

INSTITUT ZA RUDARSTVO I METALURGIJU BOR

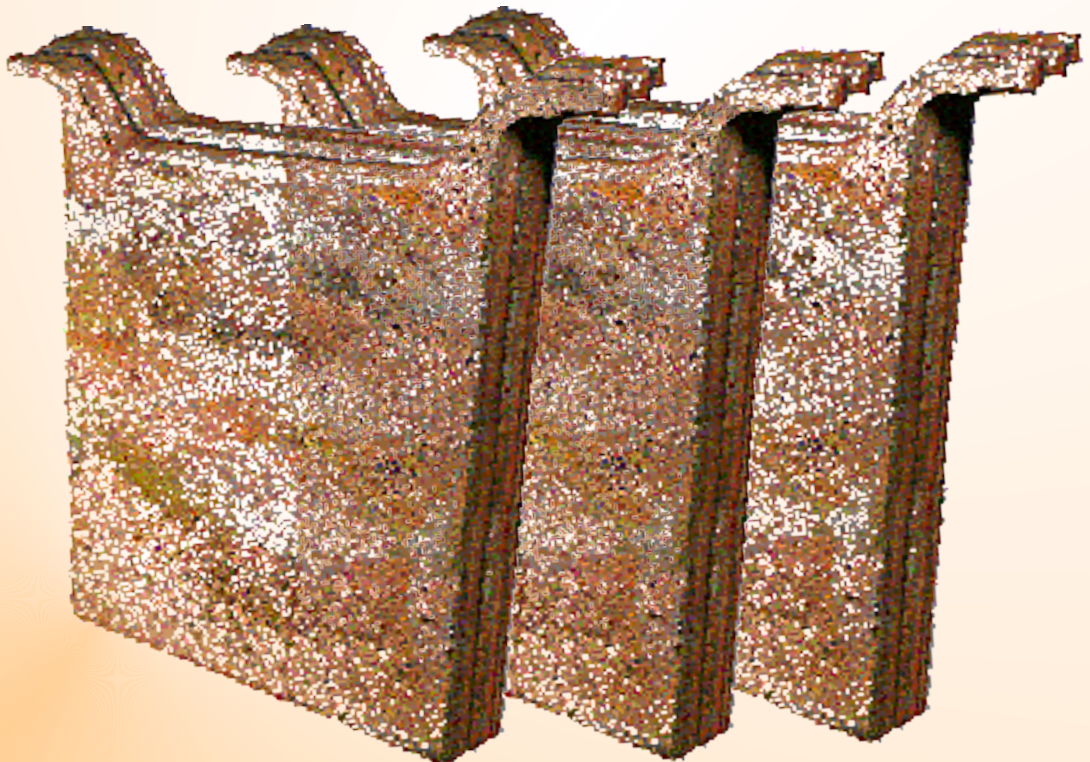


Cu

UDC 669.3  
ISSN 0351-0212

Broj 1 Volumen 48 2023

# BAKAR COPPER



---

**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 i odgovorni urednik**

Dr Ana Kostov, *naučni savetnik, redovni član  
Inženjerske akademije Srbije*  
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor  
E-mail: [ana.kostov@irmbor.co.rs](mailto:ana.kostov@irmbor.co.rs)  
Tel. 030/454-108

#### **Zamenik glavnog i odgovornog urednika**

Dr Dragan Milanović, *naučni savetnik*  
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor  
E-mail: [dragan.milanovic@irmbor.co.rs](mailto:dragan.milanovic@irmbor.co.rs)  
Tel. 030/454-212

#### **Urednik**

Vesna Marjanović, *dipl.inž.*

#### **Prevodilac**

Nevenka Vukašinić, *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.irmbor.co.rs](http://www.irmbor.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, Zeleni bulevar 35  
E-mail: [institut@irmbor.co.rs](mailto:institut@irmbor.co.rs)  
Tel. 030/454-101

#### **Sva prava zadržana.**

#### **Uređivački odbor**

Dr Mile Bugarin, *naučni savetnik*  
*Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor*  
Prof. dr Tatjana Volkov Husović, *red. prof.*  
*UB, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd*  
Dr Silvana Dimitrijević, *viši naučni saradnik*  
*Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor*  
Prof. dr Bojan Jokić, *vanr.profesor*  
*UB, Fakultet primenjenih umetnosti u Beogradu*  
Prof. dr Sergey Krasikov  
*Institut za metalurgiju Uralskog odeljenja*  
*Ruske akademije nauka, Rusija*  
Dr Milenko Ljubojev, *naučni savetnik*  
*Inženjerska akademija Srbije*  
Dr Lidija Mančić, *naučni savetnik*  
*Institut tehničkih nauka SANU*  
Dr Aleksandra Milosavljević, *viši naučni saradnik*  
*Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor*  
Prof. dr Duško Minić, *red. prof.*  
*UP, Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica*  
Dr Milanče Mitovski  
*Inženjerska akademija Srbije*  
Prof. dr Cornelia Muntean  
*Politehnički univerzitet u Temišvaru, Rumunija*  
Dr Miroslav Sokić, *naučni savetnik*  
*Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih*  
*mineralnih sirovina Beograd*  
Dr Jasmina Stevanović, *naučni savetnik*  
*UB, Institut za hemiju, tehnologiju i*  
*metalurgiju Beograd*  
Prof. dr Mirko Stijepović, *vanr. profesor*  
*UB, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd*  
Dr Srećko Stopić  
*RWTH Aachen, IME Aachen, Nemačka*  
Dr Rustam Sharipov  
*Kazahstanski britanski tehnički univerzitet*  
*Almati, Republika Kazahstan*  
Dr Nadežda Talijan, *naučni savetnik*  
*Akademija inženjerskih nauka Srbije*  
Dr Viša Tasić, *naučni savetnik*  
*Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor*

---

---

**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 informaticc, as well as related fields of science. Since 1968, published twice a year.

**Editor-in-Chief**

Ph.D. Ana Kostov, *Principal Research Fellow,*  
*full member of Engineering Academy of Serbia*  
Mining and Metallurgy Institute Bor  
E-mail: [ana.kostov@irmbor.co.rs](mailto:ana.kostov@irmbor.co.rs)  
Phone: +38130/454-108

**Co-Editor**

Ph.D. Dragan Milanović, *Principal Research Fellow*  
Mining and Metallurgy Institute Bor  
E-mail: [dragan.milanovic@irmbor.co.rs](mailto:dragan.milanovic@irmbor.co.rs)  
Phone: +38130/454-212

**Editor**

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](http://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, Zeleni bulevar 35  
E-mail: [institut@irmbor.co.rs](mailto:institut@irmbor.co.rs)  
Phone: +38130/454-101

**All rights reserved.**

**Editorial Board**

Ph.D. Mile Bugarin, *Principal Research Fellow*  
*Mining and Metallurgy Institute Bor*  
Prof. Ph.D. Tatjana Volkov Husović  
*UB, Faculty of Technology and Metallurgy*  
*Belgrade*  
Ph.D. Silvana Dimitrijević,  
*Senior Research Associate*  
*Mining and Metallurgy Institute Bor*  
Prof. Ph.D. Bojan Jokić  
*UB, Faculty of Applied Arts in Belgrade*  
Prof. Ph.D. Sergey Krasikov  
*Institute of Metallurgy of Ural Branch*  
*of the Russian Academy of Sciences, Russia*  
Ph.D. Milenko Ljubojev, *Principal Research Fellow*  
*Engineering Academy of Serbia*  
Ph.D. Lidija Mančić, *Principal Research Fellow*  
*Institute of Technical Science of SASA*  
Ph.D. Aleksandra Milosavljević,  
*Senior Research Associate*  
*Mining and Metallurgy Institute Bor*  
Prof. Ph.D. Duško Minić  
*UP, Faculty of Technical Sciences*  
*Kosovska Mitrovica*  
Ph.D. Milanče Mitovski  
*Engineering Academy of Serbia*  
Prof. Ph.D. Cornelia Muntean  
*Polytechnic University of Timisoara, Romania*  
Ph.D. Miroslav Sokić, *Principal Research Fellow*  
*Institute for Technology of Nuclear and*  
*Other Raw Materials Belgrade*  
Ph.D. Jasmina Stevanović, *Principal Research Fellow*  
*UB, Institute of Chemistry, Technology and*  
*Metallurgy Belgrade*  
Prof. Ph.D. Mirko Stijepović  
*UB, Faculty of Technology and Metallurgy*  
*Belgrade*  
Ph.D. Srećko Stopić  
*RWTH Aachen, IME Aachen, Germany*  
Ph.D. Rustam Sharipov  
*Kazakh British Technical University Almaty,*  
*Republic of Kazakhstan*  
Ph.D. Nadežda Talijan, *Principal Research Fellow*  
*Academy of Engineering Sciences of Serbia*  
Ph.D. Viša Tasić, *Principal Research Fellow*  
*Mining and Metallurgy Institute Bor*

UDK: 624.131:622.7(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2301001T

NAUČNI RAD

Oblast: Geologija i Rudarstvo

Primljen: 27.02.2023.

Prerađen: 14.04.2023.

Prihvaćen: 24.04.2023.

**IZRADA GEOTEHNIČKOG I HIDROGEOLOŠKOG MODELA  
SEKTORA BR. 6 FLOTACIJSKOG JALoviŠTA  
„VALJA FUNDATA“ U MAJDANPEKU**

**DEVELOPMENT OF A GEOTECHNICAL AND HYDROGEOLOGICAL  
MODEL ON THE SECTOR 6 OF THE "VALJA FU DATA" FLOTATION  
TAILING DUMP IN MAJDANPEK**

Dušan Tašić<sup>1a</sup>, Ivan Jovanović<sup>1b</sup>,  
Katarina Milivojević<sup>1c</sup>, Dragan Ignjatović<sup>1d</sup>

<sup>1</sup>Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Zeleni bulevar 35, 19210 Bor

**Orcid:**

<sup>1a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8005-9640>; <sup>1b</sup> <https://orcid.org/0009-0000-5174-3734>;

<sup>1c</sup> <https://orcid.org/0009-0000-1306-4044>; <sup>1d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2333-6853>

**Izvod**

*Geotehnička i hidrogeološka istraživanja sprovedena su na lokaciji sektora br. 6 flotacijskog jalovišta „Valja Fundata“ u Majdanpeku. Cilj istraživanja je bio da se definišu geotehnička i hidrogeološka građa ovog dela jalovišta, kao osnova za određivanje optimalnih uslova nadvišenja i sanacije terena predviđenog za proširenje odlagališta. Primenom multidisciplinarnih geoloških metoda istraživanja, izrađeni su odgovarajući geotehnički i hidrogeološki modeli terena, koji će poslužiti kao polazna osnova za dalje građevinsko i rudarsko projektovanje.*

**Ključne reči:** *geotehničko istraživanje, hidrogeološko istraživanje, geološki model, flotacijsko jalovište*

**Abstract**

*Geotechnical and hydrogeological investigations were carried out at the location on the sector 6 of the "Valja Fundata" flotation tailing dump in Majdanpek. The goal of investigations was to define the geotechnical and hydrogeological structure of this part of the tailings dump, as a basis for determining the optimal conditions for overhanging and rehabilitation of the terrain, planned for the landfill expansion. The appropriate geotechnical and hydrogeological terrain models, which will be used as a starting point for further construction and mining design, were developed applying the multidisciplinary geological investigation models.*

**Keywords:** *geotechnical investigation, hydrogeological investigation, geological model, flotation tailings pond*

## 1. UVOD

Flotacijsko jalovište „Valja Fundata“ predstavlja glavno jalovište na kome flotacija Rudnika bakara u Majdanpeku (RBM) odlaže svoju jalovinu i ima dvostruku namenu: prva je odlaganje celokupne jalovine iz flotacije RBM-a, a druga je za snabdevanje flotacije tehnološkom vodom.

Kako bi se omogućilo dalje nadvišenje flotacijskog jalovišta i njegova eksploatacija u bezbednim i stabilnim uslovima do projektovane kote od K+545 mnv, s obzirom da su koeficijenti stabilnosti, u ovom delu jalovišta (sektor br. 6), ispod zakonom propisanog minimuma, usled širokog fronta proceđivanja kroz spoljašnju kosinu nasipa, neophodna je njegova brza sanacija. U tu svrhu izveden je određen obim terenskih istražnih radova i laboratorijskih ispitivanja, prema preporukama za ovu vrstu objekata [1] realizovanih u periodu decembar 2022. - januar 2023. godine. Konstruisano je devet inženjerskogeoloških profila, formiran 3D inženjerskogeološki i hidrogeološki model istražnog prostora, kao i pružen uvid u opšte inženjerskogeološke, odnosno hidrogeološke uslove i pojave koje mogu uticati na funkcionisanje i proširenje jalovišta.

## 2. PRIKAZ IZVRŠENIH GEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA I ISPITIVANJA

Prema metodološkim postupcima izvedeni su sledeći terenski i kabinetski radovi (geotehnički, hidrogeološki, geofizički i laboratorijski):

- Prikupljanje i proučavanje raspoložive dokumentacije o dosadašnjim istraživanjima na istražnom području (sinteza i analiza celokupno raspoložive geotehničke i hidrogeološke dokumentacije).
- Inženjerskogeološko kartiranje terena sa izradom inženjerskogeološke karte (u obimu od 0,83 km<sup>2</sup>). Inženjerskogeološko kartiranje vršeno je u cilju što boljeg sagledavanja stvarnog - realnog stanja na predmetnom terenu. Naročita pažnja posvećena je stanju spoljne kosine nasipa, zonama terena sa prisutnim deformacijama, savremenim egzogenim procesima, hidrogeološkim pojavama i stabilnosti terena. Kartiranje je obavljeno metodom praćenja granica i metodom praćenja izdanaka (slika 1).
- Geodetsko lociranje i izvođenje istražnih bušotina. Postignuta dubina za 18 istražnih bušotina je iznosila od 25 do 40 m, odnosno ukupno 470 m bušenja.
- Izvođenje opita VDP-a u bušotinama.
- Inženjerskogeološko i hidrogeološko kartiranje jezgra istražnih bušotina sa uzimanjem uzoraka za laboratorijska geomehanička ispitivanja (slika 1).

- Geofizička istraživanja kombinovanom metodom - primenom refrakcione seizmike i specifične električne otpornosti.
- Laboratorijska geomehanička ispitivanja uzetih uzoraka tla i stena.
- Kabinetski radovi (kompilacija, analiza i sinteza raspoloživih podataka) i izrada Elaborata o geotehničkim i hidrogeološkim istraživanjima, u okviru kojeg je izvršeno modelovanje terena.



Sl. 1. Jezgro za inženjerskogeološko i hidrogeološko kartiranje

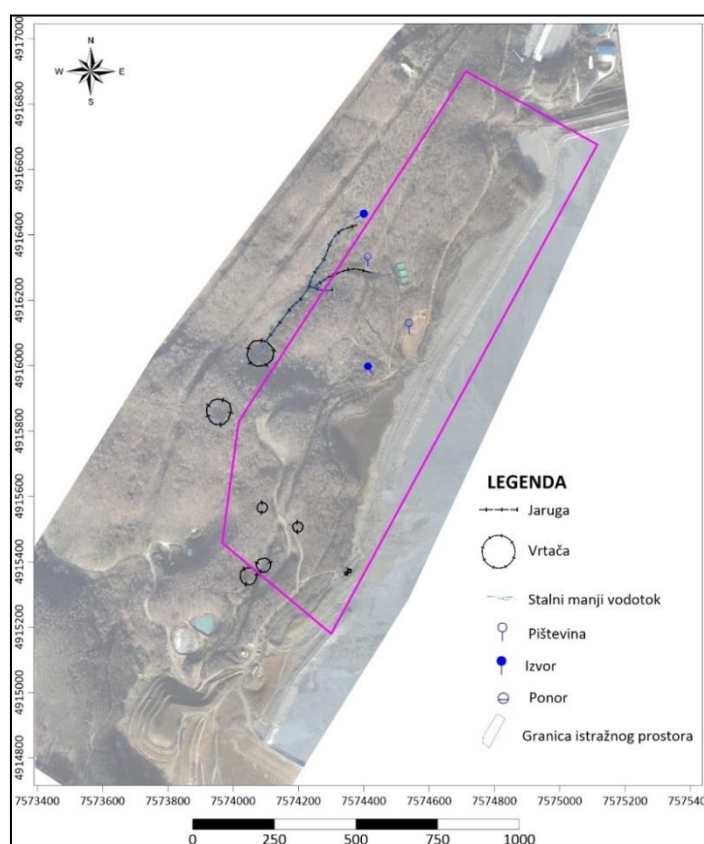
### 3. PRIKAZ REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Kontura samog istražnog prostora obuhvata severozapadni i zapadni stenoviti obod flotaciskog jalovišta sa najvećim visinama od oko 600 mm, pa sve do 527 mm, koliko iznosi trenutni nivo odlagane jalovine.

Na samom istražnom prostoru i njegovoj neposrednoj okolini mogu se uočiti morfološke pojave i oblici (najviše karakteristični za karstne terene - u delu izgrađenom od jurskih krečnjaka): jaruge, vrtače, škarpe i ponori. Ono što je bitno napomenuti da su na lokaciji istraživanja većinom registrovane geomorfološke pojave vezane za procese intenzivne karstifikacije. Registrovano je 7 većih vrtača, jedan ponor, kao i jedna jaruga u ukupnoj dužini oko 500 m u

kojoj se javlja povremeni vodeni tok. Položaj registrovanih karstnih pojava i oblika kao i jaruga sa povremenim vodenim tokom je prikazan na slici 2.

