranje rotora posle premotavanja polova [8]. Veoma često smo svedoci da rotor koji je premotan ili kod koga je zamenjen pol rotora zbog pucanja lastinog repa ponovo doživi havariju. Proizvođač je predvideo prstenove na kojima se vrši balansiranje, ali naši stručnjaci to ne poštuju ili ne znaju. Zbog toga je

važno poštovati preporuke proizvođača kao i ići na specijalizaciju u ovlašćene ustanove proizvođača ili kod ovlašćenog servisera. Nedavno smo imali slučaj da je rotor balansiran tako da je na osovinu istoga navaren običan komad metala. Takođe, potrebno je znati do koje granice se može rotor balansirati. Ako su vibracije prevelike onda je tu verovatno kriva osovina ili neki drugi razlog tako da nema potrebe vršiti balansiranje nego je potrebno nabaviti novi rotor.

Na slici 7 je pol sinhronog generatora ЦГД 89/38-8.



Sl. 7. Pol sinhronog generatora ЦГД 89/38-8

6. PREVENTIVNE MERE U ODRŽAVANJU ELEKTRO GENERATORA

Kvar na elektro generatoru izaziva dugotrajan period opravke i stavljanje kamiona dampera van funkcije ukoliko nemamo rezervni elektro generator da se odmah zameni. S obzirom na činjenicu da se serije proizvedenih kamiona dampera veoma često menjaju, jer se stalno vrši usavršavanje i modernizacija ovih mašina, veoma teško je imati u rezervi sve potrebne delove. Ako se raspisju tenderi za opravke to zna da potraje i nekoliko meseci. Otklanjanje ovog kvara iziskuje znatna finansijska sredstva, ali daleko veći problem je izbacivanje kamiona dampera iz pogona i profit koji bi on ostvario da je radio. Zastoj rada jednog kamiona pored količine rude ili jalovine koju neće transportovati izaziva i poremećaj ciklusa proizvodnje što je svakako nepovoljno sa aspekta organizacije posla. Da bi se ovo sprečilo potrebno je preduzeti preventivne mere da ne dođe do velikih kvarova na ovom sklopu.

Prvenstveno potrebno je da se kvarovi na ovim sklopovima otklanjaju u ovlašćenim i specijalizovanim ustanovama, a ne u priručnim radionicama. Tenderi za ovakve intervencije bi trebalo na prvom mestu da insistiraju na kvalitetu i referencama, a ne na najnižoj ceni što je gotovo redovna pojava. Takođe, bilo bi poželjno da se u određenim vremenskim periodima izvrši preventivno merenje vibracija na elektro generatoru čime bih se predupredio

veći kvar. Ovo sigurno iziskuje neka finansijska opterećenja i kratkotrajni zastoj mašine u radu, ali preventiva je najbolja preporuka za dugotrajan i kvalitetan rad mašine.

7. ZAKLJUČAK

Kvar na elektro generatoru ima direktne i indirektne posledice. Direktne posledice su znatna finansijska sredstva koja se moraju izdvojiti za nabavku rezervnih delova i opravku samog elektro generatora dok su indirektne posledice daleko veće. Indirektne posledice su da kamion damper nije u funkciji duže vreme pa ne može da ostvaruje predviđeni profit što mu je osnovna svrha. Takođe, ukoliko kamion damper nije u funkciji narušava se koncept poslovanja i organizacija same proizvodnje. Veliki problem predstavlja i situacija kada se kamion damper pokvari van radionice, što je gotovo redovan slučaj, pa imamo problem transporta istog do predviđenog mesta gde se može izvršiti opravka.

Zbog toga je bitno preduzeti preventivne mere da bi se koliko je to moguće sprečili ili ublažili kvarovi na ovim uređajima. Preventivne mere su redovna kontrola samog elektro generatora po uputstvu proizvođača, merenje vibracija na samom generatoru i servisiranje u ovlašćenim ustanovama. Tenderi bi trebalo da na prvom mestu zahtevaju kvalitet, a ne najnižu cenu i privilegovane izvođače, što je gotovo redovna pojava.

LITERATURA

- [1] N. Popović, Naučne osnove projektovanja površinskih kopova, NIRO „Zajednica”- NIŠRO, Oslobođenje”, Sarajevo, 1984.
- [2] N. Popović, Tehnologija površinske eksploatacije ležišta 2, Rudarsko geološki fakultet, Beograd, 1977.
- [3] R. Ahmić, R. Abdulah, Pretovarna i transportna mehanizacija, Studentska Štamparija Univerziteta Sarajevo, 1996.
- [4] www.sr.wikipedia.org/sr-ec/Белоруски_ауromобилски_завод (pristupljeno: 01.04.2025.)
- [5] Tehnička dokumentacija BELAZ 75135
- [6] P. Matić, Električne mašine 1, Akademska misao, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, 2016.

-
- [7] P. Matić, Električne mašine 2, Akademska misao, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, 2022.
 - [8] M. Milovančević, Savremeni koncept vibrodijagnostike rotacionih mašina, Zadužbina Andrejević, 2011.

UDK:621.316.933(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2501089M

NAUČNI RAD

Oblast: Elektroenergetika

Primljen: 22.04.2025.

Prerađen: 03.05.2025.

Prihvaćen: 05.05.2025.

**ANALITIČKI METOD ODREĐIVANJA PARAMETARA IMPULSNIH
PRENAPONA ATMOSFERSKIH PRAŽNENJA**

**THE ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING
THE PARAMETERS OF IMPULSE OVERVOLTAGES
FROM ATMOSPHERIC DISCHARGES**

Nenad Marković^{1a}, Slobodan Bjelić^{2a}, Strahinja Marković^{3a}

¹Akademija strukovnih studija kosovsko metohijska, Odsek Uroševac - Leposavić,
38218 Leposavić, Srbija

²Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Univerzitet u Prištini,
Kneza Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija

³Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Univerzitet u Prištini,
Kneza Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija

^{1a} E-mail: nen.mark74@yahoo.com, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6960-1953>

^{2a} E-mail: slobodanbjelic49@yahoo.com, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5642-8936>

^{3a} Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-7812-8781>

Izvod

Impulzni generatori sa RC kolima predstavljaju osnovu za generisanje udarnih napona koji se koriste u ispitivanjima uređaja visokog napona. U radovima iz tehnike visokih napona, relacije za oblike talasa udarnih napona sadrže poznate parametre impulsnog napona, atmosferskih ili sklopnih prenapona, pomoću kojih se određuju amplitude i vremenske konstante impulsnog prenapona u RC kolima za pražnjenje. U standardima i radovima nema objašnjenja za veći broj nejasnoća kao što je na primer ona za pridruženi broj 1,67 za vreme rasta (rise time) a nedostaje i analiza i egzaktno fizičko i matematičko obrazloženje. Svi parametri prenapona ostaju u domenu definicija i imaju aksiomatski karakter, a formule za projektovanje generatora udarnih napona nisu prikladne. U ovom radu implementirane su formule i dobijena rešenja pomoću kojih se mogu odrediti tačne vrednosti svih parametara i veličina električnog RC kola koje generiše zadati oblik impulsnog napona. Za verifikaciju metoda primenjen je adaptirani deo paketa MATLAB programa pod nazivom psbsurgeovervoltage.mdl.

Ključne reči: analitički metod, atmosferska pražnjenja, generator udarnog napona, impulsni prenaponi, RC kolo

Abstract

Impulse generators with RC circuits form the foundation for producing surge voltages used in high-voltage equipment testing. In high-voltage engineering literature, the expressions for impulse voltage waveforms include known parameters of lightning or switching overvoltages, which are used to determine the amplitudes and time constants of impulse overvoltages in RC discharge circuits. However, both standards and scholarly publications often lack clarification for various

ambiguities-such as the commonly cited factor of 1.67 for rise time-without providing rigorous physical or mathematical justification. All overvoltage parameters are typically defined axiomatically, and the existing formulas for designing impulse voltage generators are often inadequate. This paper presents implemented formulas and derived solutions that enable accurate determination of all parameters and electrical quantities of an RC circuit generating a specified impulse voltage waveform. For method verification, an adapted module of the MATLAB simulation package, psbsurgeovervoltage.mdl, was employed.

Keywords: analytical method, atmospheric discharges, impulse voltage generator, impulse overvoltages, RC circuit

1. UVOD

Udarni naponi koji nastaju usled atmosferskih pražnjenja ili komutacionih procesa u elektroenergetskim sistemima predstavljaju ozbiljnu opasnost po elektroenergetsku i elektronsku opremu. Ovi impulsi karakterišu se kratkim trajanjem i veoma visokom amplitudom, višestruko većom od nominalnog pogonskog napona [1]. U cilju istraživanja njihovog uticaja i provere otpornosti opreme, u laboratorijskim uslovima se koriste generatori udarnih napona, najčešće sa RC kolima različitih redova [2].

Standardizacija u ovoj oblasti, kako u međunarodnim (IEC) tako i domaćim okvirima, obezbeđuje definicije i parametre za standardne oblike talasa ($1,2/50 \mu\text{s}$ za atmosferske i $250/2500 \mu\text{s}$ za sklopne prenapone) (IEC 60060-1:2010) [3]. Međutim, mnoge od ovih definicija imaju aksiomatski karakter i ne nude egzaktno matematičko i fizičko utemeljenje. Primer toga je faktor 1,67, koji se koristi u određivanju vremena trajanja fronta talasa, a za koji u literaturi ne postoje zadovoljavajuća objašnjenja. Slično tome, metodologije za proračun elemenata RC kola često se oslanjaju na aproksimacije ili empirijski utemeljene formule koje ne nude dovoljnu preciznost pri projektovanju generatora udarnih napona [4].

Zbog toga se u ovom radu primenjuje analitički metod za određivanje svih ključnih parametara impulsnog prenapona i njegovih odgovarajućih električnih komponenti u RC kolima. Ovaj pristup, za razliku od uobičajenih empirijskih i numeričkih metoda, omogućava tačno matematičko modelovanje talasa prenapona na osnovu diferencijalnih jednačina II reda sa konstantnim koeficijentima [5]. Primenom teorema o egzistenciji i jednoznačnosti rešenja diferencijalnih jednačina, kao i odgovarajućih karakterističnih funkcija i eksponencijalnih izraza, moguće je dobiti precizne izraze za napone i struje u RC kolima koji generišu zadate oblike udarnih talasa.

Poseban doprinos rada ogleda se u prikazu postupka kojim se, na osnovu poznatih parametara standardnog impulsnog talasa (amplituda, vreme fronta i začelja), određuju vrednosti električnih komponenti kola. Ovako formulisani matematički model verifikovan je simulacionim putem, korišćenjem adaptiranog dela paketa MATLAB programa i modela psbsurgeovervoltage.mdl, što omogućava direktnu primenu rezultata u

laboratorijskim uslovima i pri projektovanju generatora za ispitivanje visokonaponske opreme [6].

Ovim se prevazilaze ograničenja postojećih standardnih modela i pruža se jasna i primenljiva veza između teorijskih modela i praktične realizacije udarnih talasa u ispitivanjima. Time se doprinosi većoj preciznosti, pouzdanosti i racionalnosti u projektovanju i primeni visokofrekventne merno-zaštitne opreme i sistema za ispitivanje.

2. PREGLED LITERATURNIH IZVORA

U dostupnoj literaturi iz oblasti ispitivanja uređaja visokog napona, ista se fokusira na primenu udarnih napona generisanih u impulsnim generatorima sa RC kolima. Standardi, kao što su IEC propisi, definišu osnovne parametre impulsnog napona – amplitude i vremenske konstante – ali često ne pružaju detaljno matematičko i fizičko obrazloženje, ostavljajući određene aspekte, poput faktora 1,67 za vreme rasta, nedovoljno razjašnjene.