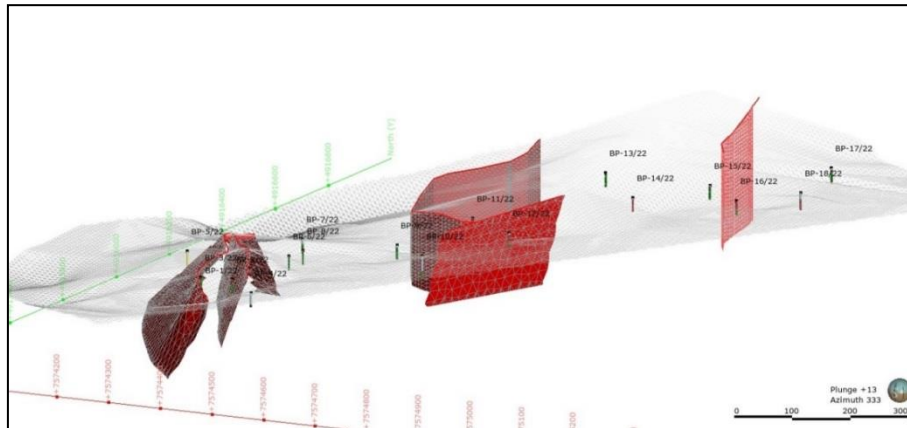
U geološkoj građi terena obuhvaćenog jalovištem i njegove šire okoline učestvuju: kristalasti škriljci, stene facije „zelenih škriljaca“, kvarcne žice, gnajs-graniti, serpentiniti, dijabazi, konglomerati i peščari (lijasa i dogera), krečnjaci (titon-valendina), senonski fliš i vulkaniti gornje krede, kvartarni sedimenti i „antropogeni slojevi“ predstavljeni različitim jalovinskim materijalima.



Sl. 2. Prostorni položaj karstnih pojava i oblika registrovanih kartiranjem terena

Na mikrolokaciji, a na osnovu rezultata ranijih i sadašnjih istraživanja, uočene su i izdvojene tektonske formacije. Prostorni položaj tektonskih struktura je generalnog pravca SZ-JI. Radi se o mlađim tektonskim strukturama u odnosu na regionalnu tektoniku koja je pružanja S-J. Sintezom položaja u planu i rezultatima istražnog bušenja i naročito geofizičkih istraživanja prostorni položaj tektonskih struktura u 3D formatu prikazan je na slici 3.





Sl. 3. Položaj utvrđenih tektonskih struktura na mikrolokaciji

### 3.1. Inženjerskogeološka svojstva izdvojenih sredina

Na osnovu poznatih podataka o geološkoj građi istražnog prostora, njegove neposredne podloge i okoline, flotacijskog jalovišta, kartiranja novoizvedenih istražnih bušotina i terena, rezultata geofizičkih istraživanja, dobijen je litološko-geotehnički sastav i sklop terena (do dubine od oko 30 m ispod prirodne površine terena).

Konstrukcija terena je heterogenog litološkog i inženjerskogeološkog sastava. Stensku podlogu istražnog prostora sačinjavaju čvrste stenske mase različitih geomehaničkih svojstava u okviru istih litoloških članova (gornjojurski krečnjaci, proterozojski gnajsevi i mikašisti, gornjokredni peščari i hidrotermalno izmenjene vulkanske stene - andeziti paleogene starosti). Preko njih leže kvartarne tvorevine u vidu tanjih ili debljih naslaga deluvijalnih sedimenata. Od „antropogenih slojeva“ zastupljeni su: flotacijska jalovina u vidu cikloniranog peska i flotacijskog mulja, kao i različiti nasuti materijali manje debljine.

Prve četiri inženjerskogeološke sredine se svrstavaju u tlo. Vrednosti fizičko-mehaničkih svojstava se za njih zasnivaju na laboratorijskim ispitivanjima uzoraka, inženjerskogeološkom iskustvu i poznavanju ovog dela terena [2]. Ostalih sedam sredina (razvrstanih u odgovarajuće komplekse) pripadaju čvrstim stenskim masama. Sve istražne bušotine bile su završene u njima. Sve ove stene su uglavnom površinski ispucale i degradirane, a geomehanička svojstva se poboljšavaju sa porastom dubine. Ispitane su, po kriterijumima i zakonima mehanike stena, kategorisane po Bijenavskom ( $RMR_{89}$  [3] i GSI klasifikacija [4]).



Na predmetnom prostoru izdvojene su sledeće inženjerskogeološke sredine i kompleksi:

- Flotacijska jalovina, prašinast materijal - mulj- sredina 1.
- Flotacijska jalovina, ciklonirani pesak - sredina 2.
- Nasip - heterogenog sastava - sredina 3.
- Kompleks deluvijalnih sedimenata - glinovito peskovita drobina - sredina 4.
- Andeziti (Pgaqpx), izmenjene vulkanske stene - sredina 5.
- Kompleks peščara - sredina 6.
- Peščari - intezivno izmenjena, izlomljena do dezintegrirana stena - sredina 6.1.
- Peščari - izlomljena stena - sredina 6.2.
- Kompleks krečnjaka - sredina 7.
- Krečnjaci - intezivno do delimično izlomljena i ispucala stena - sredina 7.1.
- Krečnjaci - kompaktna do slabo ispucala stena - sredina 7.2.
- Kompleks gnajseva i mikašista - sredina 8.
- Gnajsevi i mikašisti - intezivno ispucala, raspadnuta do degradirana stena - sredina 8.1.
- Gnajsevi i mikašisti - izlomljena do delimično kompaktna stena- sredina 8.

Za sve ove sredine prikazan je opis inženjerskogeoloških odlika i data preporuka za vrednosti ulaznih parametara za geostatičke proračune.

### 3.2. Hidrogeološka svojstva terena

S obzirom da je predmet geološke analize matična stena, u kontaktu sa flotacijskim jezerom, odnosno, prostor u kome se planira nadvišenje, hidrogeološka determinacija stena i tla je vršena po starosti, litološkom sastavu i ispucalosti. Determinacija je izvršena na sledeći način:

- Gnajs - kompaktna do slabo izlomljena gnajs proterozojske starosti, sive boje, uškrljen, slabo limonitisan. S obzirom da je na svim uzorcima registrovana ispucalost, mestimično zapunjena glinom, u okviru ovog kompleksa formira se slabopropusna pukotinska izdan.
- Gnajs ispucali - kompleks stena istog litološkog sastava kao i prethodni, s tim što je ovaj kompleks potpuno izlomljen i zdrobljen sa veličinama fragmenata od 1-5 cm. U okviru ovog kompleksa registrovan je prodor flotacijskog peska što indirektno ukazuje da se u ovom kompleksu odvija intezivno strujanje podzemnih voda.

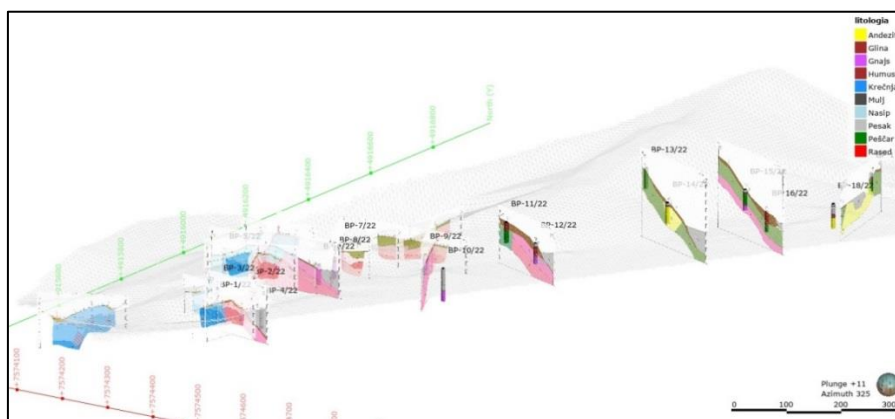
- Krečnjak - kompleks bankovitih krečnjaka srednjejurske starosti. Stena kompaktna do slaboizlomljena. Na jezgru je konstatovana kaveroznost što ukazuje da se u okviru ovog kompleksa odvijaju karstni procesi.
- Krečnjak ispucao - kompleks raspadnute krečnjačke stene sa veoma intenzivnim procesima karstifikacije. Rasprostranjenje ovog kompleksa je u granicama kompaktnog krečnjaka, a na površini terena jasno uočljive karstne geomorfološke pojave i oblici.
- Pešar - kompleks stena kredne starosti. Karakteriše ga smenjivanje kompaktnih i izlomljenih zona.
- Pešar ispucao - istog litološkog sastava i rasprostranjenja kao prethodni kompleks. Karakteriše ga intenzivna zdrobljenost i degradacija do stepena da se može okarakterisati kao krupnozrni pesak inetrgranularne poroznosti. U okviru ovog kompleksa formira se posebna izdan.
- Andezit - izmenjena vulkanska stena. Izlomljena vulkanska stena zapunjena je glinovitim materijalom, u pojedinim intervalima registrovana je kao kompaktna čvrsta stena. Sa aspekta hidrogeologije ovaj kompleks je usvojen kao uslovno bezvodni deo terena.
- Deluvijum (glina) - kompleks kvartarne starosti, gde litološki preovlađuje glina. U okviru ovog kompleksa mogu se registrovati komadi matične stene. Genetski posmatrano ovaj kompleks je nastao raspadanjem matične stene i deluvijalnim procesima taloženja gde debljina, u pojedinim delovima terena, ide i preko 15 m. Glina je svetlo smeđe do smeđe boje, često sa sadržajem prašine i peska. Obzirom na litološki sastav ovaj kompleks je usvojen kao uslovno bezvodan deo terena.
- Mulj (flotacijski mulj) - sedimentni kompleks antropogenog porekla. U okviru ovog kompleksa podzemna voda je ili kapilarno vezana ili sa veoma slabim oticajem.
- Pesak (flotacijski pesak) - sedimentni kompleks antropogenog porekla, heterogenog sastava. Karakterišu ga dobre filtracione karakteristike.
- Nasip, humus - kompleks malog rasprostranjenja litološki predstavljen glinama, prašinom i drobljenim stenskim materijalom.

Ovako prikazana determinacija slojeva se pokazala veoma dobra sa aspekta hidrogeologije, jer se u okviru determinisanog sloja može dati jedinstvena ocena o stepenu vodopropusnosti, tipa poroznosti i načina strujanja podzemnih voda. U svakom slučaju ona ukazuje na veoma složenu hidrogeološku građu terena, gde je većina pripovršinskih stenskih kompleksa veoma ispucala i dobro vodopropusna ili potpuno karstifikovana sa izuzetno velikim oticajem u matičnu stenu.

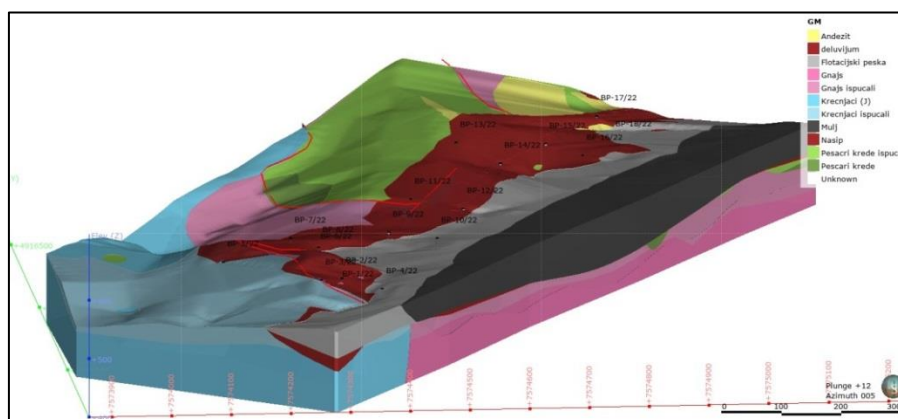
#### 4. FORMIRANJE GEOTEHNIČKOG I HIDROGEOLOŠKOG MODELA TERENA

Na osnovu rezultata dobijenih kartiranjem jezgra, inženjerskogeološkog kartiranja terena, kao i geofizičkih istraživanja (inkorporiranje geoloških podataka u model prikazano je na slici 4), formirani su 3D inženjerskogeološki i hidrogeološki modeli terena od interesa, koji prikazuju građu sektora br. 6 u sadašnjem stanju i mogu da posluže kao osnova za dalje simulacije nadvišenja, odnosno proširenja jalovišta na ovom prostoru (slike 5 i 6, respektivno).

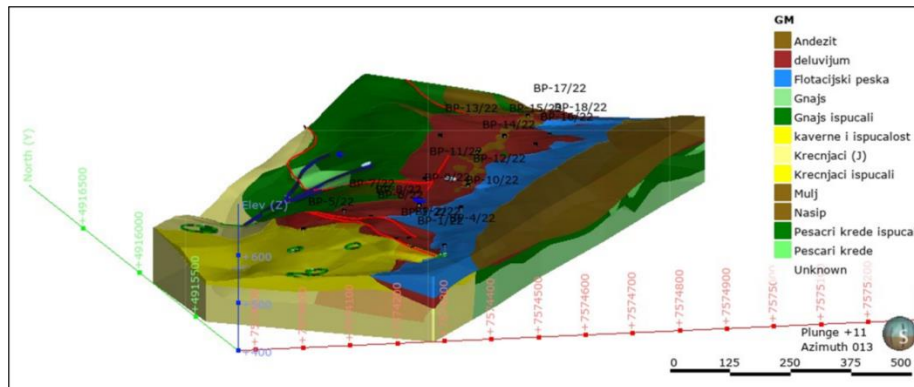
Svim izdvojenim jedinicama i kompleksima u prikazanim modelima dodeljene su kvantitativne vrednosti geotehničkih, odnosno hidrogeoloških parametara.



Sl. 4. Formiranje geološkog modela terena na osnovu rezultata sprovedenih istraživanja



Sl. 5. 3D prikaz inženjerskogeološkog modela terena



Sl. 6. 3D prikaz hidrogeološkog modela sa svim tipovima izdani

## ZAKLJUČAK

Dobijenim rezultatima sprovedenih geoloških istraživanja jalovišta na području sektora br. 6 flotacijskog jalovišta „Valja Fundata“ u Majdanpeku, je u potrebnoj meri definisana inženjerskogeološka i hidrogeološka građa terena, koja će poslužiti kao podloga za izradu TRP-a proširenja jalovišta i njegovu eventualnu sanaciju.

Geotehnički i hidrogeološki modeli pokazali su da će se budućim proširenjem flotacijskog jalovišta u sektoru br. 6 angažovati teren složene građe i uslovno povoljnih geotehničkih i hidrogeoloških svojstava za predmetnu rudarsku aktivnost.

Nakon izvršenog projektovanja proširenja jalovišta, potrebno je geotehničke modele terena dopuniti novoizvedenim stanjem i na njima izvršiti proveru geotehničkih i hidrogeoloških uslova nadgradnje za koje će se projektanti odlučiti. Ove proračune bi trebalo uraditi softverskim paketima namenjenim za geotehničke analize (baziranim na metodama konačnih elemenata i granične ravnoteže, na primer RS2, Slide2, i sl.), kao i hidrogeološke proračune i analize.

## ZAHVALNICA

*Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2023. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-47/2023-01/200052.*

**LITERATURA**

- [1] N. Gojković, R. Obradović, V. Čebašek, Stabilnost kosina odlagališta tehnogenih materijala, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2008.
- [2] B. G. Look, Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables, Taylor & Francis Group, London, UK, 2007.
- [3] P. Milanović, S. Torbica, Klasifikacije stenskog masiva i njihova primena, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 1997.
- [4] M. Ljubojev, R. Popović, Osnovi geomehanike, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, 2006.

**ODREĐIVANJE PARAMETARA SMIČUĆE ČVRSTOĆE NA  
TRIAKSIJALNIM UREĐAJIMA**

**DETERMINATION OF THE SHEAR STRENGTH PARAMETERS ON  
TRIAXIAL DEVICES**

Ivan Jovanović<sup>1a</sup>, Dragan Ignjatović<sup>1b</sup>, Katarina Milivojević<sup>1c</sup>

<sup>1</sup>Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Srbija,  
e-mail: ivan.jovanovic@irmbor.co.rs

**Orcid:**

<sup>1a</sup> <https://orcid.org/0009-0000-5174-3734>;

<sup>1b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2333-6853>; <sup>1c</sup> <https://orcid.org/0009-0000-1306-4044>

**Izvod**

*U mehanici tla proučavaju se osobine tla, odnosno važne osobine prema kojima se može tlo klasifikovati. Na osnovu toga dobijaju se informacije kako se ispitivano tlo može koristiti, na primer kakvo je tlo povoljno za izgradnju različitih vrsta objekata, koje je tlo povoljno za izgradnju nasipa, itd. Postoji više načina određivanja elemenata unutrašnjeg otpora tla, kohezije i ugla unutrašnjeg trenja, pomoću laboratorijskih opita, među kojima su najpoznatiji opit direktnog smicanja, opit triaksijalne kompresije i opit jednoaksijalne čvrstoće na pritisak. U ovom radu će biti opisani rezultati „CU“ triaksijalnog opita.*

**Ključne reči:** mehanika tla, triaksijalni opit, smičuća čvrstoća, ugao unutrašnjeg trenja

**Abstract**

*The soil properties are studied in mechanics, that is, the important properties according to which the soil can be classified. Based on mechanics, the information is being obtained on how the tested soil can be used. For example: which soil is favorable for the construction of various types of structures, which soil is favorable for the construction of embankments, etc. There are several ways to determine the elements of internal soil resistance, cohesion and angle of internal friction, using the laboratory tests, among which the most famous are the direct shear test, triaxial compression test and uniaxial compressive strength test. This paper will describe the "CU" triaxial test results.*

**Keywords:** soil mechanics, triaxial test, shear strength, angle of internal friction

**1. UVOD**

Mehanika tla je grana fizike tla i primenjene mehanike koja izučava i opisuje tlo u prostoru na kojem ili unutar koga se gradi. [1] Ona koristi laboratorijske metode ispitivanja i terenske „in-situ“ metode ispitivanja. Rezultati terenskih ispitivanja često daju tačnije rezultate od laboratorijskih. [2]

Uporedo sa mehanikom stena, mehanika tla pruža teoretsku osnovu za analizu u geotehničkom inženjerstvu i inženjerskoj geologiji. [3] Mehanika tla se koristi za analiziranje deformacija tla, protoka fluida unutar prirodnih i veštačkih struktura koje su podržane tlom ili napravljene od tla, ili struktura koje su zakopane u tlu. [4] Primer su građevinski i mostovski temelji, potporni zidovi, brane i ukopani cevovodni sistemi.

Mehanikom tla se opisuje geneza i sastav zemljišta, razlika između poreznog pritiska vode i intergranularnog efektivnog stresa, kapilarnog dejstva fluida u porama tla, klasifikuju tla, njihovo curenje i propusnost, daje se vremenski zavisna promena zapremine usled istiskivanja vode iz sićušnih pora tkz. konsolidacija, određuje otpornost na smicanje i krutost tla. [1,2]

Postoji više načina određivanja elemenata unutrašnjeg otpora tla, kohezije i ugla unutrašnjeg trenja, pomoću laboratorijskih opita, među kojima su najpoznatiji opiti direktnog smicanja, opit triaksijalne kompresije i opit jednoaksijalne čvrstoće na pritisak [4].

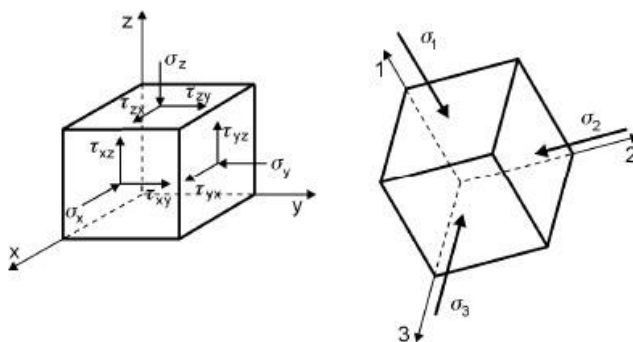
U ovom radu će biti opisani rezultati „CU“ triaksijalnog opita.

## 2. TEORIJSKE OSNOVE

Naponsko-deformacijsko stanje tla ima veliki značaj pri projektovanju i izgradnji objekata na njegovoj površini. [5]

S obzirom na veliku raznolikost tla i njegovih svojstava, teško je razraditi model koji može opisati njegovo naponsko-deformacijsko stanje. [6] Zato je veoma važno razraditi jednostavan strukturni model koji odražava sve osobenosti tla i njegova fizičko-mehanička i deformaciona svojstva.

Na slici 1 prikazan je opšti slučaj stanja napona na modelu kocke. Na svaku površ elementarne kocke deluju normalni i smičući naponi na šest ravni, od kojih su svake dve međusobno paralelne. [7]



Sl. 1. Naponi u tački



Prema datoj slici, postoje tri međusobno upravne ravni u kojima su smičući naponi jednaki nuli, a normalni naponi su glavni naponi označeni sa  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  i  $\sigma_3$  [8,9].

Matematički gledano, veličine glavnih napona su tri međusobno nezavisne veličine, što znači da ovi naponi mogu biti tri proizvoljne vrednosti sa istim ili različitim predznacima. [10]

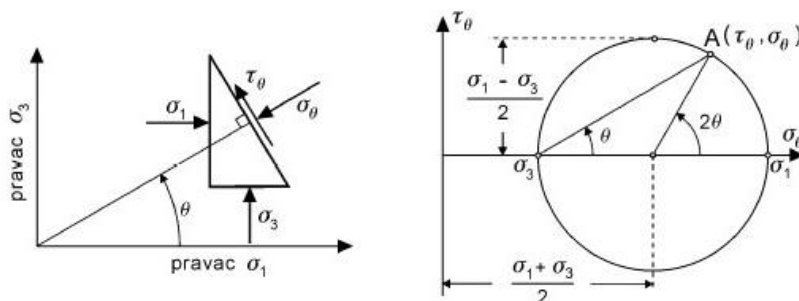
U praksi se često analiziraju stanja napona u dve dimenzije, tj. ravno stanje deformacija, kada su naponi upravni na razmatranu ravan po veličini negde između maksimalnog i minimalnog glavnog napona.

Dakle, postoji normalni napon  $\sigma_z$ , ali su tangencijalni naponi  $\tau_{zx}$  i  $\tau_{zy}$  jednaki nuli. Problemi ove vrste su veoma česti u mehanici tla.

Jedna od važnijih veličina, koje figurišu u ovakvom pristupu, je razlika glavnih napona ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) koja se naziva devijatorom napona. [8,9]

Ako su date veličine i pravci glavnih napona  $\sigma_1$  i  $\sigma_3$ , prema slici 2, moguće je izračunati normalni napon i napon smicanja u ravni sa proizvoljnom orijentacijom korišćenjem uslova ravnoteže.

Jednačine koje u potpunosti opisuju naponsko stanje definišu jednačinu Morovog kruga (slika 2). [10] Svaka tačka A predstavlja stanje napona koji deluju na ravan čija normala zaklapa pravac  $\Theta$  sa pravcem maksimalnog glavnog napona.



Sl. 2. Opis napona Morovim krugom

Jednačine normalnog i tangencijalnog napona pri smicanju su:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \quad (1)$$

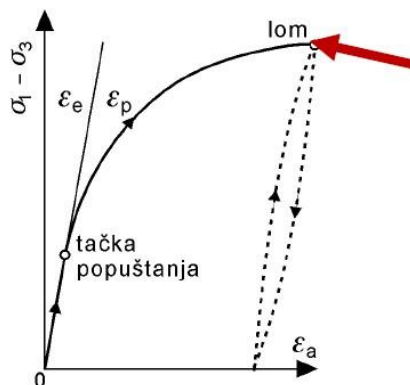
$$\tau_{\theta} = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \quad (2)$$

Iz pomenutih izraza i sa slike 2 može se videti da je maksimalni napon smicanja  $\tau_{\max}$  uvek jednak  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ , odnosno da je maksimalni smičući napon jednak poluprečniku Morovog kruga napona. Taj napon deluje u ravnima koje zaklapaju ugao od  $\pm 45^\circ$  u odnosu na pravac maksimalnog glavnog napona.

Veoma često je poželjno na jednom dijagramu opisati više naponskih stanja u različitim tačkama mase tla ili sukcesivnu promenu naponskog stanja u nekom posmatranom elementu tla ili u uzorku tla. Prikazivanje stanja napona tačkom omogućava da se sukcesivne promene totalnih i efektivnih napona u  $\sigma$ - $\tau$  dijagramu, opišu jednom linijom koja se naziva putanja napona.

Smičuća čvrstoća tla predstavlja najveći smičući napon koji se može naneti strukturi tla u određenom pravcu. Smičući naponi povećavaju deformacije do granične maksimalne veličine napona koja predstavlja smičuću čvrstoću tla.

Kada je dostignut najveći smičući napon, praćen plastičnim deformacijama, kaže se da je došlo do loma, pri čemu je mobilisana sva smičuća čvrstoća tla, slika 3. [2,5] Tada smičući naponi imaju tendenciju da pomere deo mase u odnosu na ostalu masu tla ukoliko je lom lokalizovan samo u ravni smicanja tj. gde se pojavljuje klizna površ.



Sl. 3. Zavisnost smičućeg napona od plastične deformacije do loma [5]

### 3. ISPITIVANJE SMICANJA U TRIAKSIJALNOM APARATU

Ispitivanje smicanja vrši se na triaksijalnom aparatu, kojih ima različitih konstrukcija, ali se svi zasnivaju na istom principu.

Neporemećeni uzorak u obliku valjka postavi se vertikalno na postolje i izloži se bočnom pritisku tečne mase sa svih strana, a zatim vertikalnom pritisku

koji se postupno povećava, dok se ne izazove lom uzorka po površini najmanjeg otpora smicanja. Na osnovu čvrstoće smicanja pri lomu izračunavaju se kohezija i ugao unutrašnjeg trenja tla.

Triaksijalni aparati se prema nameni mogu svrstati u tri grupe: za sitnozrna, srednjozrna i krupnozrna tla.

Za sitnozrna tla, u koja spadaju glina, prašina i pesak, upotrebljavaju se triaksijalni aparati za uzorke malog prečnika, većinom  $\varnothing=3,8$  cm, visine  $h=2,0-2,5$   $\varnothing$  najčešće 7,6 cm. [1]

Za srednjozrna tla, u koja spadaju gline sa peskom i sitnim šljunkom do veličine 3 cm, upotrebljavaju se aparati za uzorke prečnika 7 do 10 cm, visine,  $h=2,0-2,5$   $\varnothing$  najčešće 14 cm odnosno 20 cm. [1]

Za krupnozrna tla, u kojoj spadaju šljunak i drobina do veličine zrna 20 cm, upotrebljavaju se veliki triaksijalni aparati za uzorke prečnika 50, 75 i 100 cm, visine najčešće  $h = 2 \varnothing$ . [1]

Međutim, danas se rade triaksijalni aparati koji se mogu upotrebljavati za uzorke sitnozrnog i srednjozrnog tla prečnika  $\varnothing=3,5-10,0$  cm, s tim što su oni tako konstruisani da se u njih mogu po potrebi uključiti i odgovarajuće ćelije.

#### **4. KONSOLIDOVANI NEDRENIRANI ILI „CU“ OPIT TRIAKSIJALNE KOMPRESIJE**

Nedrenirani opiti sa konsolidacijom, nazvani „CU“ opiti (consolidated and undrained tests). Opiti se vrše sa konsolidacijom uz dreniranje uzorka za vreme primene svestranog pritiska sve dok se pritisak porne vode ne izjednači u celom uzorku, što traje nekoliko časova, u zavisnosti od vrste tla.

Ovi opiti se najčešće primenjuju, jer najviše odgovaraju naponskom stanju u prirodnom tlu. Vrše se za koherentna i nekoherentna tla.

Opit se sprovodi na prirodno zasićenim uzorcima ili na uzorcima koji se zasićuju vodom pre opterećenja. Meri se porni pritisak i mogu se odrediti parametri smičuće čvrstoće za efektivne napone.

Opit se izvodi tako da se u prvoj fazi omogućava dreniranje i promena zapremine na račun istisnute vode iz uzorka koja se meri u bireti pri otvorenom ventilu i zatvorenom ventilu. Pri tome se meri promena zapremine u funkciji vremena i registruje se proces konsolidacije. Nakon završetka primarne konsolidacije u drugoj fazi se nanosi aksijalni pritisak kontrolisanom brzinom i meri se promena pornih pritisaka u funkciji aksijalne deformacije.

Problem nepotpunog zasićenja i tačnosti merenja pornih pritisaka se u određenim okolnostima može rešiti dopunskim zasićenjem i primenom sistema povratnog hidrostatičkog pritiska koji se preko porozne ploče nanosi u uzorak uz istovremeno i jednako povećanje svestranog napona u prvoj fazi opita.

Rezultati ovog opita mogu se prikazati Morovim krugovima totalnih napona i efektivnih napona.

## 5. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA DOBIJENIH REZULTATA

U ovom radu biće prikazani rezultati dobijeni konsolidovanim nedreniranim „CU“ opitom, koji su izvedeni na triaksijalnom aparatu firme GDS instruments, iz Velike Britanije [11], koji se nalazi u Laboratoriji za geomehaniku Instituta za rudarstvo i metalurgiju u Boru.

Triaksijalni automatizovani aparat je sistem za triaksijalno testiranje zasnovan na opterećenju. Sistem je konfigurisan izborom iz niza ramova opterećenja, triaksijalne ćelije, kontrolera pritiska i softvera. Korisnik može sam da izabere okvir opterećenja, kontrolere pritiska, i triaksijalnu ćeliju. Softver direktno kontroliše ćeliju i povratni pritisak, kao i brzinu testiranja za upravljanje svim prikupljenim podacima. Automatska kontrola omogućava stalni nastavak testova i povećanje propusnosti testova. Aparat ima niz standardnih podešavanja kako bi pomogao korisniku da identifikuje ispravnu postavku. Podešavanja su zasnovana na pritisku na kojem će sistem raditi.

Materijali, koji su korišćeni za triaksijalno „CU“ ispitivanje su uzorkovani sa tla čije su karakteristike date u tabeli 1.

**Tabela 1.** Karakteristike uzoraka

Broj uzorka	1
Dužina, mm	100
Prečnik, mm	50
Sadržaj vlage, %	25,81
Nasipna jedinična težina, kN/m <sup>3</sup>	19,96
Suva jedinična težina, kN/m <sup>3</sup>	15,86

Materijal se uzorkuje cilindrom, dimenzija 100 x 50 mm. Uzorak se istisne i ugradi u gumenu membranu, koja se na krajevima pričvršćuje gumenim prstenovima za laku ploču (kapu). Potom se odozgo na uzorak postavi cevčica sa pločicom za dovod vode pod pritiskom. Tako pripremljeni materijal se ugradi u tri cilindrične ćelije od pleksiglasa. Ćelije se pričvrste velikim zavrtnjima za poklopac i u njih se pusti voda.

Kada je cilindar ispunjen vodom, može se primeniti bočni pritisak na uzorak. Veličina bočnog pritiska se može podesiti prema potrebi. U ovom slučaju je za prvi korak merenja primenjen bočni pritisak od 50 kPa. Tokom primene ovog pritiska, preko računara se može očitavati grafika zavisnosti pornog pritiska od vremena. U ovoj fazi se može očitati i parametar B, koji se određuje merenjem pritiska porne vode  $\Delta u$  za različite priraštaje svestranog pritiska  $\Delta\sigma_3$  u ćeliji triaksijalnog aparata. Cilj je da parametar B dostigne vrednost oko 0,95 i tada možemo reći da je uzorak zasićen. Ovo predstavlja prvu fazu „CU“ opita.

Ako je parametar B manji od 0,95 prelazi se na sledeći korak.

To je korak u kome se ide na drugi stepen zasićenja. Preko uređaja, koji služi za nanošenje povratnog hidrostatičkog pornog pritiska, nanosi se kontrolisana veličina hidrostatičkog pritiska u unutrašnjosti uzorka, kako bi se najveći deo vazduha između membrane i uzorka i u porama istisnuo, a ostatak rastvorio u pornoj vodi. Prilikom primene povratnog pornog pritiska, mora se voditi računa da se njegova veličina bira tako da ne menja veličinu efektivnog napona, što zahteva istovremeno povećanje svestranog pritiska za istu veličinu. U našem slučaju, zadržana je vrednost bočnog pritiska od 50 kPa, i aplikovan je povratni hidrostatički pritisak od 30 kPa. Ovaj korak se primenjuje sve dotle dok se vrednost pornog pritiska ne ustali odnosno smanji. Vrednost pornog pritiska možemo očitati tokom samog procesa na dijagramu vreme-porni pritisak.

Ako i nakon ovog koraka zasićenje uzorka nije potpuno, potrebno je ponovo primeniti samo bočni pritisak na sam uzorak. Isključuje se vod sa povratnim pritiskom, a na uzorak se nanosi veći bočni pritisak. U našem slučaju, bočni pritisak je povećan na 100 kPa. Tokom procesa se proverava vrednost parametra B. Ako parametar B dostigne vrednost 0,95 prekidamo ovaj korak i nastavljamo sa ogledom. U slučaju da parametar B nije dostigao željenu vrednost, potrebno je ponoviti drugi korak zasićenja uzorka, uz primenu hidrostatičkog pritiska u unutrašnjosti uzorka.

Kada parametar B dostigne željenu vrednost, znači da je proces zasićenja završen i da se može preći na proces konsolidacije. U procesu konsolidacije povećava se ćelijski pritisak. U ovom koraku dolazi do smanjenja zapremine uzorka, što možemo očitati na dijagramu promene zapremine u jedinici vremena.