U svojoj knjizi **Tehnika visokog napona**, Lj. Milanković se bavio analizom i primenom udarnih napona u ispitivanju uređaja visokog napona, naročito kroz upotrebu generatora impulsnih napona sa RC kolima. On ukazuje na problematičnost postojećih standarda i naučnih radova u kojima se mnogi parametri impulsnog prenapona definišu aksiomatski, bez dublje fizičke i matematičke analize [7].

U svom radu N. Marković i ostali ističu da pored analitičkog modelovanja impulsa visokog napona u ispitivanjima, precizna regulacija i kompenzacija napona u elektroenergetskim mrežama predstavlja ključni faktor za očuvanje stabilnosti i zaštite električne opreme od potencijalno destruktivnih prenapona [8].

Teorijski radovi iz tehnike visokih napona objašnjavaju nastanak kratkotrajnih udarnih napona, koji nastaju usled atmosferskih uticaja ili komutacijskih procesa u mrežama, a koji mogu oštetiti uređaje pri probojima i preskocima. U okviru ovih istraživanja obrađeni su procesi razvoja elektronske lavine i formiranje streamer kanala, kao i modeli proboja koji se baziraju na kombinaciji statističkog rasipnog vremena i vremena za izgradnju provodnog kanala [9].

U svom delu "Electrical Breakdown of Gases", iako Meek prvenstveno opisuje opšte pojave električnog proboja u gasovima, on postavlja i osnove za analitičko modelovanje procesa koji dovode do impulsnih prenapona pri atmosferskim pražnjenjima [10].

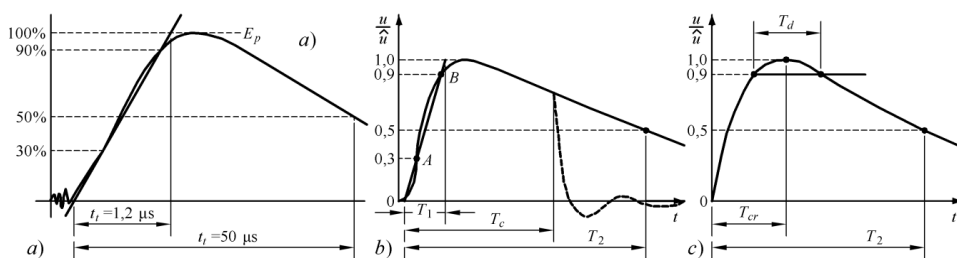
Navedeni radovi predstavljaju samo deo osnove za savremena istraživanja u tehnici visokog napona, gde se analitički pristupi dopunjuju simulacionim metodama kako bi se prevazišle nepreciznosti u tradicionalnim modelima zbog prisustva nelinearnih elemenata.

3. KARAKTERISTIČNE VELIČINE UDARNIH PRENAPONA T_f/T_t

Teorija kanala i zakon Pašena su osnovne teorije o probouju iskrišta: Pražnjenje na široj površini je elektronska lavina, koja dovodi do rasta broja slobodnih elektrona i inicira novu lavinu. U homogenim poljima nastaje više streamer kanala jedan uz drugog, i usled jonizacije razvija se kanal provodne plazme sa visokom temperaturom (leader). Za proboj je potrebno vreme od trenutka pojave probojnog napona do proboja. Vreme proboja je $t' = t_s + t_a$ i sastoji se od statističkog rasipnog vremena t_s i vremena za izgradnju provodnog kanala $t_a = 0_+(ns)$. Statističko rasipno vreme t_s uzima u obzir pojavu početnih slobodnih elektrona, u većini slučajeva je malo jer zavisi od oblika elektroda, njihovog razmaka s i nivoa dovedenog napona. Za $s > 1(mm)$ iznosi $t = 10 - 20(ns)$. Vreme stvaranja provodnog kanala je vreme od pojave lavine do nastanka provodnog kanala. Probij nastaje zbog laganog povećanja jednosmernog napona U_{ps} . Za veće razmake s između elektroda, kritični broj elektrona nastaje kod prve lavine. Na primer, za $s = 25(cm)$ može biti vreme $t_a = 1(\mu s)$.

Atmosferski naponski talas, slika 1.a, karakteriše odnos T_1/T_2 gde je T_1 efektivno vreme fronta (čela) talasa jednako vremenu između relativne vrednosti napona označene tačkom A (30% amplitude) i tačkom B (90% amplitude) uvećano za 1,67 puta, jer vreme trajanja čela talasa traje toliko puta duže od vremena koje odgovara naponima u tačkama A i B, a T_2 je efektivno vreme u kome se napon smanji do polovine vrednosti amplitude. Atmosferski i komutacioni prenaponi dostižu punu vrednost u različito vreme. Atmosferski imaju 'kraće vreme' rasta do maksimuma ($1/50(\mu s)$) a komutacioni prenaponi 'duže vreme' rasta (oko $100/1.000(\mu s)$).

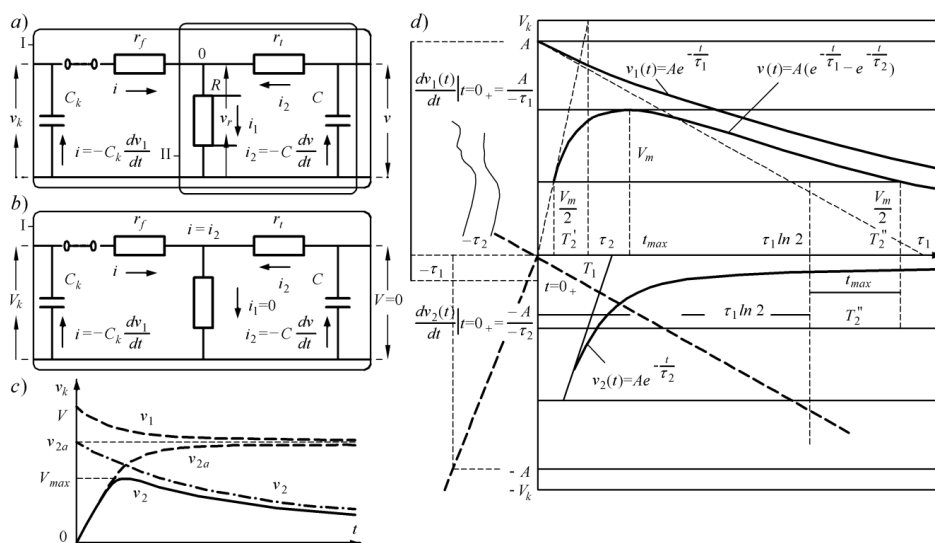
Oblik napona propisuju standardi, slika 1.a,b,c. Standardna vrednost oblika napona je $T_1/T_2 = 1,2/50$, vreme trajanja čela $T_1 = 1,2(\mu s)$ ($\pm 30\%$) i dostizanje $1/2$ amplitude na začelju $T_2 = 50(\mu s)$ ($\pm 20\%$). Oba prenapona imaju znatno manje vreme rasta napona do pune amplitude T_1 , u odnosu na vremena dostizanja $1/2$ amplitude na začelju T_2 .



Sl. 1. Oblici napona: a) stvarni i teorijski, b) udarnog atmosferskog porekla, c) sklopnog prenapona

Rezanje udarnog napona nastaje usled proboja ili preskoka i opisuje vreme rezanja T_c . Talas odrezan sa strane čela naziva se klinasti talas. U laboratorijama, pri ispitivanju odrezanim udarnim naponskim talasom, talasi se veštački režu. Vreme do maksimuma napona T_{cr} kod sklopnih udarnih napona je vreme od početne (0,0) do maksimalne vrednosti napona, slika 1.b. Pored vremena za dostizanje $\frac{1}{2}$ amplitude začelja T_2 , karakteristika je i vreme trajanja maksimuma T_d , u kome napon prelazi 90% amplitude. Ispitni sklopni udarni napon označava se kao talas 250/2.500 vremena: $T_{cr} = 250(\mu s)$ ($\pm 20\%$) i $T_2 = 2500(\mu s)$ ($\pm 60\%$).

Struktura kola za generisanje udarnih napona formira se kao RC kolo prvog, drugog ili višeg reda, u zavisnosti od broja uključenih pasivnih elemenata i iskrišta. Tipičan primer višestepene konfiguracije predstavlja Marksov generator, koji se sastoji od više serijski i paralelno povezanih RC kola sa međusobno sinhronizovanim iskrištima [11], [12]. U RC kolu je kondenzator udarne kapacitivnosti C_k koji detektuje ulazni napon kola V_k . Posle proboja iskrišta opteretiti se kapacitivnost ispitivanog elementa C preko kombinacije prigušenog otpornika r_f , a preko otpornika R dolazi do pražnjenja, slika 2.a,b.



Sl. 2. a) Ekvivalentna šema generatora impulsnog napona, b) šema generatora impulsnog napona u vremenu $t = 0$

U kolu su: C_k – kapacitivnost udarnog kondenzatora, V_k – udarni ulazni napon na C_k u trenutku udara, r_t – otpornost za prigušenje na začelju talasa, R – otpor za pražnjenje, r_f – otpor za prigušenje na čelu talasa, V – napon na ispitivanom uređaju.

U literaturi [13, 14] su date matematičke hipoteze i fizičko objašnjenje za standardni talasni oblik indukovanog atmosferskog talasa napona kao razlike dve eksponencijalne funkcije $v(t) = V_m(e^{-\alpha \cdot t} - e^{-\beta \cdot t})$. Parametar β je pridružen vremenu rasta-čela t_f a parametar α začelja t_t . Ako je $\alpha = 1,4 * e^4 s^{-1}$ i $\beta = 4,5 * e^6 s^{-1}$ stvara se oblik talasa 1,2/50(μs). Eksponencijalni članovi se dobijaju podešavanjem nakon matematičke analize a rezultati imaju prihvatljiv stepen tačnosti. Udarni napon v_2 je vremenski razdvojen na članove za punjenje i deo za pražnjenje. Otpornik za pražnjenje R se uključuje tek posle završenog punjenja. Tako se dobija vremenski tok napona napajanja v_{2a} na kapacitivnosti ispitivanog uređaja. Napon v_1 pada na vrednost $v_1 = v_2$. Kada se priključi otpornik za pražnjenje, dolazi do pražnjenja paralelno spojenih kondenzatora udarne kapacitivnosti C_k i opterećenja C . Napon na otporu opada eksponencijalno. Radi boljeg razumevanja udarni napon v_2 se razlaže na vremenski razdvojeni deo za punjenje i pražnjenje. Otpornik za pražnjenje R_{se} uključuje vreme t posle završenog punjenja. Tako se dobija napon napajanja v_{2a} na kapacitivnost opterećenja. Napon na udarnom kondenzatoru v_1 pada na vrednost $v_1 = v_2$. Ako se priključi otpornik za pražnjenje, dolazi do pražnjenja paralelno spojenih kondenzatora C_k i C . Napon na otporniku za pražnjenje eksponencijalno opada. Udarni napon v_2 se dobija superpozicijom ova dva napona.

Pri punjenju kondenzatora na napon v_{2a} , slika 2.a,b,c, otpornik za pražnjenje je $R = \infty$, a vremenska konstanta je $T_a = r_t \frac{C_k C}{C_k + C}$.

U diferencijalnoj jednačini procesa koji odgovara punjenju vremenska konstanta iznosi:

$$T_a \frac{dv_{2a}}{dt} + v_{2a} = V_1 \frac{C_k}{C_k + C} \quad (1)$$

Vremenski tok napona napajanja je:

$$v_{2a} = V_1 \frac{C_k}{C_k + C} (1 - e^{-\frac{t}{T_a}}), (t = \infty) \quad (2)$$

a konačna vrednost napona je:

$$u_{2a} = V_1 \frac{C_k}{C_k + C} \quad (3)$$

U literaturi [13] se pored grešaka ne navodi razlog ili obrazloženje za tvrdnju da su za dobijanje dobrih rezultata potrebne manipulacije za prezentaciju udarnih prenapona. Prikaz, međutim, ne odgovara stvarnosti a činjenice su osnov za važan zaključak:

Hipoteza o rešenju oblika $v(t) = V_m(e^{-\alpha \cdot t} - e^{-\beta \cdot t})$ nije korektna i nema adekvatno fizičko objašnjenje.

4. ANALITIČKI METOD ODREĐIVANJA TAČNIH RELACIJA ZA NAPONE ILI STRUJE U RC KOLU DRUGOG REDA

Analitičkim metodom se može dobiti tačna relacija za oblik atmosferskog udarnog talasa napona i struje sa RC kolom [15]. Dobijeni izraz predstavlja osnovu za projektovanje generatora koji proizvodi takav oblik udarnog napona jednostavnim izborom RC kola drugog reda sa minimalnim brojem otpornika i kondenzatora.

Ovde je prikazan primer izbora RC kola drugog reda zadatih vrednosti i parametara talasa napona ili struje [16, 17]. Metod je zasnovan na Lemi tehničke prirode [18], koja se ovde koristi za određivanje oblika prenapona (Lema-pomoćna teorema je etapa u dokazu složenije teoreme o egzistenciji (Cauchy)): Ako je $f(x, y)$ neprekidna funkcija oblasti u okolini tačke $M(x_0, y_0)$ za $|x - x_0| < a$ i $|y - y_0| < b$ onda postoji bar jedno rešenje jednačine $y' = f(x, y)$ definisane i neprekidne u intervalu oko tačke $x = x_0$, koje za $x = x_0$ ima vrednost $y = y_0$. Ako je, u oblasti ispunjeno $|f(x, y) - f(x_0, y_0)| < N(y_1 - y_2)$, tj. za Lipshitz-ov uslov kada N ne zavisi od x, y_1, y_2 , onda je to rešenje jednoznačno i neprekidna funkcija od $y = y_0$.

Lipshitz-ov uslov je uvek ispunjen ako $y = f(x, y)$ ima u toj oblasti ugrađen diferencijal df/dy .

U primerima gde uslovi Cauchy nisu ispunjeni koristi se uslov Lipshitz-a. Za singularne tačke u kojima je $(0,0)$ izolovana tačka, narušeni su uslovi Cauchy-jeve teoreme, ali u ma kojoj drugoj tački oni su ispunjeni a ponašanje krivih oko te tačke zavisi od korena karakteristične jednačine: Ako kroz tačku $M(x, y)$ prolazi graf rešenja $y = \phi(x)$ diferencijane jednačine $y' = f(x, y)$, koeficijent smera tangente na graf u toj tački (jednak dy/dx) se može odrediti direktno iz diferencijalne jednačine i tako diferencijalna jednačina u svakoj tački određuje smer tangente na graf rešenja. Taj smer je jednak sa smerovima svih pravih koje su u polju u ravni paralelne sa tom tangentom na graf u zadatoj tački. Sa matematičkog aspekta, ostale prave sem nje, nisu tangente i ostali smerovi koji pripadaju ostalim pravama ne ispunjavaju uslov da su prvi izvodi grafa u zadatoj tački jer nisu ispunjeni Cauchy-jevi uslovi. Te uslove mora da zadovolji i rešenje linearne diferencijalne homogene jednačine II reda sa konstantnim koeficijentima:

$$ay'' + by' + cy = 0 \quad (4)$$

i pridružene karakteristične jednačine:

$$a\lambda^2 + b\lambda + c = 0 // a \frac{d^2v}{dt^2} + b \frac{dv}{dt} + cv = 0 \quad (5)$$

Rešenje po pretpostavci sadrži dve eksponencijalne komponente: $y_1(x) = Ae^{\lambda_1 x}$ i $y_2(x) = Be^{\lambda_2 x}$ i zavisno od koeficijenata, tj. od rešenja za korene karakteristične jednačine razlikuju se tri slučaja:

1. λ_1 i λ_2 su realna i različita, onda je: $y = y_1(x) + y_2(x) = Ae^{\lambda_1 x} + Be^{\lambda_2 x}$

Ako je zbog početnih uslova ($B = -A$) tada je:

$$y = y_1(x) + y_2(x) = A(e^{\lambda_1 x} - e^{\lambda_2 x}) \quad (6)$$

2. λ_1 i λ_2 su realna i jednaka, onda je:

$$y = y_1(x) + y_2(x) = Ae^{\lambda_1 x} + xBe^{\lambda_2 x} \quad (7)$$

3. $\lambda_1 = \lambda_{Re} + i \cdot \lambda_{Im}$ i $\lambda_2 = \lambda_{Re} - i \cdot \lambda_{Im}$ su konjugovano kompleksni brojevi sa dva realna i jednaka dela, onda je:

$$y(x) = y_1(x) + y_2(x) = Ae^{\lambda_{Re} \cos \lambda_{Im}} \cdot e^{\lambda_{Re} \sin \lambda_{Im}} \quad (8)$$

U radu je primenjena Cauchy (Lipschitz)-teorema o egzistenciji rešenja diferencijalne jednačine I reda i princip ekvivalentnosti funkcije i njenog prvog izvoda. Analiza se odnosi samo za prvu komponentu iako važi i za drugu komponentu. Funkcija je ekvivalentna svom izvodu ako se može dobiti integracijom iz njenog izvoda. Oblik parametara u jednačini (6) pokazuje da su koreni λ_1 i λ_2 realni i različiti; prvi izvod y_1 prve komponente u tački x određuje se integracijom uz uslov ekvivalencije iz prvog izvoda funkcije $y(x)$:

$$\begin{aligned} y_1'(x) &= dy/dx = A\lambda_1 e^{\lambda_1 x} \\ y_1(x) &= \int_{x_0}^x A\lambda_1 e^{\lambda_1 x} dx = \left| Ae^{\lambda_1 x} \right|_{x_0}^x = Ae^{\lambda_1 x} - Ae^{\lambda_1 x_0} \\ y_2(x) &= \int_{x_0}^x B\lambda_2 e^{\lambda_2 x} dx = \left| Be^{\lambda_2 x} \right|_{x_0}^x = Be^{\lambda_2 x} - Be^{\lambda_2 x_0} \\ y(x) &= y_1(x) + y_2(x) = (Ae^{\lambda_1 x} - Ae^{\lambda_1 x_0}) + (Be^{\lambda_2 x} - Be^{\lambda_2 x_0}) \\ y &= y_1 + y_2 = A(e^{\lambda_1 x} - e^{\lambda_1 x_0}) + B(e^{\lambda_2 x} - e^{\lambda_2 x_0}) \\ y' &= y_1' + y_2' = A\lambda_1(e^{\lambda_1 x} - e^{\lambda_1 x_0}) + B\lambda_2(e^{\lambda_2 x} - e^{\lambda_2 x_0}) \end{aligned} \quad (9)$$

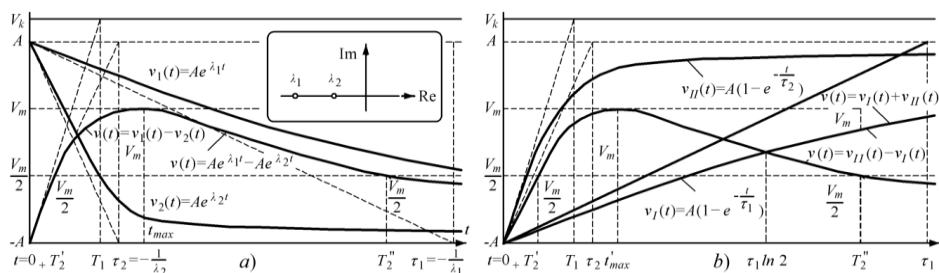
Rešenje za $y(x)$ se dobija za pretpostavljene početne uslove/početak procesa, kada je vrlo često $y_{x=x_0=0} = 0$, a postoji prvi izvod i on je jednak nekoj konstanti, tj. $y'(x)_{x=x_0} = \text{const}$. Tada je $B = -A$ i iz prethodne analize sledi izraz matematički kompletnijeg i korektnog rešenja homogene diferencijalne jednačine II reda koje zadovoljava teoremu o egzistenciji rešenja i uslov ekvivalencije:

$$y(x) = y_1(x) + y_2(x) = A[(1 - e^{\lambda_1 x}) - (1 - e^{\lambda_2 x})] = A(e^{\lambda_1 x} - e^{\lambda_2 x}) \quad (10)$$

To rešenje zadovoljava homogenu diferencijalnu jednačinu i na prvi pogled nema nikakve razlike u odnosu na rešenje u jednačini (6):

$$\begin{aligned}
 y'(x) &= y'_1(x) + y'_2(x) = -A[\lambda_1 e^{\lambda_1 x} - \lambda_2 e^{\lambda_2 x}] \\
 y''(x) &= y''_1(x) + y''_2(x) = -A[\lambda_1^2 e^{\lambda_1 x} - \lambda_2^2 e^{\lambda_2 x}] \\
 -aA[\lambda_1^2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_2^2 e^{\lambda_2 t}] - bA[\lambda_1 e^{\lambda_1 t} - \lambda_2 e^{\lambda_2 t}] + cA[(1 - e^{\lambda_1 x}) - (1 - e^{\lambda_2 x})] &= 0 \\
 -A[a\lambda_1^2 + b\lambda_1 + c]_{=0} \cdot e^{\lambda_1 t} - [a\lambda_2^2 + b\lambda_2 + c]_{=0} \cdot e^{\lambda_2 t} + cA[1 - 1]_{=0} &= 0
 \end{aligned} \tag{11}$$

Dakle, dokazano je da postoji i drugo moguće tačno rešenje koje zadovoljava diferencijalnu jednačinu II reda koje je i matematički korektno a u analitičkoj formi ima prednosti za određivanje važnijih parametara u kolu impulsnog generatora za simulaciju atmosferskih ili komutacionih prenapona. Rešenje izgleda komplikovanije u odnosu na poznato i korišćeno rešenje u jednačini (10) za rešavanje prelaznih procesa a oblici grafova komponenti takođe su jako različiti za ta dva slučaja što se vidi na slici 3.a,b.



SI. 3. Dijagram dobijen uz primenu: a) klasičnog metoda, b) novog postupka

U nastavku je opšta nezavisno promenljiva x zamenjena nezavisnom vremenski promenljivom $x \equiv t$ a zavisno promenljiva y vremenski promenljivom vrednošću, tj. veličinom napona $y \equiv v$ nakon čega su dobijene relacije:

$$v(t) = v_1(t) + v_2(t) = A[(1 - e^{\lambda_1 t}) - (1 - e^{\lambda_2 t})] = A(e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \tag{12}$$

Kao što je u prethodnom delu rada rečeno ovde je realizovan primer gde se analitičkom metodom mogu dobiti formule za oblikovanje tranzijentnog atmosferskog ili sklopnog udarnog napona u RC kolu.

5. MODEL UDARNOG NAPONA U IZABRANOM RC ELEKTRIČNOM KOLU DRUGOG REDA

U analitičkom modelu se tačnim metodom određuju parametri oblika talasa udarnog napona koji se mogu dobiti iz kola generatora impulsnog napona II reda sa RC parametrima. Naponi/struje se određuju iz diferencijalne jednačine I reda sa konstantnim koeficijentima. Izabrano je TR kolo sa C_k parametrom na

ulazu kola, na slici 1, a usvojene vrednosti struje definišu parametri kapacitivnosti C . Pri određivanju parametara kola generatora impulsnih napona drugog reda, slika 2.a,b u kome nastaje pražnjenje, treba odrediti vremenske konstante talasa impulsnog napona T_1 i T_2 po IEC standardu [3] i vrednostima: τ_f – efektivno vreme trajanja čela talasa i τ_t – vreme trajanja začelja. Za dobijanje rešenja pomoću kola prvog reda koristili su se približni metodi modelovanja impulsnih oblika napona/struja sa dva eksponencijalna člana, zadatim naponom na ulazu RC kola sa vremenskim konstantama T_1 i T_2 i vremenskim parametarima τ_f i τ_t .