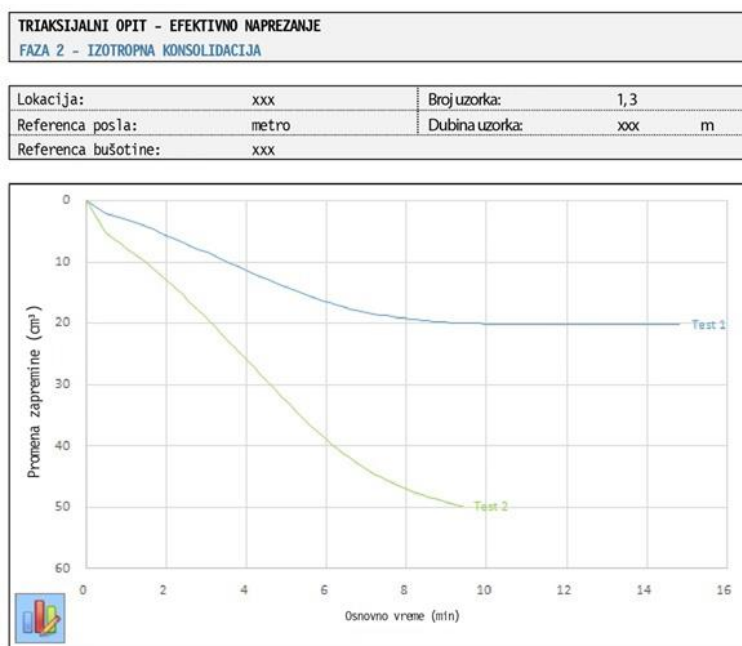
Nakon završetka procesa konsolidacije i pre početka nanošenja aksijalnog opterećenja, otvara se ventil, kako bi se merio porni pritisak tokom deformisanja do loma.

Princip nanošenja aksijalnog opterećenja je sledeći:

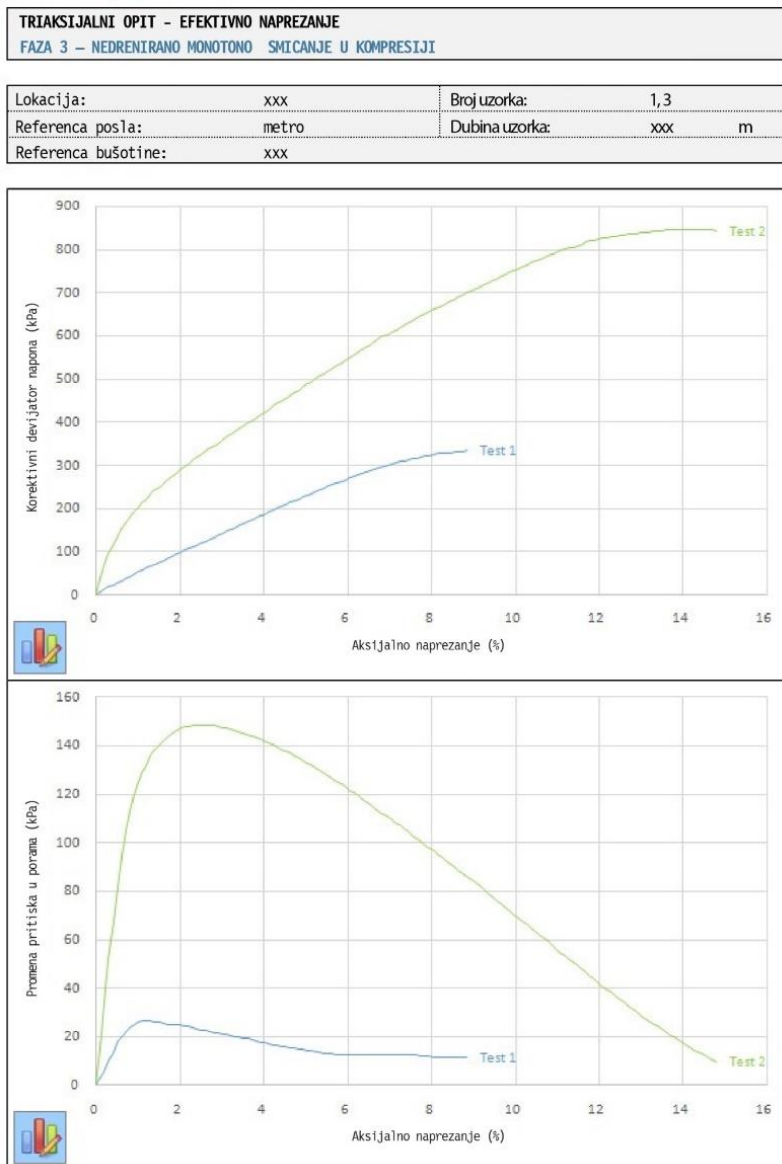
Uz pomoć numeričkog selektora koji se nalazi na prednjoj ploči, podešava se početna brzina (mm/min) u skladu sa vrstom ispitivanja koja će se obaviti. Prema izabranoj brzini, mikroprocesor prenosi impulse koji aktiviraju elektronsku ploču, i obezbeđuju konstantno kretanje pokretne poprečne grede. Nanošenje opterećenja ide sve dotle dok se na uzorku ne registruju deformacije loma uzorka.

Za kompletan opit se najčešće ispituju najmanje 3 uzorka sa različitim veličinama svestranih (bočnih) pritisaka  $\sigma_3$  u ćeliji. U suštini, prvi uzorak se izlaže najmanjim usvojenim naponima, drugi sa najmanje dvostrukom veličinom pritiska primenjenim na prvom uzorku, treći sa najmanje dvostrukom veličinom pritiska upotrebljenim za drugi uzorak.

Grafički prikazi dobijenih rezultata triaksijalnog opita za uzorak 1 prikazani su na slikama od 4 do 6.

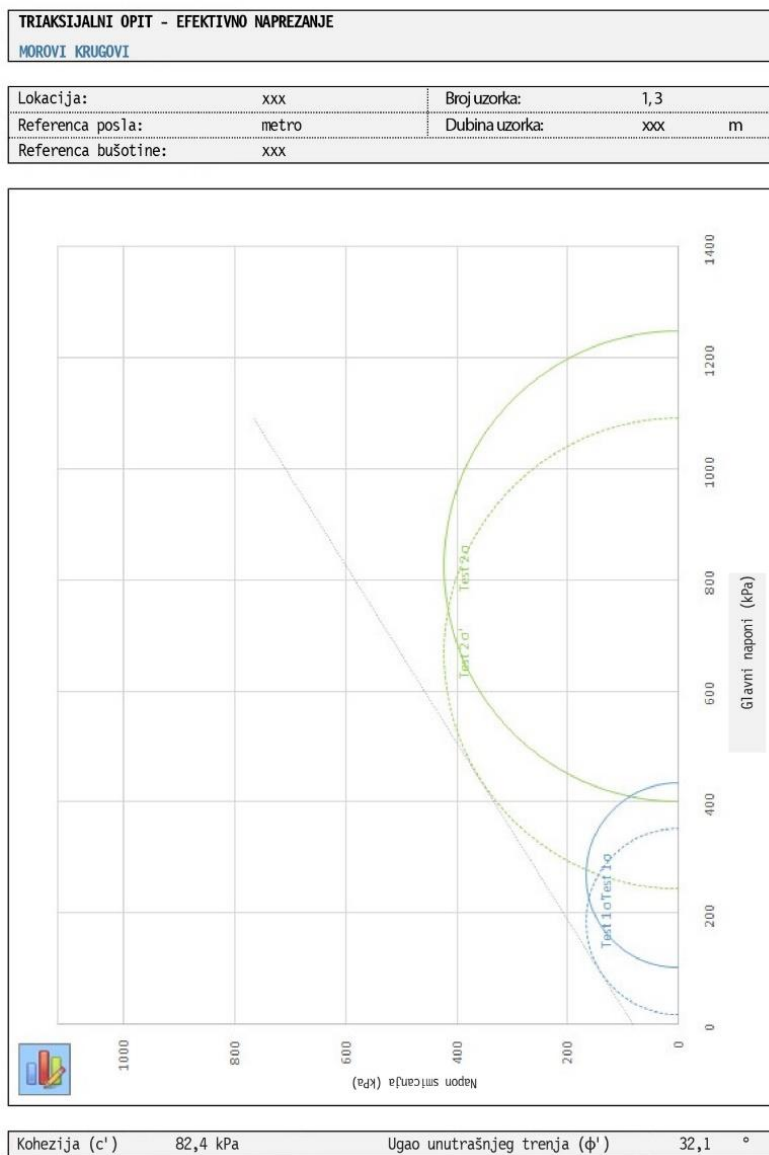


Sl. 4. Grafički prikaz rezultata triaksijalnog opita - izotropna konsolidacija za uzorak 1



Sl. 5. Grafički prikaz rezultata triaksijalnog opita - nedrenirano monotono smicanje u kompresiji za uzorak 1





Sl. 6. Grafički prikaz rezultata triaksijalnog opita – Morovi krugovi za uzorak 1

Kod procesa konsolidacije dolazi do promene zapremine u vremenu. Na uzorak deluju bočni pritisci i smanjuju mu zapreminu odnosno vrše njegovo sabijanje. Onog trenutka kada se uzorak prilagodio i više ne reaguje na delovanje bočnih pritisaka, znači da je došlo do konsolidacije. Na slici 4 je prikazana promena zapremine u vremenu. Dolazi do promene zapremine u

vremenu zbog delovanja bočnih pritisaka. Kada se uzorak prilagodio bočnim pritiscima linija počinje da bude ravna što znači da je došlo do konsolidacije. Na slici 4 su prikazana dva probna tela Test 1 i Test 2.

Nakon procesa konsolidacije sledi proces loma i o tome govori grafički prikaz na slici 5. Na uzorak se deluje i bočno i aksijalno. To znači da uzorak počinje da se stiska, i na taj način se vrši i njegovo smicanje. Na prvom delu grafika na slici 5 imamo korektivni devijator napona i aksijalno naprezanje. Korektivni devijator napona predstavlja razliku između bočnih pritisaka i aksijalnog napona. Aksijalno naprezanje predstavlja sabijanje uzorka, odnosno koliko je njegovo smanjenje. Grafik pokazuje koliko je uzorak sabijen dok nije pukao. Napon raste, a samim tim raste i aksijalno pomeranje i smanjuje se visina uzorka. Onog trenutka kada se linija ispravi uzorak se polomio. Na dalje bi linija opadala.

Drugi deo grafika je promena pornog pritiska i aksijalno pomeranje. Porni pritisak predstavlja otpor vode prilikom pritiskanja uzorka. Dok se pritiska uzorak, voda vrši otpor i što je pritisak veći samim tim i porni pritisak je veći. Kada uzorak krene da se lomi linija počinje da pada, a voda u uzorku napušta sam uzorak. Voda je napustila uzorak, pošto je došlo do loma i pošto je brzina nanošenja opterećenja veća.

Na slici 5 su prikazana dva probna tela Test 1 i Test 2.

I na kraju, grafik prikazan na slici 6 (Morovi krugovi) predstavlja krajnji rezultat ispitivanja. On nam je potreban radi nalaženja kohezije i ugla unutrašnjeg trenja. Isprekidani krugovi označavaju efektivne napone, odnosno napone koje primi sam uzorak bez vode. Puni krugovi označavaju totalne napone odnosno napone koje primi uzorak sa pornim pritiskom,  $\Delta u$ . Ugao unutrašnjeg trenja je ugao koji zaklapa tangenta sa x osom. A kohezija se očitava na y osi i ona se nalazi u tački dodirivanja tangente i y ose.

Na osnovu izvršenog ispitivanja i prikazanih grafika, dobijeno je da za uzorak 1, kohezija iznosi 82,4 kPa, a ugao unutrašnjeg trenja je 32,1 stepen, što ukazuje da je uzorak 1 kompaktniji i tvrdi, odnosno dobijeni rezultati nam ukazuju da se radi o laporovitom uzorku. Što je veća vrednost kohezije to je materijal čvršći i kompaktniji. Samim tim je i sila loma veća.

## 6. ZAKLJUČAK

Triaksijalni opit je najprecizniji opit za određivanje unutrašnjeg otpora tla (kohezije i ugla unutrašnjeg trenja). Ova vrsta opita („CU“) se najčešće primenjuje, jer najviše odgovara naponskom stanju u prirodnom tlu. Vrše se na koherentnom i nekoherentnom tlu. Pošto nedrenirani opiti sa konsolidacijom uz merenje pritiska porne vode daje praktično iste rezultate kao i ostale vrste triaksijalnih opita, ovaj opit se i najčešće primenjuje.

Smičuća čvrstoća tla se ispituje radi izgradnje objekata čije je opterećenje veće nego obično. Naročito je bitna za ispitivanje kada postoji promena bočnih pritisaka po dubini. Kod izgradnje privrednih i stambenih objekata, brana, nasipa, metroa, „CU“ opiti se najčešće primenjuju, jer najviše odgovaraju naponskom stanju u prirodnom tlu.

Kod ovih ispitivanja uzorak se stavlja u ćeliju triaksijalnog aparata, opterećuje pritiskom sa svih strana, a zatim se opterećuje povećanjem aksijalnog napona do loma, pri čemu su radijalni naponi konstantni. U toku opita pod raznim uslovima registruju se naponi i deformacije uzorka i na osnovu dobijenih podataka izračunava se čvrstoća tla pri pritisku.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja, zaključuje se da je ispitivani uzorak više laporovit, da ima visoke vrednosti kohezije i ugao unutrašnjeg trenja.

## ZAHVALNICA

*Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2023. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-47/2023-01/ 200052.*

## LITERATURA

- [1] R. Obradović, N. Najdanović, *Mehanika tla u inženjerskoj praksi*, Treće dopunjeno i prošireno izdanje, Rudarski institut Beograd - Zemun, 1999, str. 1-19.
- [2] M. G. Uljarević, *Mehanika tla od teorije do prakse*, AGM knjiga doo Beograd – Zemun, 2019, str. 21-28.
- [3] W. Powrie, *Soil Mechanics*, 2nd Edition, Spon Press, Abingdon, Oxon, USA, 2004, p. 702.
- [4] W. T. Lambe, Robert V. Whitman. *Soil Mechanics*, Wiley, 1991, p. 29.
- [5] S. Kostić, *Mehanika stijena i tla*, Skripta, Univerzitet u Banja Luci, Rudarski fakultet, 2014, str. 203-241.
- [6] N. Doneva, *Principi stabilizacije stenskog masiva nakon izrade podzemne prostorije*, Podzemni radovi, br. 17, 2010, str. 13-19.
- [7] *Naponi i deformacije*, Predavanja iz mehanike tla, Rudarsko-geološki fakultet Beograd, 2021, str. 1-22.
- [8] S. Jocković, *Čvrstoća tla*, Građevinski fakultet Beograd, 2021, str. 1-15.
- [9] M. M. Maksimović, *Mehanika tla*, četvrto izdanje, AGM knjiga doo Beograd – Zemun, 2008, str. 90-95.
- [10] S. Brčić, *Otpornost materijala*, Državni univerzitet u Novom Pazaru, 2016, str. 26-57.
- [11] <https://www.gdsinstruments.com/gds-products/type/static-triaxial-testing>

UDK: 504.06:628.515:622:681.325(045)=163.41

Primljen: 22.12.2022.

DOI: 10.5937/bakar2301023B

Prerađen: 01.03.2023.

NAUČNI RAD

Prihvaćen: 06.03.2023.

Oblast: Rudarstvo i zaštita životne sredine

**UNAPREĐENJE ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE U  
OKOLINI RUDNIKA AUTOMATIZACIJOM MONITORINGA  
KVALITETA TEKUĆE VODE**

**IMPROVEMENT OF THE ENVIRONMENTAL PROTECTION IN  
THE MINE AREA BY THE MONITORING AUTOMATIZATION  
OF THE FLOWING WATER QUALITY**

Krsta Brčić

Industrijski sistemi automatskog upravljanja – ISAU, Beograd

E-mail: krsta.brcic@gmail.com

**Izvod**

*Zaštita životne sredine i obnovljivi izvori energije su prioritet svih investicija širom sveta. Sistemi za praćenje parametara životne sredine opremljeni su raznim senzorima, uređajima, mrežama i softverom za prikupljanje, obradu, praćenje i prikaz podataka o parametrima životne sredine. U tom smislu, u ovom radu se razmatra automatizacija praćenja kvaliteta vode reke na području rudnika bakra „Čukaru Peki“ u Srbiji. Za sada se kvalitet vodotoka u području prati uzimanjem uzoraka vode i analizom u nadležnoj laboratoriji. Automatizacija bi višestruko poboljšala kvalitet praćenja. Pri tome se mogu koristiti znatno jeftiniji ("low cost") uređaji. Ovi uređaji su jeftiniji, a njihov kvalitet je za konkretnu primenu u potpunosti na nivou onih koji se na tržištu nude kao komercijalni. Problem je ukratko razmatran i u pogledu troškova i benefita.*

***Cljučne reči:** oblast rudnika, zaštita životne sredine, parametri, merenje, senzori, automatizacija, telekomunikacione mreže*

**Abstract**

*The environmental protection and renewable energy sources are the priority of all investments around the world. The environmental monitoring systems are equipped with various sensors, devices, networks and software to collect, process, monitor and display data on the environmental parameters. In that sense, this paper discusses the automation of river water quality monitoring in the area of the "Čukaru Peki" copper mine in Serbia. Until now, the water quality in the area is being monitored by taking and analyzing the water samples in the competent laboratory. The automation would improve the quality of monitoring multiple times. At the same time, the significantly cheaper ("low cost") devices can be used. These devices are cheaper and their quality is for a specific application completely at the level of those offered on the market as commercial ones. The problem is briefly considered in terms of costs and benefits.*

***Keywords:** mine area, environmental protection, parameters, measurement, sensors, automation, telecommunication networks*

## 1. UVOD

Brzi napredak u tehnološkim inovacijama, uključujući automatizaciju, digitalizaciju i energetske efikasnosti, suštinski menjaju način na koji rudarski sektor funkcioniše. Sve se to primenjuje i na zaštitu životne sredine u okolini rudnika. Rudnici su inače veliki zagađivači životne sredine, kako vazduha tako i vode i zemljišta. Ne samo otvorene već i podzemne eksploatacije izazivaju stres koji ima za posledicu i promene na terenu. Sve to nameće neophodnost da se prate i analiziraju parametri životne sredine u okolini rudnika [1].