Atmosferski naponski i strujni talasi imaju različite oblike. Izraz sa dva eksponencijalna člana kao rešenje jednačine proizilazi iz matematičkog principa za rešavanje homogene diferencijalne jednačine II reda. Hipoteza zahteva proveru jer neki delovi hipoteze o dva eksponencijalna člana su protivrečni teoremi o egzistenciji rešenja (Cauchy i Lipshitz uslovima) i principu ekvivalencije funkcije i njenog izvoda. Takođe nije poznat trenutak vremena u kome nastaje proboj iskrišta. Događaje u kolu u vezi sa trenutkom proboja iskrišta određuju parametri kola, dovedeni napon V_k i prvi izvod naponskog odziva RC kola i karakteristike iskrišta. Za određivanje analitičkog modela i relevantnih parametara i vremenskih konstanti impulsnog udarnog naponskog talasa drugog reda, pretpostavljena je ekvivalentna šema na slici 1.a.

Atmosferski naponski talas se predstavlja kao razlika dve eksponencijalne funkcije i vremenskih konstanti T_1 i T_2 :

$$v(t) = -A \cdot (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}) \quad (12)$$

Za RC kolo drugog reda sa generatorom impulsnog napona na slici 1.a je:

$$i = -C_k \frac{dv_k}{dt} \quad i_2 = -C \frac{dv}{dt} \quad (13)$$

i mogu se prema II Kirhofovom zakonu za konturu I napisati sledeće diferencijalne jednačine:

$$\begin{aligned} v_k - r_f i + r_t i_2 - v &= 0, \quad v_k = r_f i - r_t i_2 + v \\ v_k - r_f (-C_k \frac{dv_k}{dt}) + r_t (-C \frac{dv}{dt}) - v &= 0, \quad v_k = v - r_f C_k \frac{dv_k}{dt} + r_t C \frac{dv}{dt} \end{aligned} \quad (14)$$

Diferenciranjem po vremenu jednačinu (14), dobija se:

$$\frac{dv_k}{dt} = \frac{dv}{dt} - r_f C_k \frac{d^2 v_k}{dt^2} + r_t C \frac{d^2 v}{dt^2} \quad (15)$$

Za konturu II važe sledeće jednačine:

$$v_R + r_t i_2 - v = 0, \quad R i_1 + r_t i_2 - v = 0, \quad v_R = v - r_t i_2$$

$$i = -C_k \frac{dv_k}{dt} \quad i_2 = -C \frac{dv}{dt} \quad i_1 = + \frac{r_t C}{R} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R} \quad (16)$$

Po I Kirhofovom pravilu sledi:

$$i = i_1 - i_2, \text{ tj. } -C_k \frac{dv_k}{dt} = \frac{r_t C}{R} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R} + C \frac{dv}{dt} \quad (17)$$

Pored početnog uslova $v(t)_{t=0+} = 0$, treba definisati i početni uslov $\frac{dv(t)}{dt} \big|_{t=0+}$ tako da zadovolji jednačinu (14), tj.:

$$v_k - r_f(-C_k \frac{dv_k}{dt}) + r_t(-C \frac{dv}{dt}) - v_{v=0} = 0, \text{ odakle je } -C_k \frac{dv_k}{dt} = \frac{v_k}{r_f} \pm \frac{r_t}{r_f} C \frac{dv}{dt} \quad (18)$$

Jednačina (17) uz početni uslov $v(t)_{t=0+} = 0$, glasi:

$$-C_k \frac{dv_k}{dt} = \frac{r_t C}{R} \frac{dv}{dt} + \frac{v_{v=0}}{R} + C \frac{dv}{dt}, \text{ tj. } -C_k \frac{dv_k}{dt} = \frac{r_t C}{R} \frac{dv}{dt} + C \frac{dv}{dt} \quad (19)$$

Izjednačavanjem jednačina (18) i (19) i rešavanjem izraza dobija se relacija za početni uslov $\frac{dv(t)}{dt} \big|_{t=0+}$:

$$\frac{v_k}{r_f} \pm \frac{r_t}{r_f} C \frac{dv}{dt} \big|_{t=0+} = C(1 + \frac{r_t}{R}) \frac{dv}{dt} \big|_{t=0+} \text{ ili } v_{k t=0+} = r_f C(1 + \frac{r_t}{R} + \frac{r_t}{r_f}) \frac{dv}{dt} \big|_{t=0+} = V_k \quad (20)$$

Ako se uvede nova vrednost koja po definiciji odgovara trajanju čela talasa $a = r_f C(1 + \frac{r_t}{R} + \frac{r_t}{r_f}) = T_1$, dobija se:

$$\frac{dv}{dt} \big|_{t=0+} = \frac{v_{k t=0+}}{T_1 T_1 = a} = \frac{V_k}{T_1} = \frac{V_k}{a} \quad (21)$$

Vreme čela talasa $T_1 = r_t C$ je definisano standardom IEC 60071-1 [19], kao vremensko trajanje čela talasa.

Diferenciranjem jednačine (16) dobija se:

$$\frac{dv_k}{dt} = -[\frac{r_t C}{R C_k} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R C_k} + \frac{C}{C_k} \frac{dv}{dt}] \quad (22)$$

Diferenciranjem jednačine (17) dobija se:

$$-C_k \frac{dv_k}{dt} = \frac{r_t C}{R} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R} + C \frac{dv}{dt} \big|_{\partial t}, -C_k \frac{d^2 v_k}{dt^2} = \frac{r_t C}{R} \frac{d^2 v}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{dv}{dt} + C \frac{d^2 v}{dt^2} \quad (23)$$

Povećanjem reda diferencijalne jednačine (22) za jedan, dobija se:

$$-\frac{d^2 v_k}{dt^2} = \frac{r_t C}{R C_k} \frac{d^2 v}{dt^2} + \frac{1}{R C_k} \frac{dv}{dt} + \frac{C}{C_k} \frac{d^2 v}{dt^2} \quad (24)$$

a zatim posle izjednačavanja i sređivanja jednačina (17) i (22) dobija se:

$$-\left[\frac{r_t C}{RC_k} \frac{dv}{dt} + \frac{C}{C_k} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{RC_k}\right] = \frac{dv}{dt} + r_f C_k \left[\left(\frac{r_t C}{RC_k} + \frac{C}{C_k}\right) + \frac{r_t C}{r_f C_k}\right] \frac{d^2 v_k}{dt^2} + \frac{r_f}{R} \frac{dv}{dt} \quad (25)$$

Relacija (25) se može napisati u implicitnom obliku:

$$r_f C \left[1 + \frac{r_t}{R} + \frac{r_t}{r_f}\right] \frac{d^2 v_k}{dt^2} + \left[1 + \frac{r_f}{R} + \left(1 + \frac{r_t}{R}\right) \frac{C}{C_k}\right] \frac{dv}{dt} + \frac{1}{RC_k} v = 0 \quad (26)$$

Diferencijalna jednačina koja opisuje impulsni prenapon prema šemi na slici 1.a je:

$$r_f C \left[1 + \frac{r_t}{R} + \frac{r_t}{r_f}\right] \frac{d^2 v}{dt^2} + \left[1 + \frac{r_f}{R} + \frac{C}{C_k} \left(1 + \frac{r_t}{R}\right)\right] \frac{dv}{dt} + \frac{1}{RC_k} v = 0 \quad (27)$$

Jednačine (14 i 27) nisu ekvivalentne i dokazuje se da svako rešenje jednačine (14) je istovremeno i rešenje jednačine (27), ali i obratno, tj. svako rešenje jednačine (27) ne mora da bude rešenje jednačine (14). Rešenja jednačine (27) mogu da budu i rešenja izraza (14) ako su ispunjeni početni uslovi $v(t)_{t=0+} = 0$ i uslov $dv(t)/dt|_{t=0+} \neq 0$, tj. da je prvi izvod funkcije tangenta originala funkcije u bilo kojoj tački sa koordinatama $(0_+ < t < \infty)$. Rešenje diferencijalne jednačine II reda sa konstantnim koeficijentima (a, b, c) i eksponencijalne funkcije $(e^{\lambda t})$ određuje karakter korena pripadajuće karakteristične jednačine:

$$a \frac{d^2 v}{dt^2} + b \frac{dv}{dt} + cv = 0, \frac{d^2 v}{dt^2} + \frac{b}{a} \frac{dv}{dt} + \frac{c}{a} v = 0 \quad (28)$$

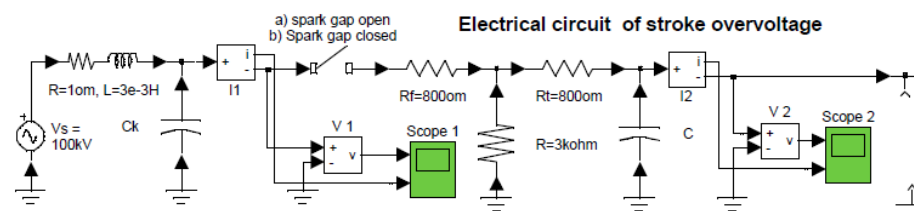
$$a = r_f C \left[1 + \frac{r_t}{R} + \frac{r_t}{r_f}\right], b = \left[1 + \frac{r_f}{R} + \frac{C}{C_k} \left(1 + \frac{r_t}{R}\right)\right], c = \frac{1}{RC_k} \quad (29)$$

6. REZULTATI SIMULACIJE U PROGRAMU MATLAB

Oblik udarnog napona određen je simulacijom u RC kolu, šema data na slici 4, i sadrži sledeće parametre: $V_k = 100(\text{kV})$, $C_k = 15 \cdot 10^{-3}(\mu\text{F})$, $r_f = r_t = 800(\Omega)$, $C = 10^{-3}(\mu\text{F})$, $R = 3000(\Omega)$.

Test: Parametri električnog izvora su: $U = 100(\text{kV})$, $f = 2(\text{Hz})$. Pri simulaciji procesa u adaptiranom delu paketa Matlab programa pod nazivom psbsurgeovoltage.mdl pri zadatoj frekvenciji od $f = 0(\text{Hz})$ (DC) nije bilo odziva u RC kolu u oba slučaja; nisu dobijeni dijagrami napona V_1 , i V_2 , i struja I_1 i I_2 . Za simulaciju je bila potrebna minimalna frekvencija od $f = 2(\text{Hz})$.

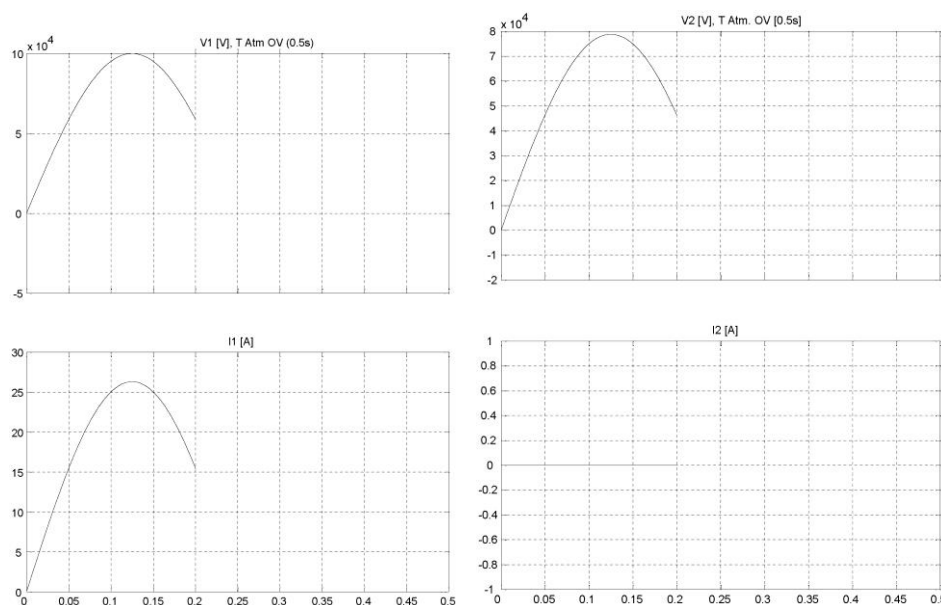
U cilju provere izvedenih analitičkih jednačina izvedena je simulacija u MATLAB programu, slika 4. Rezultati i dijagrami na slikama 5 i 6, koji prikazuju promene struja i napona, kao i primenu kola generatora za oblikovanje udarnog napona, saglasni su sa zadatim vrednostima u simulacionom modelu.



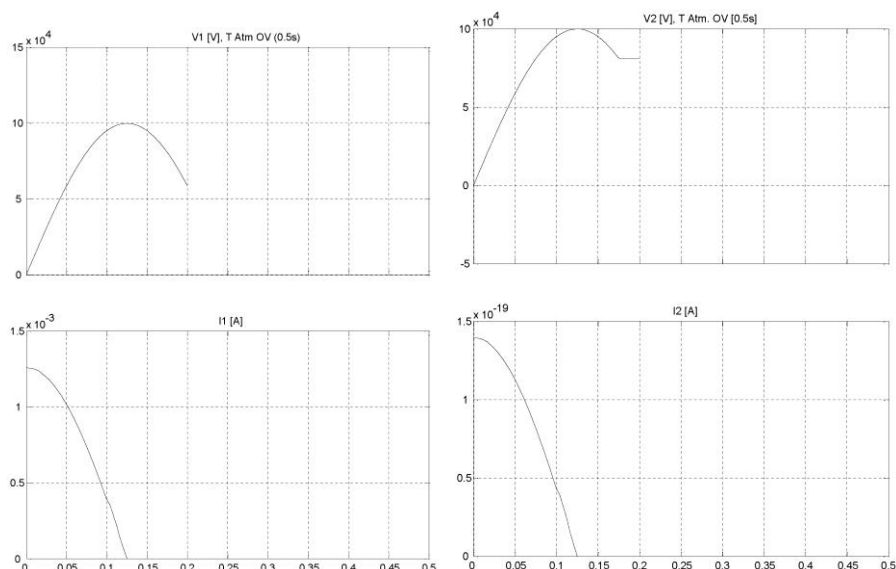
Sl. 4. Šema i parametri RC kola generatora udarnog napona za simulaciju dve pozicije u iskrištu: a) bez proboja, b) proboj napona u iskrištu. Na Scope1 detektuje se napon V_1 , struja I_1 , i na Scope2 napon V_2 , struja I_2

Pri ispitivanju posledica atmosferskih i komutacionih udarnih prenapona, u simulacijama se koriste modeli generatora impulsnih napona sa RC kolima, čiji pasivni elementi imaju standardizovane vrednosti koje direktno utiču na oblik udarnog napona.

Prema definisanim standardima IEC 62305-1 [20], teorijske formule služe za dimenzionisanje RC kola generatora udarnih napona, iako su definicije vremenskih konstanti i parametara pasivnih elemenata zasnovane na aksiomatskim postavkama, bez detaljnog fizičkog obrazloženja.



Sl. 5. Poređenje dijagrama struje i napona u dva položaja iskrišta u otvorenom RC kolu generatora za proizvodnju atmosferskih prenapona: napon V_1 , struja I_1 i napon V_2 , struja I_2



Sl. 6. Poređenje dijagrama struje i napona u dva položaja iskrišta u zatvorenom RC kolu generatora za proizvodnju atmosferskih prenapona:
napon V_1 , struja I_1 i napon V_2 , struja I_2

Za razliku od klasičnog pristupa, u ovom radu je razvijen matematički model koji, primenom formalne analitičke procedure, omogućava precizno određivanje vremenskih konstanti, parametara RC kola i rezultujućeg oblika udarnog napona. Dobijene jednačine za napone i struje sadrže eksplicitne izraze sa parametrima pasivnih elemenata, a validnost modela potvrđena je dijagramima generisanim simulacijom u adaptiranom delu paketa Matlab programa pod nazivom psbsurgeovervoltage.mdl.

Model je pogodan za simulaciju standardizovanih oblika udarnih prenapona, kako atmosferskih tako i komutacionih, i može služiti kao adekvatna zamena za laboratorijska ispitivanja u fazi projektovanja i analize.

Na kraju možemo zaključiti da ne postoji univerzalan metod za tačan proračun komutacionih i atmosferskih prenapona. Približna rešenja se dobijaju primenom metoda teorije električnih kola, uz ograničen broj početnih i graničnih uslova, kao i kroz modifikovane numeričke pristupe poput Ricove metode konačnih elemenata ili Galerkinove metode.

Kratkotrajni prenaponi, višestruko veći od nominalnih radnih napona, mogu nastati usled atmosferskih uticaja (spoljni prenaponi) ili zbog komutacionih procesa u elektroenergetskim mrežama (unutrašnji prenaponi).

7. ZAKLJUČAK

Problemi izbora parametara RC kola u generatorima za stvaranje oblika udarnih napona atmosferskih pražnjenja i sklopnih prenapona se prevazilaze primenom simulacija pomoću računarske tehnike. Rešenja se teško određuju ako se primene samo analitičke metode jer su, zbog prisustva nelinearnih elemenata (iskrište), njihove procedure zasnovane na prostim uslovima i pretpostavkama koje mogu da unesu određene nepreciznosti. Za stvaranje modela proračuna tranzijentnih procesa u tehnici visokih napona potreban je osnovni model koji je uvek analitički jer proizilazi iz teorije, ali se iz modela stiču potrebna saznanja. On se mora prilagoditi novim tendencijama i znanjima, a krajnji rezultat je neki specijalni model koji prezentuje realne prelazne procese. Ovde je to primer RC kola generatora udarnog napona gde je modelovan proces u monofaznom kolu sa naponskim izvorom i jedino mogućom frekvencijom 2 Hz za ispitivanje oblika napona i struje na izabranom opterećenju.

Pomoću odgovarajućeg algoritma i simulacionog modela mogu se odrediti vrednosti struje i napona u procesima koji se odvijaju u električnom kolu sa nelinearnim elementima. Razvijeni algoritamski modeli imaju univerzalnu primenu i mogu se koristiti za analizu različitih režima rada električnih vodova. MATLAB program je imao dvostruku namenu:

- da posluži proračunu i simulaciji veličina koje se mogu dobiti ispitivanjem ili merenjem i
- uspostavljen je originalni algoritam i verifikovan predloženi metod. Simulacija je zamenila eksperimentalna ispitivanja. Iz dobijenih rezultata-dijagrama napona i struja na mestu udara ne mogu se uočiti velike razlike u oblicima i amplitudama.

LITERATURA

- [1] M. Jayaraju, I. Daut, M. Adzman, Impulse voltage generator modelling using MATLAB, World Journal of Modelling and Simulation, 4 (2008) 57–63.
- [2] R. Sheeba, M. Jayaraju, T.K.N. Shanavas, Simulation of impulse voltage generator and impulse testing of insulator using MATLAB simulink, World Journal of Modelling and Simulation, Vol. 8, 4 (2012) 302–309.
- [3] IEC, High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements (IEC Standard No. 60060-1:2010), International Electrotechnical Commission, 2010.
- [4] E., Kuffel, W.S., Zaengl, J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals (Second edition), Butterworth-Heinemann, ISBN 0 7506 3634 3, 2000.
- [5] M.N.O. Sadiku, Elements of Electromagnetics (Seventh edition), Oxford University Press, 2009.

-
- [6] MATLAB SIMULINK Sim Power System, Copyright 1984-2002. The Math Works, Version 6.5.0,180913a, June 2, 2000.
 - [7] S.N. Bjelić, Atmospheric and commutation overvoltages in electrical distribution networks, Generis Publishing, ISBN 978-1-63002-486-5, 2021.
 - [8] N. Marković, S. Bjelić, F. Marković, Pобољшanje kvaliteta napona u elektroenergetskim mrežama kompenzacijom reaktivne snage pomoću kondenzatorskih baterija, Bakar, 45(2) (2020) 57–70.
 - [9] Lj. Milanković, Tehnika visokog napona, Naučna knjiga, 1962.
 - [10] J.M. Meek, Electrical Breakdown of Gases, Wiley, ISBN 0471995533, 1978.
 - [11] G.A. Mesyats, Pulsed Power, Chapter 13: Marx Generators, Springer, 2005, pp. 229–250.
 - [12] M. Jayaraju, P. Nair, B. Prabhakar, Design and simulation of marx impulse voltage generator, Journal of the Instrument Society of India, Vol. 29, No. 2, 70/74, 1999.
 - [13] Veverka, Technika Vysokých Napeti, SNTL/ALFA, Praha, 1982.
 - [14] ГОСТ 1516, Трансформаторы, аппараты и изоляторы высокого напряжения. Нормы и методы испытаний электрической прочности изоляций, Москва, 1968.
 - [15] S. Bjelić, N. Marković, Z. Bogićević, I. Bjelić, Application of Cauchy (Lipshitz) criterion for obtaining theoretical models of atmosphere striking overvoltages, International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS), Vol. 11, 9 (2019) 20–30. DOI:10.5815/ijitcs.2019.09.03
 - [16] Z. Bogicevic, S. Bjelic, Analyses of changes in power system elements, AI-based method and mathematical model for analysis of current and voltage in elements of power systems, LAP Lambert Academic Publishing, ISBN/EAN 9783659944680, 2016.
 - [17] S. Bjelić, Z. Bogićević, Computer Simulation of Theoretical Model of Electromagnetic Transient Processes in Power Transformers, International Journal of Information Technology Computer Science (IJITCS), Vol. 6, 1 (2014) 1–12. DOI:10.5815/ijitcs.2014.01.01
 - [18] Predavanje "Elektrodistributivni prenaponi na niskom naponu, posledice po potrošače i mogućnosti zaštite", Inženjerska komora Srbije, 2018.
 - [19] Institut za stadardizaciju Srbije, SRPS EN IEC 60071-1:2020, Koordinacija izolacije-Deo 1: Definicije, principi i pravila (Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules).
 - [20] Institut za stadardizaciju Srbije, SRPS EN IEC 62305-1:2024, Zaštita od atmosferskog pražnjenja - Deo 1: Opšti principi (Protection against lightning - Part 1: General principles).

UDK: 542.1:006:66.017(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2501105D

NAUČNI RAD

Oblast: Kontrola kvaliteta

Primljen: 05.05.2025.

Prerađen: 12.05.2025.

Prihvaćen: 19.05.2025.