Pri eksploataciji rudnih resursa i preradi rude stvaraju se gomile otpada, jalovine, čvrstog otpada i drugo, tako da na terenu nastaju značajne promene. To pogađa poljoprivredno zemljište i oštećuje okruženje za uzgoj useva – što utiče na prihode od poljoprivrede i na socijalne uslove. Sledi da je ekonomski prosperitet na osnovu eksploatacije rudnog bogatstva u suprotnosti sa održavanjem životne sredine. U svetu se to razmatra kao problem koji treba hitno rešiti. Da bi se to ostvarilo, neophodno je pratiti štetni uticaj na životnu sredinu merenjem emisije i akumulacije štetnih materija u vazduhu, vodi i tlu. Danas se u celom svetu investira u zaštitu životne sredine i obnovljive izvore energije. Sistemi za praćenje parametara životne sredine se opremaju naprednim senzorima, uređajima, mrežama i softverom za prikupljanje, obradu, praćenje i prikaz podataka o parametrima životne sredine.

U ovom radu se, u smislu napred navedenog, razmatra automatizacija praćenja kvaliteta vodenog toka reke u području rudnika bakra „Čukaru Peki“ u Srbiji. Za sada se praćenje kvaliteta vodenog toka vrši uzorkovanjem vode i analizom koja se vrši u nadležnoj laboratoriji. Automatizacijom bi se kvalitet monitoringa višestruko unapredio. U svetu se za unapređenje monitoringa parametara životne sredine razmatraju rešenja primenom znatno jeftinijih uređaja („low cost“) u odnosu na klasične. Ovi uređaji su za konkretnu primenu i uslove eksploatacije u potpunosti na nivou klasičnih po kvalitetu, a cena im je znatno niža. Klasični senzori za monitoring parametara životne sredine imaju više opcija, koje u suštini nisu neophodne za konkretnu primenu. Klasični uređaji se isporučuju kalibrisani, imaju mogućnost samočišćenja i nešto duži vek trajanja u odnosu „low cost“ senzore.

U vezi monitoriga kvaliteta vazduha na području grada Bora korišćenjem „low cost“ senzora objavljeno je više radova, tako da ovaj rad predstavlja ne samo razmatranje unapređenja monitoringa kvaliteta vodenog toka reke, već teži da doprinese ukupnom unapređenju monitoriga životne sredine u okolini rudnika uopšte. Posebno ako se pri akviziciji rezultata merenja koristi „Trigger mod“ (merenje okidanjem) i druge tehnike za optimalno iskorišćavanje kapaciteta uređaja i kapaciteta raspoložive komunikacione mreže.

Pored nabrojanog, bitno je istaći da za monitoring životne sredine u okolini rudnika treba da je prvenstveno zainteresovana lokalna zajednica. Iako

korporacija promoviše korporativnu odgovornost u vezi zaštite životne sredine, ipak trka za profitom i zaštita životne sredine su dva sučeljana subjekta.

## 2. MATERIJAL I METODA ISTRAŽIVANJA

Parametri životne sredine u okolini rudnika su potencijalno izloženi uticaju koji nastaje aktivnostima rudnika. Ovde su korišćeni podaci i iskustva izloženi u proučenoj literaturi, stručnim i naučnim publikacijama objavljenih u svetu i kod nas, a odnose se na osnovne informacije o senzorima koji se koriste za monitoring parametara životne sredine u okolini rudnika. Deo proučene literature, koji je smatran reprezentativnim, naveden je u spisku literature ovog rada. Sumirani su i sistematizovani rezultati istraživanja, sa praktičnom primenom na konkretnom primeru.

Uticaj na životnu sredinu pri korišćenju prirodnih resursa je već davno uočen. Tako je nastala i knjiga „Granice rasta“, koju je izdao Rimski klub, tako nazvan skup od sedamdesetak naučnika iz 25 zemalja sveta [2]. Ovom knjigom se htelo ukazati u kojoj će meri do 2100. godine biti negativne posledice po životnu sredinu. Procena je izvedena na osnovu tendencija koje su ostvarene u periodu od 1900. do 1970. godine. Zaključeno je da eksploatacija mineralnih resursa ima izuzetan značaj u ekonomskom razvoju kao rezultat njihovog korišćenja za energiju tako i za industrijske sirovine, ali da to ima i veliki uticaj na životnu sredinu. To je potvrđeno i podacima iz brojnih publikacija [3] koje su objavljene.

U svetu je do sada objavljen veliki broj studija, koje se odnose na praćenje i zaštitu životne sredine, kao i o sistemima za praćenje parametara životne sredine. To se može potvrditi i naći u bazi podataka Web of Science™ Core Collection dostupnih preko interneta, što je u ovom članku uzeto za pristup izvoru materijala.

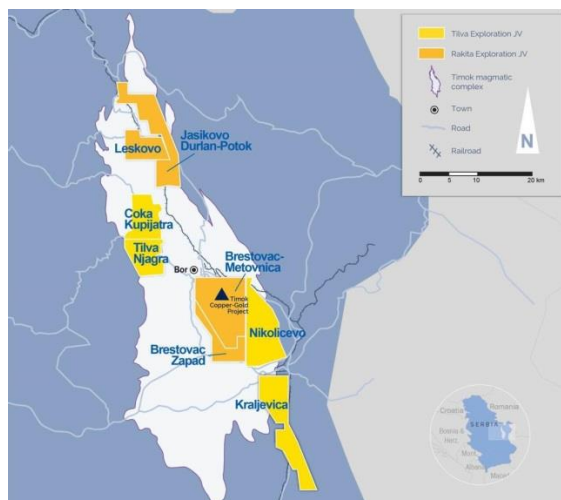
Takođe, brzo su razvijeni i različiti senzori, uređaji i sistemi za praćenje parametara životne sredine. Brojne studije i analize su pokazale, da nove sisteme i rešenja za praćenje parametara životne sredine u okolini rudnika, pored niske cene kapitalnih investicija, odlikuje i niža cena korišćenja i održavanja, a i fleksibilnost. Sistemi na bazi „low cost“ uređaja su posebno jeftiniji od komercijalnih, s tim što pri njihovom uvođenju i instaliranju sam korisnik sastavlja konfiguraciju senzora, bira komunikacionu mrežu i određuje druge detalje, a za verifikaciju angažuje nadležnu laboratoriju. Za klasična, odnosno komercijalna rešenja sve to radi isporučilac istih. Sistem za monitoring na bazi jeftinih senzora u potpunosti zadovoljava industrijske potrebe i u tom pogledu ovi uređaji ne zaostaju u odnosu na karakteristike konvencionalnih, odnosno, komercijalnih sistema. Razlika je u tome što o redovnoj proverbi i verifikaciji tačnosti jeftinijih senzora brine korisnik sistema, odnosno, brinu

zainteresovane strane, u skladu sa relevantnim standardima i propisima, kao i o samom projektovanju i kompletnoj instalaciji.

Rudarska kompanija obično ima i svoju službu tehničkog održavanja uređaja i postrojenja ili ima ugovor sa nekim preduzećem koje se time bavi, tako da te poslove može da realizuje kao deo održavanja, odnosno unapređenja procesa proizvodnje, koje se izvodi pri redovnom periodičnom remontu postrojenja.

Za monitoring životne sredine u okolini rudnika postavljaju se merne stanice (čvorovi) koje imaju merne sonde sa više senzora, računarske module, data logere, telekomunikacione module i solarne panele za napajanje uređaja električnom energijom [4]. Savremene uređaje ove vrste odlikuje pouzdanost, tačnost, mala potrošnja energije, male dimenzije modula, mogućnost programiranja, jednostavno povezivanje, jednostavno korišćenje i robustnost.

Ovde ćemo razmatrati primenu jeftinih senzora, odnosno rešenja povoljniji cena, i automatizaciju sistema za praćenje kvaliteta životne sredine u okolini rudnika bakra „Čukaru Peki“ (slika 1), a koje se odnosi na vodotok na području rudnika. Rudnik se nalazi na 5 do 6 km južno od Bora [5], a na području rudnika protiče Brestovačka reka. Reka je u planinskom delu dužine 5 km, a u preostalom toku do ulivanja u Crni Timok 10 km.

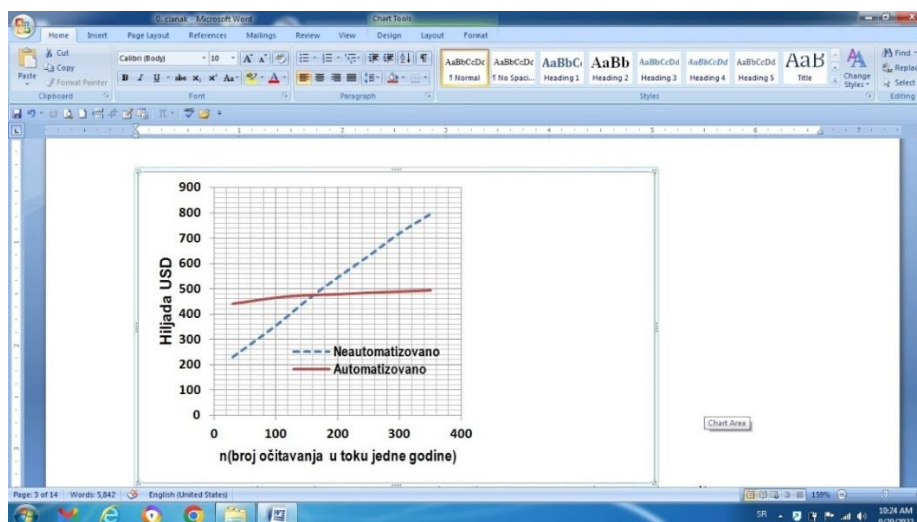


Sl. 1. Okolina rudnika „Čukaru Peki“

Mnoge su studije u svetu rađene u vezi štetnih materija koje nastaju rudarskom proizvodnjom i utiču na životnu sredinu [6]. U tom smislu su rađene i analize rizika od zagađenja otpadnom vodom i drugim štetnim materijama koje potiču od rudnika bakra „Čukaru Peki“ [7]. Monitoringom kvaliteta vodenog toka izbegao bi se u prvom redu rizik od kontaminacije kako vodenog toka tako i okoline štetnim materijama industrijskog porekla. Razmatran je



sadržaj i tehnika merenja, prikupljanja, obrade, prenosa i prikaza podataka o kvalitetu vodenog toka, na osnovu podataka publikovanih studija, analiza, članaka i konkretnih izveštaja.



Sl. 2. Dijagram troškova

Procenu ekonomskog efekta automatizacije monitoringa životne sredine možemo izvesti na osnovu dijagrama prikazanog na slici 2. Na dijagramu su prikazani troškovi kapitalnih investicija sa troškovima upotrebe za jedan konkretan sistem od 37 mernih senzora sa manuelnim prikupljanjem podataka, troškovima kapitalnih ulaganja i troškovima upotrebe mernog senzora kada je automatizovan [8]. Na samom početku troškove čine kapitalne investicije, a tokom eksploatacije imamo troškove korišćenja i održavanja. Vidi se da su troškovi investiranja u automatizovani sistem veći, ali su troškovi eksploatacije znatno niži, te automatizacija vrlo brzo pokazuje svoju isplativost. Podaci su iz perioda kada je automatizacija monitoringa parametara životne sredine bila na početku razvoja. Danas su ti troškovi znatno niži, ali je relativni odnos troškova skoro isti.

### 3. IZBOR SENZORA, MERNA SREDSTVA I SISTEMI

Rudarski otpad i flotaciona jalovina na otvorenom prostoru izloženi su atmosferi i atmosferskim padavinama, i tako štetne materije dospevaju u prostor oko rudnika. Kada nastanu atmosferski uslovi ili oštećenja na instalacijama, onda visok sadržaj teških metala u svim oblicima i može dospeti u životnu sredinu u okolini rudnika. Godinama su razvijane i poboljšavane metode za

pouzdana merenje parametara životne sredine [9], o čemu su urađena brojna istraživanja i postoji obimna literatura i podaci. U tom smislu, bitno je istaći dati problem, jer se tokom razvoja stalno menjaju prednosti jedne od druge tehnike merenja i korišćenja fizičko-hemijskih efekata supstanci u životnoj sredini čije se prisustvo i koncentracije mere. Danas sigurne, jeftine i efikasne metode akvizicije podataka čine da sistemi za praćenje parametara životne sredine imaju veliki potencijal u praćenju i istraživanju rudarskih aktivnosti, koje su bitne za monitoring parametara životne sredine u okolini rudnika [10], slika 3.

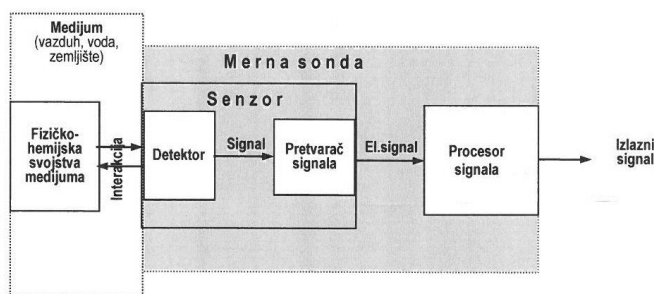
Sistemi za praćenje parametara životne sredine opremljeni su različitim sensorima, hardverom i softverom obezbeđujući efikasan način da se kontinuirano prate parametri životne sredine i vrši prevencija rizika pri eksploataciji prirodnih resursa, a moguće je planiranje rekultivacije zemljišta.

Za određivanje sadržaja neke određene supstance u medijumu koji se analizira koristi se fizičko-hemijsko svojstvo te supstance koje je najizražanije i pogodno da je senzor detektuje (optičko, elektrooptičko, itd.), prikazano u tabeli 1.

**Tabela 1.** *Detekcija senzora*

Princip	Karakteristike	Radni uslovi
Optički	Merni opseg	Temperature
Elektrooptički	Rezolucija	Vlažnost
Elektrolitički	Osetljivost	Mehaničko delovanje
Elektrohemijski	Tačnost	Prskajuća voda
Bioelektrohemijski	Preciznost	Potapanje
Mikrotalasni	Merna neodređenost	

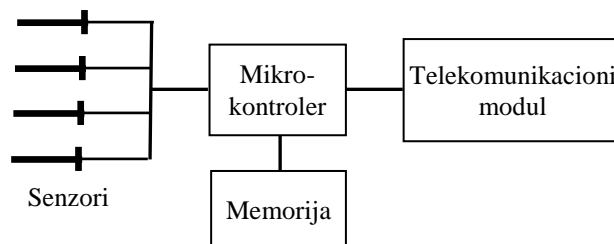
Dakle, koristi se svojstvo koje najbolje determiniše koncentraciju tragova supstance u medijumu koji se analizira i pretvara u električni signal. Pri tome, moraju biti obezbeđeni i svi metrološki uslovi: verodostojnost merenja, osetljivost, merni opseg, rezolucija, i dr. Zatim, bitno je da senzor ima, kao i svi uređaji u sistemu, kratko vreme odziva i da funkcioniše u uslovima radne sredine. Detektorski deo senzora mora da ima adekvatnu interkonekciju sa medijumom koji se analizira. Pri tome je veoma bitna geometrija prostora (komore) u kome je interakcija, kao i da stanje tog medijuma ne bude promenjeno do odgovora (potpune reakcije) senzora, tj. do dobijanja rezultata merenja. Međutim, vreme odgovora senzora mora da prati dinamiku promena u meri da se može govoriti o kontinualnom merenju. U tom smislu, konstrukciju senzora, tj. sonde sa sensorima za detekciju i merenje koncentracije teških metala u vodi možemo prikazati skicom kao na slici 3.



Sl. 3. Model merne sonde sa senzorum

Razvoj senzora je izuzetno dinamičan, tako da elementi detektora u svakoj novoj generaciji se usavršavaju na bazi novih materijala i nanotehnologija što je i razlog analize koja je prethodila. Merni signal je izuzetno niskog intenziteta u prvoj fazi, te je potrebno da se kondicionira, tj. da se pojača do intenziteta pogodnog za dalju obradu – procesiranje. Nakon obrade signal može biti analogni u nekom od standardnih formata (4 do 20 mA, 1 do 5 V, i dr.) i/ili u nekom od digitalnih formata. Prema vrsti i obliku izlaznog signala je izveden priključak ili kabl određene dužine za povezivanje sa elektronskim sklopom (uređajem) merne stanice.

Više senzora za detekciju koncentracije različitih supstanci u medijumu koji se analizira mogu biti sastavljeni kao jedan modul – merna sonda (multisensory probe). Sve napredniji senzori koriste sve manje energije za napajanje. Izlazni signal senzora se do mernog uređaja prenosi žično, a ako senzori imaju sopstveno napajanje, onda je prenos obično bežično (WiFi). Merni uređaj sadrži odgovarajući interfejs, računarsku jedinicu (mikrokontroler), memoriju (izvedena kao podrška obradi signala i/ili memorisanje podataka – dataloger) i telekomunikacioni modul (slika 4).