KONTROLNE KARTE KAO ALAT ZA UNAPREĐENJE KVALITETA LABORATORIJSKIH ANALIZA

CONTROL CHARTS AS A TOOL FOR IMPROVING THE QUALITY OF LABORATORY ANALYSES

Miloš Đukić^{1a}, Sanela Vasiljević^{1b}, Dragana Adamović^{1c},
Emina Požega^{1d}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Alberta Ajnštajna 1, 19210 Bor

^{1a} E-mail: milos.djukic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3307-4669>

^{1b} E-mail: sanela.vasiljevic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6478-5335>

^{1c} E-mail: dragana.adamovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3683-4122>

^{1d} E-mail: emina.pozega@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6797-2435>

Izvod

Validnost rezultata ispitivanja predstavlja jedan od najvažnijih aspekata primene standarda SRPS ISO/IEC 17025 i ključni je faktor u radu akreditovanih laboratorija. Obezbeđivanje pouzdanih rezultata ostvaruje se kontinuiranim praćenjem i analizom dobijenih podataka, uz primenu odgovarajućih statističkih metoda. Jedna od najefikasnijih metoda za ovu svrhu jesu kontrolne karte, koje omogućavaju vizuelni prikaz stabilnosti analitičkog sistema i brzo ukazuju na odstupanja ili pojavu značajnih promena u procesu. Cilj ovog rada jeste da prikaže teorijsku osnovu i primenu različitih tipova kontrolnih karti (X, X-blank, R, r i D) u hemijskoj analizi, sa posebnim osvrtom na njihovu upotrebu u akreditovanim laboratorijama.

Ključne reči: SRPS ISO/IEC 17025:2017, kontrolne karte, kontrola kvaliteta

Abstract

The validity of test results represents one of the most important aspects in the implementation of the SRPS ISO/IEC 17025 standard and is a key factor in the operation of accredited laboratories. Ensuring reliable results is achieved through continuous monitoring and analysis of the obtained data, using appropriate statistical methods. One of the most effective methods for this purpose is the use of control charts, which provide a visual representation of the analytical system's stability and quickly indicate deviations or the occurrence of significant changes in the process. The aim of this paper is to present the theoretical basis and application of various types of control charts (X, X-blank, R, r and D) in chemical analysis, with a special focus on their use in accredited laboratories.

Keywords: SRPS ISO/IEC 17025:2017, control charts, quality control

1. UVOD

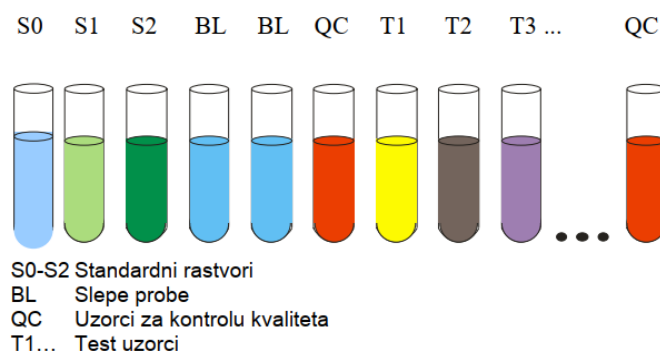
Laboratorija kao konačni proizvod svojih usluga putem izveštaja saopštava rezultate analize. Tela za ocenjivanje usaglašenosti (TOU) akreditovani po standardu SRPS EN ISO/IEC 10725:2017, moraju ispuniti zahteve propisane u tački 7.7, a koje su u vezi sa SRPS ISO 9001:2015. Moraju primenjivati procedure po kojoj prate validnost rezultata analize metode pri čemu se statističke tehnike trebaju primenjivati. Validnost rezultata analize je ključ uspešno uspostavljene kontrole kvaliteta, pri čemu razlikujemo unutrašnju (internu) i spoljašnju (eksternu). Interna kontrola kvaliteta sprovodi se unutar laboratorije, primenom plana kontrole postupaka i opreme analize, upotrebom referentnih materijala pri čemu svaki od postupaka kontrole mora da bude dokumentovan. Eksterna kontrola sprovodi se putem međulaboratorijskih poređenja PT šema (eng. Proficiency Testing), pri čemu doprinosi većem kvalitetu rada laboratorije i poboljšanju svojih usluga prema korisniku [1-3]. Cilj ovog rada je predstaviti i upoznati se sa jednim od najstarijim i najviše korišćenih vidova statističke kontrole – kontrolnim kartama.

Statističke metode u kontroli kvaliteta doprinose u velikoj meri povećanju kvaliteta proizvoda, usluga, kao i povećanju rejtinga ustanove. Kontrolne karte kao jedan od vidova statističke kontrole kvaliteta su veoma pouzdano efikasno sredstvo, jednostavne za upotrebu pri čemu se proces stalno održava u zadatim okvirima. Putem kontrolnih karti određuje se trenutak u kojem je potrebno izvršiti korekciju procesa ili njegovo napuštanje, i potvrđuje da li je nakon izvršenih korekcija došlo do poboljšanja procesa [4,5].

Studije o primeni kontrolnih karti publikovao je veliki broj autora u različitim oblastima ispitivanja. Na primer, *Papić - Blagojević i Paszek* primenjuju X-bar kontrolnu kartu u upravljanju industrijskim procesom kroz hipotetički primer čiji je postupak kompletno urađen i koji bi bio sproveden u slučaju istraživanja. *Miletić i sar.* primenjuju X- kontrolnu kartu ispitivanjem referentnog materijala užadi. *Hećimović i sar.* opisuju primenu kontrolnih karti u transfuzijskoj medicini. *Horvat i sar.* primenom X-bar kontrolne karte ispitali su kvalitet rada mlaznica prskalice, *Stojanović i Radojević* u procesnoj industriji pri upravljanju totalnim kvalitetom. *Čelar i sar.* opisuju primeni kontrolnih karti u studiji o alatima za poboljšanje kvaliteta, dok *Majstorović i Mačužić*, opisuju primenu X-kontrolne karte za praćenje performansi laboratorije koje su učestvovala u programu međulaboratorijskog poređenja primenom z-skora. Primena kontrolnih karti veoma je značajna i u praćenju stanja blank uzoraka od moguće kontaminacije, veliki broj autora publikovao je studije koristeći blank uzorke, poput: *Trancoso i sar*, *Lopes i sar*, *Matos i sar*, *Matos i sar*, *Sovrlić i sar.* i *Urošević i sar.* [6-17].

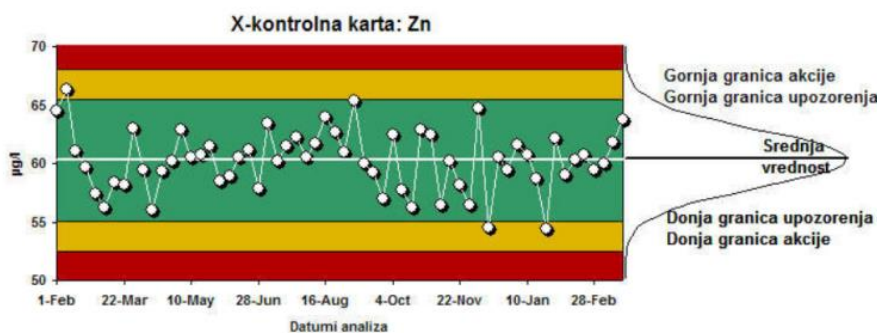
Konstrukcija kontrolnih karti je moćno i jednostavno sredstvo za dnevnu kontrolu kvaliteta analitičkog rada. Pri svakodnevnom radu, laboratorija sa

svojim redovnim uzorcima analizira i set kontrolnih uzoraka (slika 1). Uzorci za kontrolu kvaliteta dele se u pet grupa (Tabela 1). Nakon završene analize kontrolne vrednosti se crtaju u kontrolnu kartu. Preporuka je da se za kontrolne vrednosti: daje jedna značajna cifra više u odnosu na uobičajene uzorke rutinske analize, izveste vrednosti ispod granice kvantifikacije (LoQ) i izveste negativne vrednosti [18].



Sl. 1. Grafički prikaz seta kontrolnih uzoraka pri svakodnevnoj analizi uzoraka [19]

Kontrolna karta je bazirana na statističkim karakteristikama slučajnih varijacija, definisanim krivom normalne distribucije. Veza između krive normalne distribucije i odgovarajuće kontrolne karte predstavljena je na slici 2.



Sl. 2. Prikaz veze između krive normalne distribucije i kontrolne karte na primeru X – kontrolne karte [20]

Osnovni elementi kontrolne karte su:

- Centralna linija (CL) – predstavlja aritmetičku sredinu kontrolnih vrednosti (najmanje 20 merenja) ili sertifikovanu vrednost,

- Granice upozorenja – nalaze se na udaljenosti od ± 2 vrednosti standardne devijacije od centralne linije ($CL \pm 2s$). Pri normalnoj distribuciji, oko 95% svih rezultata treba da se nalazi unutar ovih granica,
- Granice akcije – nalaze se na udaljenosti od ± 3 vrednosti standardne devijacije od centralne linije ($CL \pm 3s$). Pri normalnoj distribuciji, 99.7% od svih podataka se nalazi unutar ovih granica.

Granice upozorenja i akcije mogu biti postavljene preko statističkih kontrolnih granica ili korišćenjem nezavisnih kriterijuma kvaliteta – ciljane kontrolne granice [20-22].

Vrste kontrolnih uzoraka i kontrolnih karti date su u tabeli 1, a u tabeli 2 predstavljen je proračun za kontrolne karte.

Tabela 1. Vrste kontrolnih uzoraka i kontrolnih karti [18,19]

Kontrolni uzorak	Kontrolna vrednost	Kontrolna karta	Koristi se za uočavanje grešaka	
			Slučajna	Sistematska
Kontrolni uzorak tip I <i>Sintetički uzorak (laboratorijski referentni materijal ili sertifikovan referentni materijal (CRM))</i>	Sertifikovana (srednja) vrednost rezultata analize sintetičkog uzorka	X	+	+
	Razlika između najvišeg i najnižeg rezultata za sintetički uzorak	R	+	-
Kontrolni uzorak II <i>Stabilan prirodni uzorak</i>	Razlika između najvišeg i najnižeg rezultata	R	+	-
Kontrolni uzorak III <i>Prirodni uzorak sa standardnim dodatkom</i>	Srednja vrednost <i>recovery</i> dodatka	D	+	-
Kontrolni uzorak IV <i>Slepa proba</i>	Srednja vrednost slepe probe	X blank	+	-
	Razlika između najvišeg i najnižeg rezultata sepe probe	R	+	-
Kontrolni uzorak V <i>Prirodni uzorak sa ograničenom stabilnošću</i>	Razlika između najvišeg i najnižeg rezultata	r	+	-

Tabela 2. Kalkulacije za kontrolne karte [22]

Sadržaj kontrolne karte Kontrolna karta	Centralna linija (CL)	Granice upozorenja	Granice akcije
X – karta	Aritmetička sredina ili poznata vrednost	$CL \pm 2s_x$ $CL \pm 2 \sqrt{s_b^2 + \frac{s_w^2}{n}}$	$CL \pm 3s_x$ $CL \pm 3 \sqrt{s_b^2 + \frac{s_w^2}{n}}$
D - karta	Aritmetička sredina ili poznata vrednost standardnog dodatka	$CL \pm 2s_x$	$CL \pm 3s_x$
Sadržaj kontrolne karte Kontrolna karta	Centralna linija (CL)	Gornji akcioni nivo	Donji akcioni nivo
R - karta	$\bar{R} = d_2 \cdot s_w$ $d_2 = 1.128$ za 2 ponavljanja	$D_4 \cdot \bar{R}$ $D_4 = 3.27$ za 2 ponavljanja	D_3 $D_3 = 0$
r - karta	$\bar{r} = \frac{d_2 \cdot s_w}{\bar{x}} \cdot 100$	$D_4 \cdot \bar{r}$ $D_4 = 3.27$ za 2 ponavljanja	D_3 $D_3 = 0$

s_b – međuserijska standardna devijacija dobijena prilikom validacije metode

s_x – standardna devijacija izmerenih vrednosti

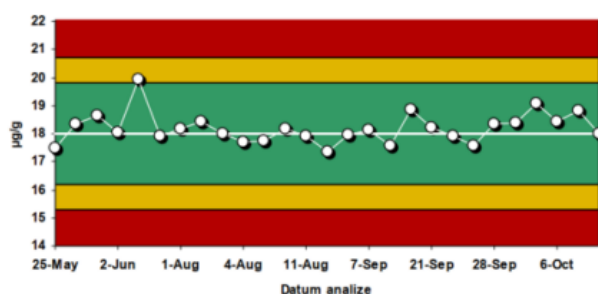
d_2, D_3, D_4 – statistički koeficijenti za merenja u duplikatu

2.. KONTROLNE KARTE

2.1. X – kontrolna karta

X - kontrolna karta (ili karta srednje vrednosti) dobija se analizom kontrolnog uzorka u svakoj seriji ispitivanih uzoraka, predstavljanje rezultata (ili srednje vrednosti) u odnosu na vreme. Na slici 3 predstavljen je primer primene X kontrolne karte u određivanju arsena u biološkom materijalu primenom ICP-MS tehnike [18-19].

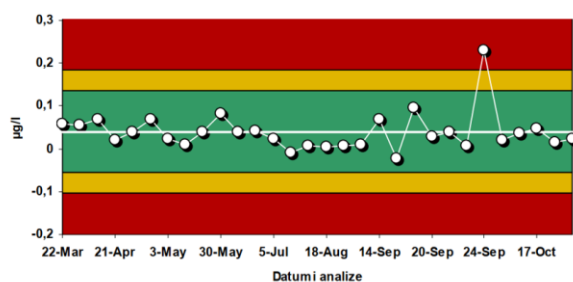
Sertifikovana vrednost	Ciljna standardna devijacija	Centralna linija	Granice upozorenja	Granice akcije
18.0 µg/g	$s_{ciljna}=0.05 \cdot 18.0=0.9 \mu\text{g/g}$	18.0 µg/g	$18.0 \pm 2 \cdot 0.9 = 18.0 \pm 1.8 \mu\text{g/g}$ (16.2 µg/g i 19.9 µg/g)	$18.0 \pm 3 \cdot 0.9 = 18.0 \pm 2.7 \mu\text{g/g}$ (15.3 µg/g i 20.7 µg/g)

Sl. 3. Primer $\bar{X}$ - kontrolne karte [19]

Samo jedna kontrolna vrednost prekoračila je granicu upozorenja. Kako su prethodne i naredne vrednosti bile unutar granica upozorenja, metoda je pod kontrolom.

Posebna vrsta $\bar{X}$ - karti su $\bar{X}$ - blank karte, dobijaju se analizom blank uzoraka i daju informaciju o mogućoj kontaminaciji reagensa kao i promeni limita detekcije i kvantifikacije metode. Na slici 4 dat je primer $\bar{X}$ - blank kontrolne karte, određivanja cinka u vodonik peroksidu ICP-OES tehnikom [19].

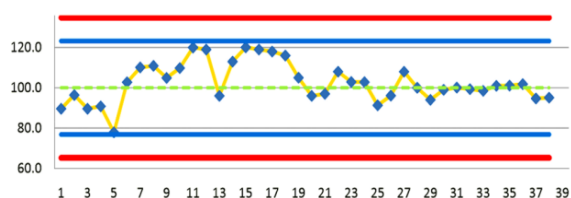
Aritmetička sredina	Standardna devijacija, s	Centralna linija	Granice upozorenja	Granice akcije
0.039 mg/l	$s=0.045\text{mg/l}$	0.039 mg/l	$0.039 \pm 2 \cdot 0.045 = 0.129 \text{ mg/l i } -0.051 \text{ mg/l}$	$0.039 \pm 3 \cdot 0.045 = 0.174 \text{ mg/l i } -0.096 \text{ mg/l}$

Sl. 4. Primer $\bar{X}$ - blank kontrolne karte [19]

2.2. D – kontrolna karta

D- kontrolna karta (ili karta tačnosti), konstruiše se analizom prirodnog uzoraka iz serije uzoraka za analizu i istog uzorka sa dodatkom poznatom koncentracijom analita. Kontrolna vrednost je razlika između rezultata za obogaćeni prirodni uzorak i prirodni uzorak bez dodatka analita. Na slici 5 prikazan je primer D – kontrolne karte [19].

Aritmetička sredina	Standardna devijacija,s	Centralna linija	Granice upozorenja	Granice akcije
96.65 mg/l	s=8.19 mg/l	100 mg/l	123.18 mg/l i 76.82 mg/l	134.77 mg/l i 65.23 mg/l

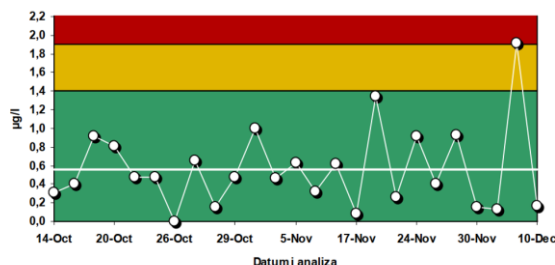


Sl. 5. Primer D – kontrolne karte [19]

2.3. R – kontrolna karta

R - kontrolna karta (ili karta opsega), konstruiše se analizom kontrolnog uzoraka u duplikatu sa svakom serijom uzoraka (uslovi ponovljivosti) i ubeležavanjem odstupanja u kartu u odnosu na vreme. Kontrolna vrednost je razlika između rezultata za obogaćeni prirodni uzorak i prirodni uzorak bez dodatka analita. Na slici 6 dat je primer R – kontrolne karte, određivanje N-NH₄ u vodi indofenol plavim metodom [19,20].

Aritmetička sredina opsega	Standardna devijacija,s	Centralna linija	Granica upozorenja	Granica akcije
0.559 µg/l	s=0.559/1.128 = 0.496 µg/l	0.559 µg/l	2.83·0.496 = 1.40 µg/l	3.67·0.496 = 1.82 µg/l



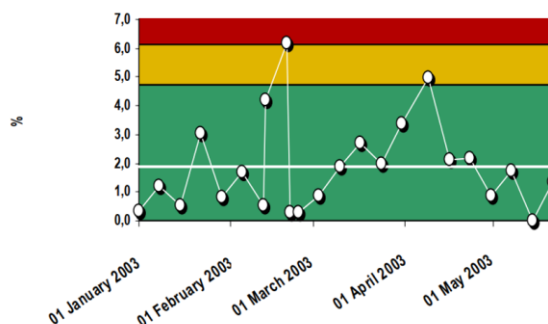
Sl. 6. Primer R - kontrolne karte [20]

Na R – kontrolnoj karti postoji jedna vrednost koja prelazi granicu akcije. Kontrolni uzorak kao i test uzorci su ponovo analizirani dana 10 decembra sa pozitivnim ishodom [20].

2.4. r – kontrolna karta

r - kontrolna karta (ili karta relativnog opsega), konstruiše se analizom prirodnog uzorka u svakoj seriji merenja, u uslovima ponovljivosti, a dobijeni opseg se predstavlja grafički u odnosu na vreme. Kontrolna vrednost je relativni opseg rezultata kontrolnog uzorka (razlika u % od srednje vrednosti). Na slici 7 dat je primer r-kontrolne karte, određivanje ukupnog P u vodi spektrofotometrijskom metodom [19,20].

Aritmetička sredina opsega procenta	Standardna devijacija,s	Centralna linija	Granica upozorenja	Granica akcije
1.88 %	$s=1.88/1.128 = 1.67\%$	1.88 %	$2.83 \cdot 1.67\% = 4.73 \%$	$3.67 \cdot 1.67\% = 6.13 \%$



Sl. 7. Primer r% kontrolne karte [20]

Dve kontrolne vrednosti (serija 9 i 17) bile su izvan kontrolnih granica. U seriji 17 je prekoračena granica upozorenja, a u seriji 9 granica akcije. U seriji 9 ponovljivost je bila van kontrole, i nakon rešavanja problema test uzorci su ponovo analizirani (serija 10) [20].

3. ZAKLJUČAK

Primena kontrolnih karata u internom nadzoru kvaliteta omogućava pravovremeno identifikovanje problema u sistemu ispitivanja i preduzimanje odgovarajućih korektivnih mera. Statistička obrada podataka je moguća samo ako je merni sistem u stanju statističke kontrole, što garantuje stabilnost procesa i nezavisnost merenja. U suprotnom, primena statističkih metoda može negativno uticati na tačnost i pouzdanost rezultata.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije za finansijsku podršku naznačenu ugovorom br. 451-03-136/2025-03/ 200052.

LITERATURA

- [1] SRPS ISO/IEC 17025:2017 Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje.
- [2] SRPS ISO 9001:2015 Sistemi menadžmenta kvalitetom – zahtevi.
- [3] B. Matijević, Kontrola kvaliteta i validacija analitičkih metoda, Novi Sad, 2013.
- [4] A. Perić – Grujić, Osnovi hemometrije, Beograd, 2012.
- [5] D. Stojanović, Z. Radojević, Metode koje se koriste u procesnoj industriji pri upravljanju totalnim kvalitetom, Zbornik Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji – Processing, 19.01.2004.
- [6] N. Papić – Blagojević, Z. Paszek, Primena kontrolne karte aritmetičke sredine u upravljanju industrijskim procesima. Škola biznisa, 1 (2013) 48-60.
- [7] S. Miletić, B. Trumić, S. Stanković, X-kontrolne karte kao sredstvo statičke kontrole kvaliteta ispitivanja užadi za izvozna postrojenja u rudarstvu, Bakar, 1 (2024) 31-40.
- [8] A. Hećimović, R. Štimac, D. Šarlija, I. Jukić, Statističke metode u transfuzijskoj medicini. 12. Hrvatska konferencija o kvaliteti i 3. Znanstveni skup hrvatskog društva za kvalitetu, (2012) 144-151.
- [9] D. Horvat, A. Eded, Đ. Banaj, Statistička kontrola procesa i proizvoda u poljoprivredi, Poljoprivreda, 1 (2006) 68-74.
- [10] D. Čelar, V. Velečić, D. Željezić, Ž. Kondić, Alati za poboljšavanje kvalitete, Tehnički glasnik, 3 (2014) 258-268.
- [11] V. D. Majstorović, J. Mačužić, J. Milosavljević, M. Mladenović, Unapređenje PT šeme za ispitivanje metala, Zbornik radova XX konferencija o međulaboratorijskim ispitivanjima materijala, (2014) 56-62.
- [12] M. A. Trancoso, M. M. Correia dos Santos, M. L. Simões Gonçalves, Quality assurance program for the chemical characterization of soils, Accreditation and quality assurance, 8 (2003) 323-333.
- [13] I. Lopes, A. Mourato, J. Abrantes, G. Carvalhal, M.J. Madruga, M. Reis, Quality control assurance of strontium-90 in foodstuffs by LSC, Applied Radiation and Isotopes, 93 (2014) 29-32.
- [14] A. Matos, A. Rego, I. Castanheira, A. S. Matos, Instrumental blank samples assessed through short run controls charts, 2nd IMEKOFOODS, (2016) 300-303.