Sl. 4. Merni uređaj za više senzora

Za monitoring parametara životne sredine u realnom vremenu, bitno je da senzori pored metroloških zahteva zadovolje i vreme odziva, broj merenja u

jedinici vremena, potrošnju, životni vek uređaja, troškove instaliranja, korišćenja i održavanja, kao i pogodnost za integraciju u postojeći sistem. Dinamika razvoja posebnih oblasti koje se primenjuju je evidentna [11], i to ne samo prema stručnim i naučnim publikacijama koja se objavljuju, već i prema ponudi na tržištu (Libelium, Metler Toledo, Endress+Hauser, i dr.) [12,13], slike 5 i 6.



**Sl. 5.** *Merna stanica Libelium*



**Sl. 6.** *ARDUINO GSM/GPRS telekomunikacioni modul*

Na slici 7 je merna sonda sa četiri senzora za merenje parametara kvaliteta vode. Unapređenja na bazi nano tehnologija omogućavaju da su elektrode minijaturne i da su senzori visokih metroloških karakteristika [14], na čemu se radi već više godina [15].



**Sl. 7.** *Merna sonda sa četiri senzora*

Za merenja u realnom vremenu na licu mesta ključno je da senzori imaju relativno kratko vreme odziva, kako bi se merenje moglo smatrati kontinualnim, tj. da merenja verodostojno pokazuju promene vrednosti parametara koji se prate.

#### **4. AUTOMTIZACIJA MONITORINGA**

Klasični sistem monitoringa kvaliteta površinske vode podrazumeva: planiranje, izdavanje naloga za analizu, uzimanje uzoraka, odnošenje uzorka u laboratoriju na analizu, analizu, izradu i dostavljanje laboratorijskog izveštaja. Uzimanje uzoraka sa lica mesta (boca/zahvat), a zatim analiza uzorka u

laboratoriji je troškovno zahtevno (rad, transport, i dr.). To je stanje samo „snimak“ u trenutku uzimanja uzorka, a vreme od trenutka uzimanja uzorka do dobijanja rezultata analize može biti više dana. Osim toga, uzorak nije reprezentativan kada nivo kontaminacije osciluje. To je nametnulo potrebu za razvoj i primenu metoda i sredstava kojima bi se sve ovo prevazišlo [16].

Razvijeni su automatizovani sistemi za monitoring parametara životne sredine u realnom vremenu, gde su senzori postavljeni na merno mesto i povezani sa uređajem merne stanice od koje su podaci o izmerenim vrednostima dostupni preko odabrane telekomunikacione mreže [8,17].

Kao što je već u uvodnom delu istaknuto, okolina rudnika je izložena uticaju i riziku štetnih materijala koji nastaju pri rudarskoj proizvodnji. Izgradnjom mernih stanica i korišćenjem telekomunikacionih mreža, podaci o parametrima kvaliteta vodenog toka mogu se učiniti dostupnim „online“ u realnom vremenu kako je prikazano u tabeli 2.

**Tabela 2.** Šema rada merne stanice

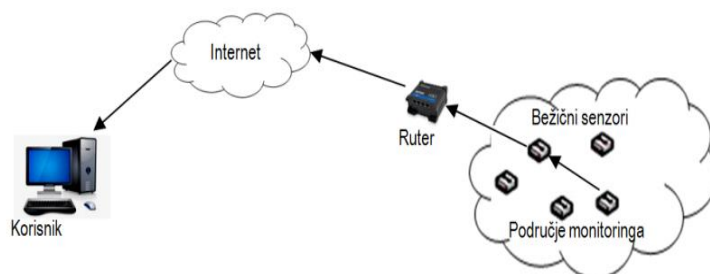
Prenos podataka sa data logera mernih stanica moguć preko SMS, LAN i Wi-Fi. Server obezbeđuje upravljanje data logerima, bazom podataka, ulaznim podacima i pristupom korisnika podacima sa mernih stanica. Prikaz u realnom vremenu: statusa uređaja, servera, i korisnika podataka. Upozorenje korisnika podataka i klijenta softvera na alarm. Upravljanje podacima sa udaljenih uređaja prema korisnicima. Centralno upravljanje bazom podataka MySQL/SQL/Orakle ili dr.			
Server	Klijent – korisnik podataka	Prikaz - ekran	Data logeri senzora
			Grafički prikaz i tabelarni prikaz. Prosečne vrednosti. Granične vrednosti. Alarmi i događaji.

Promene vrednosti parametara životne sredine, u opštem slučaju, nisu brze. Zahvaljujući tome što se ne radi o velikim brzinama obrade i prenosa signala to ni telekomunikacioni deo sistema nije finansijski zahtevan, tj. može se govoriti da se radi o rešenjima nižih cena („low cost“).

Pored ostalih i Android je, kao i drugi operativni sistemi, postao veoma popularan. Zahvaljujući tome mnoge kompanije koriste mobilne telefone za raznovrsne primene pa i za monitoring parametara životne sredine. Tako

možemo imati podatke o zagađivačima i indeksu kvaliteta vazduha, vode i zemljišta na mobilnom telefonu. Na sličan način može se organizovati monitoring vodenih tela. Naša zemlja ima razvijenu telekomunikacionu infrastrukturu i kapacitet iste da se to realizuje.

U nekim zemljama su za potrebe navodnjavanja, za domaćinstva i industriju instalirani autonomni sistemi monitoriga površinskih voda (slika 8) [18]. Mnogi rudnici već više godina imaju svoje autonomne sisteme za monitoring parametara životne sredine u okolini rudnika [19]. Permanentnom kontrolom parametara kvaliteta voda dobija se uvid u stanje kvaliteta voda koje se koriste, te se po potrebi preduzimaju i odgovarajuće mere u cilju očuvanja životne sredine.



**Sl. 8.** *Autonomni sistem monitoringa*

U Republici Srbiji sprovođenje monitoringa zagađujućih materija u vodama je regulisan Zakonom o vodama („Službeni glasnik RS“, br. 30/10, 93/12) i doneta je Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vodi i rokovima za njihovo dostizanje („Službeni glasnik RS“, br. 67/11, 48/12, 1/16).

Redovni monitoring parametara kvaliteta vode u području rudnika obezbeđuje da se blagovremeno eliminišu rizici i svi eventualni nedostaci nastali tokom izgradnje i eksploatacije rudničke infrastrukture [7]. Zahvaljujući dinamici fenomena životne sredine koja ne zahteva velike brzine obrade, velike količine podataka, razvijene su hardverske i softverske niskobudžetne platforme (ZigBee, Arduino, i dr.). Izrađeni su i u primeni su odgovarajući standardi. Ove mreže nisu predviđene za brzi prenos velike količine informacija, ali se efikasno koriste kao po ceni pogodna rešenja u mrežma za povezivanje senzora namenjenih za monitoring parametara životne sredine.

Za merenje parametara životne sredine je bitan i interval merenja, odnosno, učestanost uzorkovanja. Empirijski i teorijski proračuni su pokazali da efekat usrednjavanja vremena uzorkovanja zanemaruju kratkotrajne fluktuacije u koncentracijama zagađivača. Dužim vremenskim periodom uzorkovanja zanemaruje se fluktuacija izmerenih vrednosti. Kraći period uzorkovanja daje previše fine detalje koji nisu neophodni za biološki model okoline, odnosno,

životne sredine, a opterećuju se komunikacioni kanali, kao i kapacitet i memorija računarskih jedinica i modula.

Period uzorkovanja može biti odabran probabilistički ili na osnovu procene proračunom [20]. Uzorkovanje zasnovanog na zakonima verovatnoće podrazumeva primenu teorije statistike, uključujući slučajni odabir jedinica uzorkovanja. Pri tome se statistički zaključci izvode iz podataka dobijenih iz jedinica uzorkovanja. Odabir perioda uzorkovanja na osnovu procene podrazumeva izbor na osnovu svojstva parametra koji se meri, odnosno, na osnovu profesionalne procene. Vrednosti parametara životne sredine i njihova periodičnost jesu slučajne veličina  $x = N(\bar{x}, \sigma)$ . Za pokazivanje značaja vremena uzorkovanja  $t_s$  za neku periodičnu pojavu  $x = X \sin\left(\frac{2\pi}{t_p} t\right)$  možemo posmatrati odnos standardne geometrijske devijacije  $s_G^2$  periodično uzetih vrednosti (semplova) parametara pri monitoringu i standardne geometrijske devijacije  $\sigma_G^2$  fluktuacije vrednosti parametara koji se prate (originala) [21] prema formuli:

$$\frac{s_G^2}{\sigma_G^2} = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{t_p}{t_s}\right)^2 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{t_p} t_s\right)\right] \quad (1)$$

gde je:

$s_G^2$  – standardna geometrijska devijacija vrednosti periodično uzetih vrednosti

$t_s$  – vreme uzorkovanja

$\sigma_G^2$  – standardna geometrijska devijacija

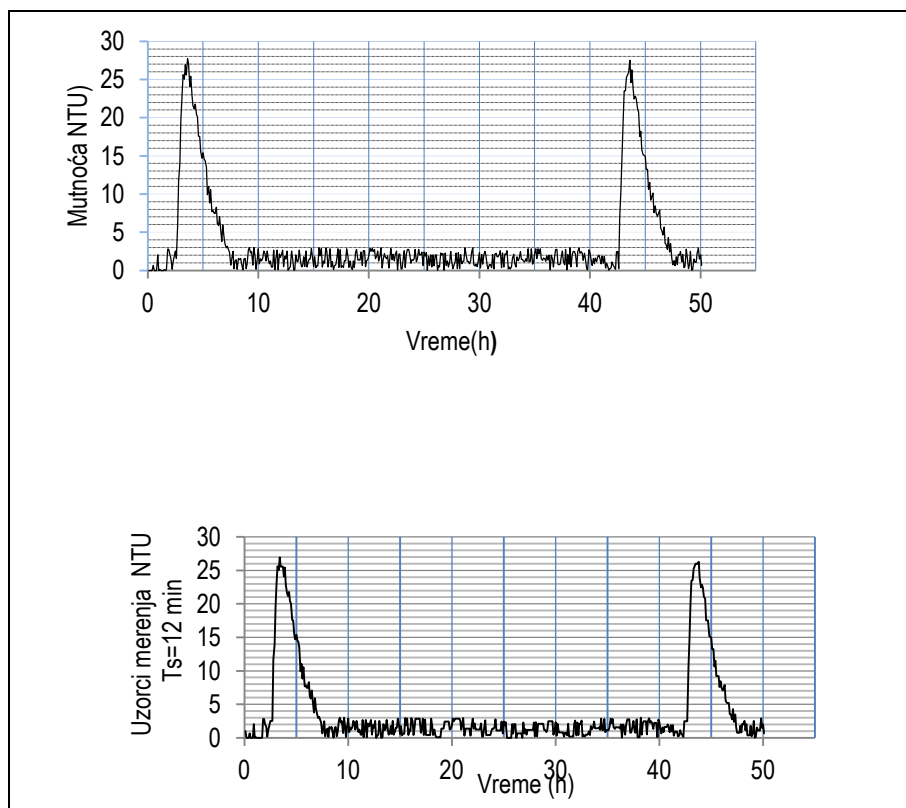
U statističkom smislu rešenje je zadovoljavajuće, ako statistički parametri uzoraka merenja ne odstupaju značajno od statističkih parametara originala.

Za ilustraciju je na slici 9 prikazan primer merenja mutnoće vode koja u nekim trenucima ima povećanu zamućenost, što je manifestacija ukupnog sadržaja suspendovanih čestica i rastvorenih materija u vodi. Na prvom dijagramu je prikazano kontinualno merenje, a na drugom dijagramu su uzorci merenja koji se uzimaju svakih 12 minuta. U statističkom smislu nema značajne razlike standardne devijacije prikazanih podataka na prvom i na drugom dijagramu. Za vrednosti kontinualnog merenja u izuzetno malim koracima izračunata standardna devijacija je  $\sigma = 6,02$  NTU, a za uzorke merenja  $\sigma_{(t_s=12\text{min})} = 6,01$  NTU. Dakle, razlika je zanemarljiva. Međutim, ovo može da posluži samo kao orijentacioni podatak, inače se obrada podataka i analize rade prema onome čemu služe dobijeni podaci o vrednostima merenja (na primer za biološke modele, razne predikcije, i sl.).

Tokom poslednjih godina, uzorkovanje i praćenje parametara životne sredine zasnovanih na događajima (kad nastupe određeni uslovi) dobijaju



posebnu pažnju istraživača bežičnih senzorskih mreža [21]. Strategijom merenja zasnovanog na događajima, prikupljaju se samo podaci od interesa i nema obrade i prenosa nepotrebnih informacija između senzora i korisnika podataka u mreži sistema za monitoring.



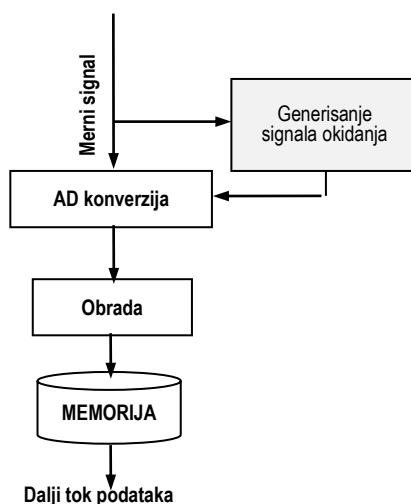
Sl. 9. Dijagrami merenja mutnoće

Ovo smanjenje količine informacija koje se generiše i razmenjuje, ima niz pogodnosti uključujući smanjenje potrošnje energije, produženje životnog veka uređaja, smanjenje računarskog opterećenja uređaja i manji propusni opseg mreže.

Sistemi zasnovani na događajima postaju sve uobičajeniji, posebno za distribuirano detektovanje i kontrolu u realnom vremenu. Softverska aplikacija čija je funkcija zasnovana na događajima je ona u kojoj se promenljive stanja ažuriraju asinhrono u vremenu, na primer kada se detektuje bitan podatak ili kašnjenja pri izračunavanjima. Na taj način se može podesiti i brzina prenosa podataka tako da se dobije kompromis performansi sistema za monitoring i broja prenosa u jedinici vremena. Tehnika uzorkovanja zasnovanog na

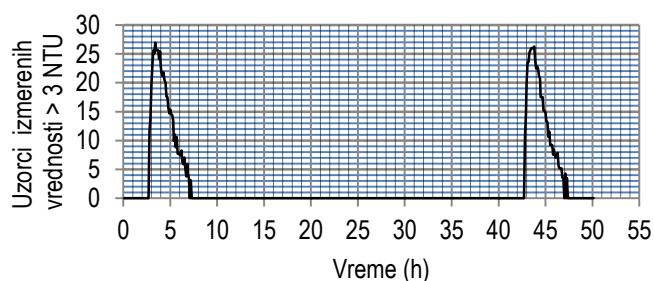
dogadjajima je pokazala dobre performanse upravljanja sistemom za monitoring. Broj komutacija je znatno smanjen u poređenju sa tradicionalnim upravljanjem zasnovanim na fiksnom vremenu uzorkovanja.

Ako je trenutak pojave veće koncentracije neke štetne materije u životnu sredinu ne tako čest i nepredvidiv, a i trajanje te pojave nepredvidljivo, kontinualno merenje nepotrebno opterećuje kapacitete uređaja i celokupne mreže. Time bi se nepotrebno trošila energija, aktivirala obrada signala i zauzimala memorija računarskih jedinica, a i komunikacioni kanali bi bili zauzeti bez potrebe. Rešenje problema je upravo da se merenje aktivira „okidanjem“ (Triggering of Measurements) što je prikazano na slici 10 [21].



Sl. 10. Princip „Trigger mod“

Signal „okidanja“ se generiše po nekom definisanom kriterijumu, na primer prema mernom signalu koji dolazi od senzora. To može biti izvedeno kako hardverski tako i softverski. Isto tako se može generisati i signal alarma. Signal „okidač“ za aktiviranje merenja, tj. započinjenja uzorkovanja i vremenskog intervala uzastopnih merenja može biti generisan i na osnovu vrednosti parametra koji se prati i/ili na osnovu promena te vrednosti, kada te vrednosti budu prekoračile zadate nivoe, slika 11. Može se generisati i kada je nivo koncentracije štetnih materija toliki da utiče na degradaciju kvaliteta životne sredine ili je u interesu za proučavanje uticaja na životnu sredinu. Ovo je najniži stepen generisanja signala „okidanja“, inače oni su aktuelni za sve nivoe obrade i prenosa podataka o parametrima životne sredine dobijenih sa prostorno raspoređenih senzora (in-situ).



Sl. 11. Prikaz izmerenih vrednosti zamućenosti vode samo koje su iznad 3 NTU

Ukupne suspedovane čestice i rastvorene materije u vodi manifestuju se mutnoćom vode. Mutnoća je značajan pokazatelj kvaliteta vode, mada nije direktna mera sadržaja ukupnih suspendovanih materija. Čestice od kojih potiče mutnoća vode takođe mogu sadržati materije koje su toksične, kao i rastvorljive toksične supstance. Ako je vrednost mutnoće vode veća od 5 NTU može se smatrati da je lošeg kvaliteta i da ima štetan uticaj na životnu sredinu. Izmerene visoke vrednosti mutnoće ili promene u izmerenim vrednostima su pokazatelji problema sa kvalitetom vode. Glavne prednosti merenja mutnoće kao indikatora kvaliteta vode se ogledaju u tome što je ovo merenje veoma jednostavno i relativno jeftino i što se može sprovoditi kontinualno. Voda se smatra da je čista, kada je vizuelno prozirna i bez boje, što odgovara mutnoći manjoj od 5 NTU. U opštem slučaju, mutnoća može biti posledica sadržaja čestica koje nisu toksične, ali i posledica koncentracije teških metala i pesticida, što utiče i na alkalitet vode (pH vrednost).

Poređenja radi u smislu polazišta ovog rada, kratko razmotrimo primer pristupa praćenju kvaliteta vode reke Pek u okolini rudnika bakra u Majdanpeku. Trenutno se to radi na klasičan način, tako što se uzimaju uzorci vode, a zatim nose u laboratoriju na analizu. Prema objavljenoj publikaciji [22], otpadna voda iz flotacije se: filtrira, zgušnjava i uvodi u taložnik, a zatim se ponovo koristi u procesu flotiranja. Periodično se ispušta u reku Pek zemljanim kanalom. Sadržaj štetnih materija u vodi se meri na tri mesta: u otpadnoj vodi neposredno posle prečišćavanja na mestu ispuštanja, onda u rečnom toku na mestu ispred ispuštanja otpadne vode u rečni tok i nizvodno u rečnom toku na određenoj udaljenosti od mesta ulivanja otpadne vode u rečni tok. Uzorkovanje je periodično i uzorci se nose u laboratoriju na analizu. Sigurno će ovaj sistem u bliskoj budućnosti biti osavremenjen uvođenjem on-line monitoringa.

U području rudnika „Čukaru Peki“ protiče Brestovačka reka. Brestovačka reka je otoka Borskog jezera, dužine je 24 km i uliva se u Crni Timok nizvodno od ušća Zlotske reke. Prosečan protok je  $1,21\text{m}^3/\text{s}$ .



Sl. 12. Sliv Crnog Timoka

Analize nisu pokazale povećanu zagađenost, koje bi poticale od rudničkih otpadnih voda rudnika „Čukaru Peki“ [23]. Merenja se vrše na klasičan način, a prva automatska merna stanica se nalazi u Gamzigradu na Crnom Timoku, gde je automatskim merenjem obuhvaćen samo vodostaj (slika 12, tačka 3). Ostala merenja se tu vrše po planu monitoringa na klasičan način, uzimanjem uzoraka i odnošenjem u laboratoriju na analizu.

Na slici 13 je prikazana lokacija i neposredna okolina rudnika „Čukaru Peki“. Ucrтана su merna mesta, gde bi se adekvatno ugradile merne sonde sa više senzora sistema za monitoring kvaliteta vodotoka Brestovačke reke. Time i kontinualnim praćenjem stanja stvorili bi se uslovi da se preduprede sve eventualnosti identifikovanog rizika za izgrađena postrojenja i instalacije rudnika. U okolini rudnika ima površina na kojima se gaje poljoprivredne kulture, a dalje nizvodno se nalaze male plantaže i farme koje bi tako sigurno i bezbedno koristile vodu Brestovačke reke. Do sada sprovedena klasična merenja na tim mestima nisu pokazala povećane vrednosti koncentracije teških metala u vodi. Međutim, nije isključeno da u toku rada rudnika dođe do neočekivanih događaja (kvarovi na objektima i instalacijama, jake atmosferske padavine, i sl.) [7]. Instaliranjem sistema za automatizovani monitoring kako je izloženo u ovom radu bili bi izbegnuti ti rizici i shodno tome dobili bi se i drugi relevantni benefiti.



**Sl. 13.** Raspored mernih mesta

Na osnovu napred izloženih razmatranja, može se uočiti da klasičan pristup monitoringa tekuće vode ima bitnih ograničenja i to:

1. uzorci vode na licu mesta odražavaju sastav vode u trenutku uzorkovanja, ali možda neće pokazati epizodnu kontaminaciju;
2. problem je kada se moraju prikupiti i izdvojiti velike količine vode za kvantifikaciju i procenu tragova zagađivača;
3. nisu uvek realno izmerene koncentracije rastvorenih zagađivača,
4. postupak je skup i dugo traje.

Prevazilaženje ovih ograničenja i verodostojna slika kvaliteta vode može se dobiti korišćenjem novih pristupa i kontinualnim monitoringom parametara kvaliteta tekuće vode u okolini rudnika. To uključuje:

1. senzore, uređaje za obradu, memorisanje i prenos podataka;
2. adekvatna učestalost uzorkovanja;
3. automatsko sekvencijalno uzorkovanje podataka;
4. rano upozorenje ako postoji alarmni stepen zagađenosti; i
5. istraživanje biološkog aspekta zagađenja.

Zahvaljujući specifičnosti u pogledu vrednosti i dinamike parametara kvaliteta životne sredine, za operativni monitoring parametara životne sredine nisu neophodni uređaji visokih performansi. Za uređaje čije performance obezbeđuju praćenje dinamike fluktuacije parametara životne sredine nije neophodan veliki budžet. Što se tiče detalja u vezi uređenja lokacije merne tačke i konstrukcije merne sonde sa senzorima cena je posebno niža ako je jednostavna konstrukcija interakcije sa supstancom koja se analizira i nisu potrebni reagensi. Zatim, da merni uređaji na koje se priključuju senzori, imaju

samo neophodne module za obradu, memorisanje i prenos podataka. Za testiranje, kalibraciju i podešavanja da na uređaju postoji priključak za test uređaj sa tastaturom i displejom, odnosno sa „touch“ monitorom ili priključak za laptop.

Poslužićemo se i kratkim razmatranjem problema sa aspekta analize troškova i doprinosa. Za potpunu analizu isplativosti rešenja kao investicije i sve doprinose (Cost Benefit Analyse – CBA) neophodno je uzeti u razmatranje sve relevantne činjenice sa svih aspekata i dodeliti im rang, numeričke vrednosti ili estimacije kao:

$R^M = \parallel r_i^M \parallel_{i=1,n}$  – vektor elemenata „cost funkcije“ i „funkcije benefita“  
za klasičan monitoring

$R^A = \parallel r_i^A \parallel_{i=1,m}$  – vektor elemenata „cost funkcije“ i „funkcije benefita“  
za automatizovani monitoring

Ograničimo li se na elemente troškova, tj. „cost funkciju“  $C$  čiji se elementi mogu aproksimirati prema dijagramu sa slike 2 i drugih nabrajanja, gde je  $T$  vektor stepena ili mera uticaja, imamo:

$$C^M = R^M \cdot T^T = [r_1^M \ r_2^M] \cdot [1 \ t]^T \quad (2)$$

gde je:  $T = [1 \ t]$ , a  $t$  – vreme

$$C^A = R^A \cdot T^T = [r_1^A \ r_2^A] \cdot [1 \ t]^T \quad (3)$$

S obzirom da je  $r_1^A > r_1^M$  i  $r_2^A \ll r_2^M$ , onda je za dovoljno veliko  $t$ :  $C^A < C^M$ .

Pored toga, za monitoring parametara životne sredine nisu neophodne velike brzine obrade i prenosa podataka, pa se rešenja mogu realizovati i nižim budžetom (upotrebom „low cost“ uređaja i instalacija).

Ovakav sistem je moguće da se izvede za jedno područje kao individualno, a uz korišćenje kompatibilnih telekomunikacionih uređaja i softvera, može da se uključi u postojeći monitoring sistem Agencije za zaštitu životne sredine Republike Srbije.

## ZAKLJUČAK

Eksploatacija mineralnih sirovina ima izuzetno negativan uticaj na životnu sredinu. Monitoring parametara životne sredine je ključno u preduzimanju mera za zaštitu životne sredine u okolini rudnika. Zahvaljujući novim tehnologijama i dostupnosti istih na tržištu, danas su povoljne mogućnosti za automatizovani „online“ monitoring parametara životne sredine. Danas je brzo, tačno i jeftino praćenje parametara kvaliteta vode reke u oblasti rudnika veoma pogodno za kontinualnu sigurnost kvaliteta vode, posebno u područjima koja imaju ograničen resurs voda.

Ovaj rad je ograničen na automatizaciju sistema za monitoring parametara životne sredine, korišćenjem jeftinijih rešenja. Dat je pregled specifičnosti senzora i bežične senzorske mreže, koje su primenljive na sisteme za praćenje parametara životne sredine. Dinamika fluktuacije vrednosti parametara životne sredine ne zahteva velike brzine očitavanja, obrade i prenosa velike količine podataka. Zahvaljujući tome moguće je da se monitoring parametara životne sredine realizuje sensorima i pratećim uređajima koji imaju malu potrošnju energije, cena im je niža i pogodni su za praćenje parametara životne sredine na licu mesta u realnom vremenu. Razvijeni su i u primeni su jeftini standardizovani telekomunikacioni moduli za prenos podataka sa vrednostima parametara životne sredine.

Sve prethodno nabrojano odnosi se na razmatranje unapređenja monitoringa parametara životne sredine, zamenom konvencionalnog monitoringa automatizovanim monitoringom sensorima i pratećim uređajima nižih cena. Za ilustraciju je uzet konkretan primer primene na monitoring parametare tekuće vode u području rudnika.

Projektom postrojenja rudnika „Čukaru Peki“, ispuštanje otpadne vode u Brestovačku reku je predviđeno samo u toku izvođenja radova, ali ne i u toku normalnog odvijanja procesa proizvodnje. Međutim, rizici i neplanirani događaji su uvek mogući. Postavljanjem mernih uređaja i korišćenjem savremenih tehnologija za akviziciju podataka, kako je ovde prikazano, znatno bi se unapredio monitoring životne sredine u okolini rudnika uključujući blagovremene alarme i smanjenje faktora rizika.

Korišćenje rešenja na bazi jeftinijih senzora i telekomunikacionih uređaja koji se mogu povezati u postojeći sistem za monitoring parametara životne sredine po važećim standardima i mogućnostima postojećih mreža komunikacije, kako je prikazano u ovom radu, može obezbediti:

- Kontinualni monitoring kvaliteta tekuće vode na području rudnika.
- Rano otkrivanje mogućih neispravnosti na objektima i postrojenjima za upravljanje otpadom i otpadnom vodom rudnika.
- Blagovremeno otklanjanje rizika po životnu sredinu od nastanka havarija skladišta jalovine i instalacija usled vremenskih nepogoda.
- Sprečavanje akumulacija štetnih materija u vodi i zemljištu.
- Procena mogućnosti unapređenja korišćenja i revitalizacije zemljišta u okolini rudnika.
- Unapređenje poverenja između lokalne zajednice i rudarske kompanije.

Iz izloženih razmatranja može se uočiti da je urađen veliki broj istraživanja i prikaza kako u svetu tako i kod nas koja se odnose na konkretne sisteme za monitoring parametara životne sredine. Što se tiče količine podataka, njihove obrade i brzine prenosa između senzora i merenih uređaja, kao i od mernih uređaja do administratora monitoring parametara životne sredine i korisnika, za to nisu neophodne velike brzine i kapacitet obrade i prenosa. Zahvaljujući tome

primena jeftinijih („low cost“) uređaja je sasvim zadovoljavajuća, a doneti su i odgovarajući standardi.

Posebno je bitno da ovakav sistem ima mogućnost uklapanja i povezivanje u postojeći sistem za monitoring parametara životne sredine iz nadležnosti Agencije za zaštitu životne.

## LITERATURA

- [1] F. Mao, K. Khamis, S. Krause, J. Clark, D. M. Hannah, Low-cost environmental sensor networks: Recent advances and future directions, *Frontiers in Earth Science*, 7 (2019) 221, <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00221>
- [2] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, W. W. Behrens, *The Limits to growth: A report for the club of Rome's project on the predicament of mankind*, A Potomac Associates Book, Paperback, January 1, 1974.
- [3] O. Agboola, D. E. Babatunde, O. Sunday, Isaac Fayomi, Emmanuel Rotimi Sadiku, Patricia Popoola, Lucey Moropeng, Abdulrazaq Yahaya, Onose Angela Mamudu, A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management, *Results in Engineering*, 8 (2020) 100181, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100181>
- [4] W. Song, W. Song, H. Gu, F. Li, Progress in the remote sensing monitoring of the ecological environment in mining areas, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6) (2020) 1846, <https://doi.org/10.3390/ijerph17061846>
- [5] Z. Stojanović, Studija izvodljivosti eksploatacije ležišta masivno sulfidne rude bakra i zlata Čukaru Peki – Gornja zona, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, novembar 2019.
- [6] B. Balabanova, T. Stafilov, R. Šajn, K. Bačeva, Distribution of chemical elements in attic dust as reflection of their geogenic and anthropogenic sources in the vicinity of the Copper Mine and Flotation Plant, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 61 (2011) 173–184, <https://doi.org/10.1007/s00244-010-9603-5>
- [7] D. Nišić, Preliminary risk assessment of dam failure at the location of the Čukaru Peki deposit, Bor (Serbia), *Minerals*, 11(10) (2021) 1126, <https://doi.org/10.3390/min11101126>
- [8] C.M.K. Boldt, B.J. Scheibner, Remote sensing of mine waste, United States Department of Interior, Bureau of Mines Information Circular 9152, 1987.
- [9] G. Zhao, H. Wang, G. Liu, Recent advances in chemically modified electrodes, microfabricated devices and injection systems for the electrochemical detection of heavy metals: A review, *International Journal of Electrochemical Science*, 12 (2017) 8622-8641, doi: 10.20964/ 2017.09.39



- 
- [10] J. Liu, J. Wu, W. Feng, X. Li, Ecological risk assessment of heavy metals in water bodies around typical copper mines in China, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (12) (2020) 4315, <https://doi.org/10.3390/ijerph17124315>
- [11] V. Tasić, Primena low-cost senzora i sistema za monitoring aerozagadenja, 5<sup>th</sup> Internacional Conference on Renewable Electrical Power Sources, Proceedings, Vol. 5, 1 (2017) 11-19, <https://doi.org/10.24094/mkoiee.017.5.1.11>.
- [12] Libelium catalog 2022, <https://libelium.com>
- [13] Metler Toledo, InLab Sensors Electrodes, [https://www.mt.com/sg/en/home/products/Laboratory\\_Analytics\\_Browse/Product](https://www.mt.com/sg/en/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/Product)
- [14] Y. Wang, Y. Xu, J. Jiang, Y. Li, J. Tong, C. Bian, A portable sensor system with ultramicro electrode chip for the detection of heavy-metal ions in water, *Micromachines* 12 (12) (2021) 1468, <https://doi.org/10.3390/mi12121468>
- [15] A. Hayat, J. L. Marty, Disposable screen printed electrochemical sensors: Tools for environmental monitoring, *Sensors*, 16(6) (2014) 10432-10453, <https://doi.org/10.3390/s140610432>
- [16] S. O. Olatinwo, T.-H. Joubert, Enabling communication networks for water quality monitoring applications: A survey, *IEEE*, 7 (2019) 100332-100362, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2904945
- [17] Z. Rasin, M. R.1 Abdullah, Water quality monitoring system using zigbee based wireless sensor network, *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 9, 10 (2013) 24-28.
- [18] I. Iliyasu, R. Mukhtar, W. D. Joseph, S. Tanko, J. Dey Nyeri, Y. S. Sanda, Arduino based smart sensing platform for monitoring weather parameters, *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, Vol. 6, 7 (2021) 34-39, DOI: 10.33564/IJEAST.2021.v06i07.007
- [19] Vodoprivredna osnova Republike Srbije, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ Beograd, jun 2001., str. 319-322.
- [20] B. E. Saltzman, Significance of sampling time in air monitoring, *Journal of the Air Pollution Control Association*, Vol. 20, 10 (1970) 660-665, <https://doi.org/10.1080/00022470.1970.10469454>
- [21] R. Bartoldus, C. Bernius, D. W. Miller, Innovations in trigger and data acquisition systems for next-generation physics facilities, *Arxiv*, 2022, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.07620>
- [22] S. Šerbula, A. Ristić, S. Manasijević, N.a Dolić, Teški metali u otpadnim vodama Rudnika bakra Majdanpek, *Zaštita materijala*, 56(1) (2015) 52-58.
- [23] Izveštaj o analizi vode, Institut za zaštitu na radu ad Novi Sad, <https://bor.rs/wp-content/uploads/2022/01/v0962-1-15-Opstinska-uprava-Bor-povrsinska-voda-NOVO.pdf>

UDK: 614.71:551.524:681.325(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2301043T

NAUČNI RAD

Oblast: Zaštita životne sredine

Primljen: 14.02.2023.

Prerađen: 20.03.2023.

Prihvaćen: 21.03.2023.