-
- [15] A. S. Matos, A. Cortez, I. Cabral, M. Ventura, I. Coelho, I. Castanheira, A new strategy to monitor instrumental blank samples based on multivariate controls charts, XXII World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2018).
 - [16] Z. Sovrlić, D. Urošević, I. Svrkota, Implementation of quality control on soil sampling. In Conference Proceedings, Third International Scientific Conference, ITEMA 2019 Recent Advances in Information Technology, Tourism, Economics, Management and Agriculture, (2020) 67-72.
 - [18] D. Urošević, Z. Sovrlić, I. Svrkota, M. Mikić, R. Kovačević, M. Šteharik, Implementation of quality control on sampled soil with trip and field blank, 28th International Conference Ecological Truth & Environmental Research, (2020) 261-268.
 - [19] M.B. Rajković, M. Mitrović, S. Antić Mladenović, Obezbeđenje poverenja u kvalitet rezultata hemijskih metoda ispitivanja, *Zaštita materijala*, 4 (2019) 342-359.
 - [20] NT Technical Report Internal Quality Control, Handbook for Chemical Laboratories. Nordic Innovation Centre, TR569, Fourth Edition. 2011.
 - [21] M. Watson, J. Molnar Jazic, S. Maletić, J. Beljin, M. Kragulj Isakovski, J. Nikić, *Spektroskopske i spektrometrijske metode u analizi životne sredine*, Novi Sad, 2021.
 - [22] M. Rakićević, N. Kostić, Obezbeđenje validnosti rezultata ispitivanja QC/QA – seminar, Savez hemijskih inženjera Srbije, Beograd, 2024.

UPUTSTVO AUTORIMA

Časopis BAKAR izlazi dva puta godišnje i objavljuje naučne, stručne i pregledne radove. Za objavljivanje u časopisu prihvataju se isključivo originalni radovi koji nisu prethodno objavljivani i nisu istovremeno podneti za objavljivanje negde drugde. Radovi se anonimno recenziraju od strane recenzenta posle čega uredništvo donosi odluku o objavljivanju. Rad priložen za objavljivanje treba da bude pripremljen prema dole navedenom uputstvu da bi bio uključen u proceduru recenziranja. Neodgovarajuće pripremljeni rukopisi biće vraćeni autoru na doradu.

Obim i font. Rad treba da je napisan na papiru A4 formata (210x297 mm), margine (leva, desna, gornja i donja) sa po 25 mm, u Microsoft Wordu novije verzije, fontom Times New Roman, veličine 12, sa razmakom 1,5 reda, obostrano poravnat prema levoj i desnoj margini. Preporučuje se da celokupni rukopis ne bude manji od 5 strana i ne veći od 10 strana.

Naslov rada treba da je ispisan velikim slovima, bold, na srpskom i na engleskom jeziku. Ispod naslova rada pišu se imena autora i institucija u kojoj rađa. Autor rada zadužen za korespondenciju sa uredništvom mora da navede svoju e-mail adresu za kontakt u fusnoti.

Izvod se nalazi na početku rada i treba biti dužine do 200 reči, da sadrži cilj rada, primenjene metode, glavne rezultate i zaključke. Veličina fonta je 10, italic.

Glavne reči se navode ispod izvoda. Treba da ih bude minimalno 3, a maksimalno 6. Veličina fonta je 10, italic.

Izvod i glavne reči treba da budu date i na engleski jezik.

Osnovni tekst. Radove treba pisati jezgrovito, razumljivim stilom i logičkim redom koji, po pravilu, uključuje uvodni deo s određenjem cilja ili problema rada, opis metodologije, prikaz dobijenih rezultata, kao i diskusiju rezultata sa zaključcima i implikacijama.

Glavni naslovi trebaju biti urađeni sa veličinom fonta 12, bold, sve velika slova i poravnati sa levom marginom.

Podnaslovi se pišu sa veličinom fonta 12, bold, poravnato prema levoj margini, velikim i malim slovima.

Slike i tabele. Svaka ilustracija i tabela moraju biti razumljive i bez čitanja teksta, odnosno, moraju imati redni broj, naslov i legendu (objašnjenje oznaka, šifara, skraćenica i sl.). Tekst se navodi ispod slike, a iznad tabele. Redni brojevi slika i tabela se daju arapskim brojevima.

Reference u tekstu se navode u ugličastim zagradama, na pr. [1,3]. Reference se prilažu na kraju rada na sledeći način:

[1] B.A. Willis, Mineral Processing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, str. 35. (za poglavlje u knjizi)

[2] H. Ernst, *Research Policy*, 30 (2001) 143–157. (za članak u časopisu)

[3] <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (za web dokument)

Navođenje neobjavljenih radova nije poželjno, a ukoliko je neophodno treba navesti što potpunije podatke o izvoru.

Zahvalnost se daje po potrebi, na kraju rada, a treba da sadrži ime institucije koja je finansirala rezultate koji se daju u radu, sa nazivom i brojem projekta; ili ukoliko rad potiče iz magistarske teze ili doktorske disertacije, treba dati naziv teze/disertacije, mesto, godinu i fakultet na kojem je odbranjena. Veličina fonta 10, italic.

Radovi se šalju prevashodno elektronskom poštom ili u drugom elektronskom obliku.

Adresa uredništva je:

Časopis BAKAR

Institut za rudarstvo i metalurgiju

Alberta Ajnštajna br. 1, 19210 Bor

E-mail: nti@irmbor.co.rs ; ana.kostov@irmbor.co.rs

Telefon: 030/454-260; 030/454-108

Svim autorima se zahvaljujemo na saradnji.

INSTRUCTIONS FOR THE AUTHORS

COPPER Journal is published twice a year and publishes the scientific, technical and review paper works. Only original works, not previously published and not simultaneously submitted for publications elsewhere, are accepted for publication in the journal. The papers are anonymously reviewed by the reviewers after that the Editorial decided to publish. The submitted work for publication should be prepared according to the instructions below as to be included in the procedure of reviewing. Inadequate prepared manuscripts will be returned to the author for finishing.

Volume and Font Size. The paper needs to be written on A4 paper (210x297 mm), margins (left, right, top and bottom) with each 25 mm, in the Microsoft Word later version, font Times New Roman, size 12, with 1.5 line spacing, justified to the left and right margins. It is recommended that the entire manuscript cannot be less than 5 pages and not exceed 10 pages.

Title of Paper should be written in capital letters, bold, in Serbian and English. Under the title, the names of authors and their affiliations should be written. Corresponding author must provide his/her e-mail address for contact in a footnote.

Abstract is at the beginning of the paper and should be up to 200 words include the aim of the work, the applied methods, the main results and conclusions. The font size is 10, italic.

Keywords are listed below the abstract. They should be minimum 3 and maximum of 6. The font size is 10, italic.

Abstract and Keywords should be also given in English language.

Basic Text. The papers should be written concisely, in understandable style and logical order that, as a rule, including the introduction part with a definition of the aim or problem of the work, a description of the methodology, presentation of the obtained results as well as a discussion of the results with conclusions and implications.

Main Titles should be done with the font size 12, all capital letters and aligned to the left margin.

Subtitles are written with the font size 12, bold, aligned to the left margin, large and small letters.

Figures and Tables. Each figure and table must be understandable without reading the text, i.e., must have a serial number, title and legend (explanation of marks, codes, abbreviations, etc.). The text is stated below the figure and above the table. Serial numbers of figures and tables are given in Arabic numbers.

References in the text are cited in square brackets, e.g. [1,3]. References are enclosed at the end of the paper as follows:

[1] B.A. Willis, Mineral Processing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, p. 35. (*for the chapter in a book*)

[2] H. Ernst, *Research Policy*, 30 (2001) 143–157. (*for the article in a journal*)

[3] <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (*for web document*)

Citation of the unpublished works is not preferable and, if it is necessary, as much as possible completed data source should be listed.

Acknowledgement is given, as needed, at the end of the paper and should include the name of institution that funded the given results in the paper, with the project title and number; or if the work is resulted from the master thesis or doctoral dissertation, it should give the title of thesis/dissertation, place, year and faculty/university where it was defended. Font size is 10, italic.

The manuscripts are primarily sent by e-mail or in other electronic form.

Editorial Address: Journal COPPER
Mining and Metallurgy Institute Bor
1 Alberta Ajnštajna, 19210 Bor
E-mail: nti@irmbor.co.rs; ana.kostov@irmbor.co.rs
Telephone: +381 30/454-260; +381 30/454-108

We are thankful for all authors on cooperation.

SADRŽAJ CONTENS

Radmilo Rajković, Daniel Kržanović, Miomir Mikić, Milenko Jovanović ANALIZA STABILNOSTI ZAVRŠNIH KOSINA NA POVRŠINSKOM KOPU SEVERNI REVIR RUDNIKA BAKRA MAJDANPEK ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE FINISHING SLOPES AT THE SURFACE MINING SEVERNI REVIR OF THE MAJDANPEK COPPER MINE	1
Boško Vuković TEHNOLOŠKO REŠENJE OTKOPAVANJA POVLATNE UGLJENE ZONE NA PK „GACKO“ U SVRHU POBOLJŠANJA TOPLOTNE VREDNOSTI ENERGETSKOG GORIVA ZA TE GACKO TECHNOLOGICAL SOLUTION FOR EXCAVATING THE RETURNABLE COAL ZONE AT THE "GACKO" POWER PLANT FOR THE PURPOSE OF IMPROVING THE HEAT VALUE OF THE ENERGY FUEL FOR THE GACKO POWER PLANT	11
Stevan Dimitrijević, Silvana Dimitrijević, Borislava Vurdelja RECIKLAŽA NIKL-KADMIJUMSKIH AKUMULATORA RECYCLING OF NICKEL-CADMIUM BATTERIES	23
Violeta Nikolić, Novica Staletović, Vladanka Presburger-Ulniković, Ivan Jovanović PROCENA ZAGAĐENJA I RIZIKA OD ZAGAĐENJA ZEMLJIŠTA U BORU PRIMENOM RAZLIČITIH INDEKSA ASSESSMENT OF POLLUTION AND RISK OF SOIL POLLUTION IN BOR USING DIFFERENT INDICES	33
Aleksandra Ivanović, Tatjana Apostolovski-Trujić, Viša Tasić, Nevena Ristić KOLIČINA I SADRŽAJ UKUPNIH TALOŽNIH MATERIJA U BORU U PERIODU OD 2016. DO 2023. GODINE QUANTITY AND CONTENT OF TOTAL ATMOSPHERIC DEPOSITION IN BOR IN THE PERIOD FROM 2016 TO 2023	45
Dušan B. Topalović, Ivana D. Smičiklas, Mirjana B. Radenković, Srboljub Stanković, Ivana Ž. Pepić, Aca Božilov, Milan Protić PRIMENA XGBOOST ALGORITMA ZA KALIBRACIJU PRENOSNOG PAQMON 1.0 PM MONITORA U USLOVIMA SPOLJAŠNJE SREDINE XGBOOST-BASED CALIBRATION OF THE PORTABLE PAQMON 1.0 PM MONITOR IN OUTDOOR CONDITIONS	55

Viša Tasić, Dušan Topalović, Bojan Radović, Vladan Kamenović,
Renata Kovačević

**ISPITIVANJE KARAKTERISTIKA PRENOSNIH
PM MONITORA U LABORATORIJSKIM USLOVIMA**

TESTING THE CHARACTERISTICS OF PORTABLE
PM MONITORS IN LABORATORY CONDITIONS67

Jovan Vujić, Božo Ilić, Nebojša Đenić

**NAJČEŠĆI KVAROVI ELEKTRO GENERATORA NA DAMPERIMA
BELAZ 75135**

THE MOST COMMON FAILURES OF ELECTRIC GENERATORS
AT DUMPERS BELAZ 7513579

Nenad Marković, Slobodan Bjelić, Strahinja Marković

**ANALITIČKI METOD ODREĐIVANJA PARAMETARA IMPULSNIH
PRENAPONA ATMOSFERSKIH PRAŽNJENJA**

THE ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF
IMPULSE OVERVOLTAGES FROM ATMOSPHERIC DISCHARGES89

Miloš Đukić, Sanela Vasiljević, Dragana Adamović, Emina Požega

**KONTROLNE KARTE KAO ALAT ZA UNAPREĐENJE KVALITETA
LABORATORIJSKIH ANALIZA**

CONTROL CHARTS AS A TOOL FOR IMPROVING THE QUALITY OF
LABORATORY ANALYSES105