**MERENJE KVALITETA VAZDUHA I TERMALNOG KOMFORA U  
KANCELARIJAMA PRIMENOM LOW-COST  
SENZORA I MONITORA**

**AIR QUALITY AND THERMAL COMFORT MEASUREMENTS IN  
THE OFFICES USING THE LOW-COST SENSORS AND MONITORS**

Viša Tasić<sup>1a</sup>, Vladan Kamenović<sup>1b</sup>, Bojan Radović<sup>1c</sup>,  
Nikola Mišić<sup>2a</sup>, Ivan Zlatković<sup>1d</sup>

<sup>1</sup>Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, E-mail: visa.tasic@irmbor.co.rs

<sup>2</sup>Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu u Nišu

**Orcid:**

<sup>1a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6710-6529>, <sup>1b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9476-5378>,

<sup>1c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4884-1418>, <sup>1d</sup> <https://orcid.org/0009-0004-3471-7787>

<sup>2a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2314-4851>

**Izvod**

*Subjektivni doživljaj sredine u kojoj ljudi borave definiše komfor te sredine. Elementi komfora sredine su: kvalitet vazduha (vazdušni komfor), toplotni komfor, vizuelni komfor i zvučni komfor. Kvalitet vazduha u prostoriji u kojoj borave ljudi može značajno da utiče na njihovu koncentraciju, tj. sposobnost za rad i učenje. Merenje koncentracije CO<sub>2</sub> u prostoriji koristi se kao indikator ventilacije, odnosno kao indikator kvaliteta vazduha u posmatranoj prostoriji. Toplotni komfor definiše stanje zadovoljstva termalnim okruženjem. Toplotni komfor je ostvaren kada su svojstva sredine takva da obezbeđuju odavanje toplote tela u granicama ugodnosti. U ovom radu prikazan je deo rezultata merenja kvaliteta vazduha i termalnog komfora u odabranoj kancelariji u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor u periodu od 2020. do 2022. godine. Na osnovu analize rezultata merenja utvrđeno je da je kvalitet vazduha u posmatranoj kancelariji bio zadovoljavajući u proseku više od 90% radnog vremena, a termalni komfor u proseku oko 60% radnog vremena.*

**Ključne reči:** merenje, ugljen-dioksid, kvalitet vazduha, termalni komfor, low-cost senzori

**Abstract**

*The subjective experience of the environment where people live defines the comfort of that environment. The elements of environmental comfort are the air quality, thermal comfort, visual comfort, and sound comfort. The air quality in the room where people stay can significantly affect their concentration, i.e., the ability to work and study. The concentration of CO<sub>2</sub> in the room is used as an indicator of ventilation, that is, as an indicator of the air quality in the observed room. The thermal comfort defines a state of satisfaction with the thermal environment. The thermal comfort is achieved when the environment properties are such that they ensure the release of*

*body heat within the comfortable limits. This paper presents a part of the air quality and thermal comfort measurement results in the selected office in the Mining and Metallurgy Institute Bor from 2020 to 2022. Based on the analysis of measurement results, it was determined that the air quality in the selected office was satisfactory on an average of more than 90% of the working time, and the thermal comfort on an average of about 60% of the working time.*

**Keywords:** *measurement, carbon dioxide, air quality, thermal comfort, low-cost sensors*

## 1. UVOD

Subjektivni doživljaj sredine u kojoj ljudi borave definiše komfor te sredine. Komfor sredine čine: vazdušni komfor (kvalitet vazduha), toplotni komfor, vizuelni komfor i zvučni komfor.

### 1.1. Vazdušni komfor

Za oblasti u kojima nema većih industrijskih postrojenja i gde je nizak nivo saobraćaja koncentracija CO<sub>2</sub> u spoljašnjem vazduhu obično iznosi od 350 do 400 ppm [1]. U industrijskim oblastima i pored prometnih saobraćajnica ove vrednosti mogu biti i znatno više. Dominantan izvor CO<sub>2</sub> u prostorijama u kojima borave ljudi je njihovo disanje [2]. Porast koncentracije CO<sub>2</sub> u prostoriji u odnosu na nivo CO<sub>2</sub> u spoljašnjem vazduhu dobar je pokazatelj ventilacije posmatrane prostorije. Iz tog razloga se koncentracija CO<sub>2</sub> u prostoriji koristi kao indikator kvaliteta unutrašnjeg vazduha.

Koncentracija CO<sub>2</sub> u unutrašnjem prostoru može da varira od nekoliko stotina do preko 1000 ppm, posebno ako se radi o prostorijama sa velikim brojem ljudi koje u njima borave u dužem vremenskom periodu u uslovima ograničene ventilacije [2, 3]. Prema ASHRAE standardu [4] minimalna vrednost potrebnog nivoa provetrenosti prostorije je 8 l/s po osobi, a preporučena vrednost iznosi 10 l/s. Intenzitet emitovanja CO<sub>2</sub> kod prosečne osobe značajno zavisi od intenziteta njene fizičke aktivnosti. Smatra se da osoba koja sedi u zatvorenom prostoru generiše oko 0.3 dm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> u jednoj sekundi [5]. Pri projektovanju i proceni energetske karakteristika zgrada, kvaliteta unutrašnjeg vazduha, osvetljenja i akustike objekata koristi se standard SRPS EN 16798-1:2019 [6]. Prema ovom standardu kvalitet unutrašnjeg vazduha se kategoriše na osnovu razlika između unutrašnje i spoljašnje (I/O) koncentracije CO<sub>2</sub>. Definisane su kategorije kvaliteta vazduha, prikazane u tabeli 1, pri čemu je I i II kategorija preporučena za školske zgrade i objekte za stanovanje.

**Tabela 1.** Kategorije vazduha prema preporučenim I/O razlikama koncentracija CO<sub>2</sub>[5]

Kategorija	Odgovarajuća razlika koncentracije CO <sub>2</sub> (ppm) u odnosu na koncentraciju u spoljašnjem vazduhu
I	550
II	800
III	1350
IV	>1350

Merenjem koncentracija CO<sub>2</sub> u prostoriji moguće je odrediti stepen ventilacije tog prostora. U ovom radu prikazani su rezultati merenja koncentracija CO<sub>2</sub> u unutrašnjem vazduhu u IRM Bor u periodu od 2020. do 2022. godine. Merenje koncentracija CO<sub>2</sub> vršeno je prenosnim monitorima PAQMAN 2020 [7] i IC-meter [8] koji za tu namenu koriste low-cost senzorski modul SenseAir S8, NDIR tipa [9].

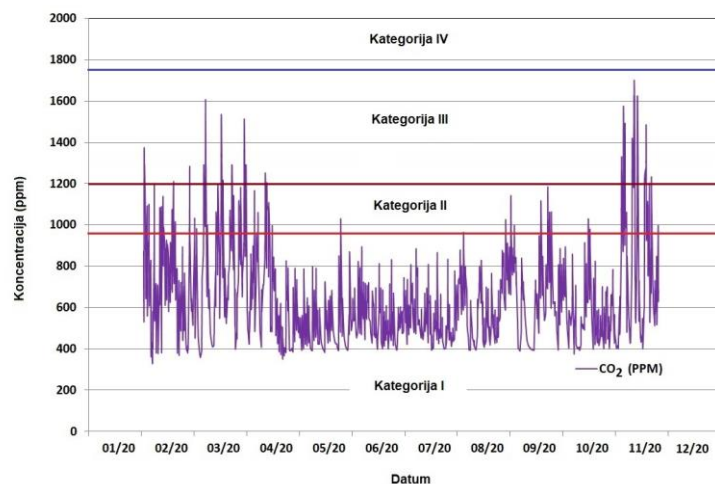
## 1.2. Termalni komfor

U standardu ISO 7730:2005 [5] definisani su uslovi toplotnog komfora u toku grejne i negrejne sezone. Smatra se da je u toku grejne sezone, za prostorije u kojima borave ljudi, najpovoljnija temperatura iz opega od 20°C do 24°C, uz relativnu vlažnost vazduha iz opsega od 30% do 70%.

U ovom radu prikazani su rezultati merenja temperature i relativne vlažnosti vazduha u odabranoj kancelariji u IRM Bor u periodu od 2020. do 2022. godine. Merenje je vršeno prenosnim monitorima PAQMAN 2020 i IC-meter koji za merenje temperature i relativne vlažnosti vazduha koriste low-cost senzore DHT 22 [10] i SHT21 [11], respektivno.

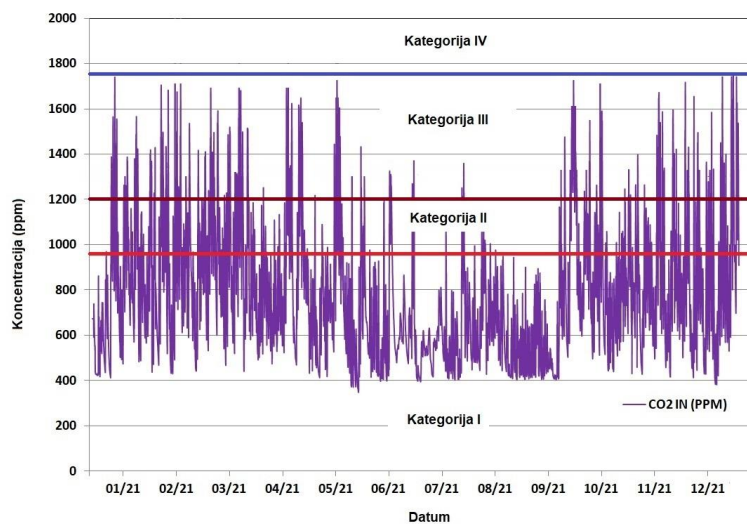
## 2. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

Za merenje komfora sredine u IRM Bor odabrana je kancelarija površine 20 m<sup>2</sup>, zapremine 60 m<sup>3</sup>, sa površinom prozora (PVC) od 4 m<sup>2</sup>. Prozori kancelarije okrenuti su ka jugu. U periodu merenja u kancelariji je uglavnom boravila jedna osoba, i to u periodu od 7 do 15 časova. Vrata kancelarije su u periodu merenja bila zatvorena. U kancelariji ne postoji klima uređaj, tako da se provetranje vrši otvaranjem prozora. Tokom grejnog perioda godine kancelarija se zagreva pomoću radijatora iz sistema centralnog grejanja. U toku negrejne sezone uobičajeno je da se prozori drže poluotvoreni u toku radnog vremena, dok se u grejnoj sezoni prozori otvaraju povremeno, po potrebi. Na slici 1 prikazan je vremenski dijagram srednjih satnih koncentracija CO<sub>2</sub> izmerenih u odabranoj kancelariji u 2020. godini.

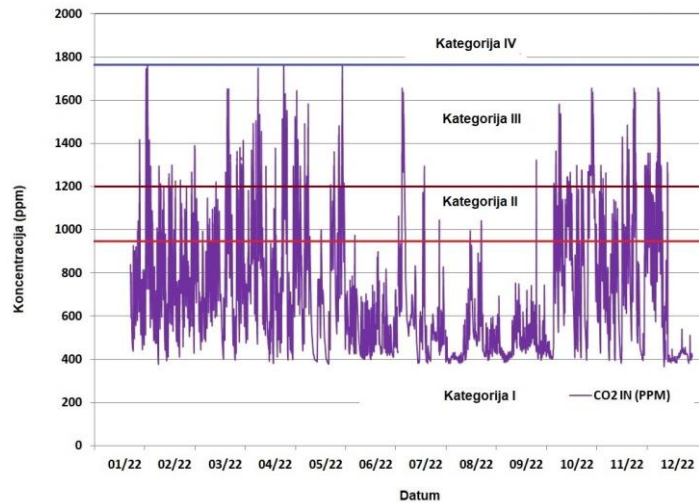


Sl. 1. Prikaz rezultata merenja koncentracije CO<sub>2</sub> u 2020. godini

Na slikama 2 i 3 prikazane su srednje satne koncentracije CO<sub>2</sub> izmerene u kancelariji u toku 2021. i 2022. godine.

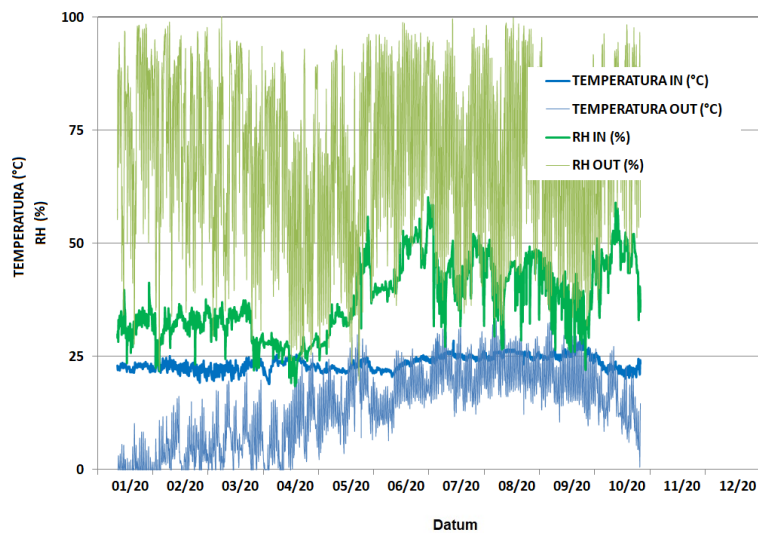


Sl. 2. Prikaz rezultata merenja koncentracije CO<sub>2</sub> u 2021. godini

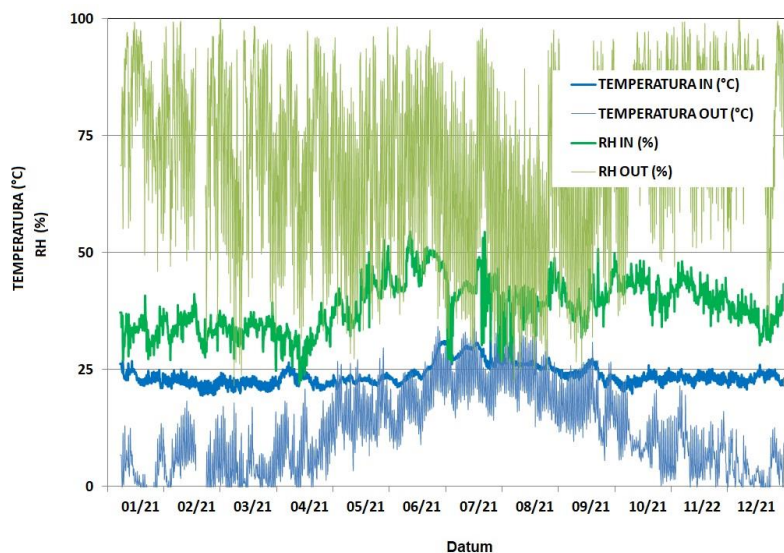


Sl. 3. Prikaz rezultata merenja koncentracije CO<sub>2</sub> u 2022. godini

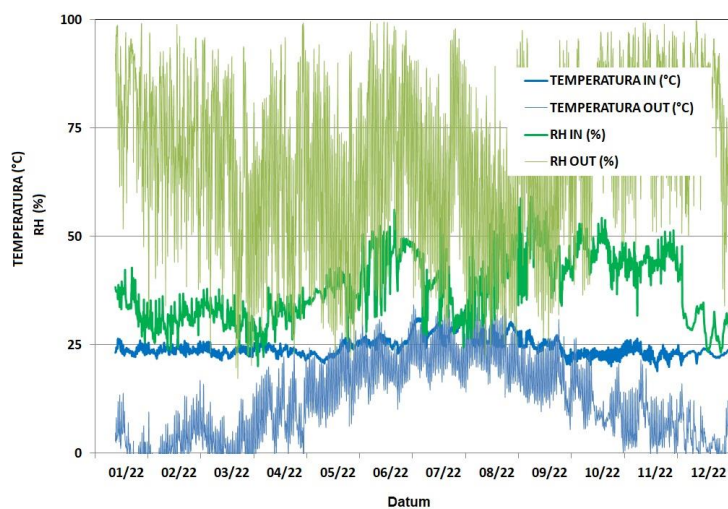
Na slikama 4, 5 i 6 prikazane su srednje satne vrednosti temperature i relativne vlažnosti vazduha izmerene u kancelariji i spoljašnjem vazduhu u periodu od 2020. do 2022. godine.



Sl. 4. Prikaz rezultata merenja temperature i relativne vlažnosti vazduha u 2020. godini



Sl. 5. Prikaz rezultata merenja temperature i relativne vlažnosti vazduha u 2021. godini



Sl. 6. Prikaz rezultata merenja temperature i relativne vlažnosti vazduha u 2022. godini

U tabeli 2 prikazane su srednje godišnje vrednosti izmerenih parametara kvaliteta vazduha i termalnog komfora u toku radnog vremena, kao i srednje vrednosti za periode grejne i negrejne sezone.

**Tabela 2.** Srednje vrednosti temperature, relativne vlažnosti vazduha i koncentracije CO<sub>2</sub> u kancelariji i spoljašnjem vazduhu u posmatranom vremenskom periodu 2020-2022. (RV - period radnog vremena, GS - grejna sezona, NGS - negrejna sezona)

Period	T in (°C)	T out (°C)	RH in (%)	RH out (%)	CO <sub>2</sub> in (PPM)	CO <sub>2</sub> in - 400 (PPM)
2020 RV	23.9	16.3	37.4	60.0	675.8	275.8
2021 RV	24.0	13.5	38.3	63.8	882.4	482.4
2022 RV	24.8	11.6	38.2	56.9	774.2	374.2
2020 RV GS	23.2	7.9	30.8	60.8	724.8	324.8
2021 RV GS	23.3	6.8	35.8	70.9	960.3	560.3
2022 RV GS	23.9	6.6	33.8	59.3	864.2	464.2
2020 RV NGS	24.6	21.2	41.5	60.8	652.2	252.2
2021 RV NGS	25.0	21.6	41.4	55.2	786.7	386.7
2022 RV NGS	26.3	20.1	42.0	52.9	605.7	205.7

Da bi se utvrdilo realno stanje kvaliteta vazduha i termalnog komfora u kancelariji izvršena je analiza srednje satnih vrednosti merenih parametara. Pri analizi je usvojeno da je koncentracija CO<sub>2</sub> u ambijentalnom vazduhu konstantna i da iznosi 400 ppm. Rezultati ove analize prikazani su u tabeli 3.

**Tabela 3.** Kvalitet vazduha i termalni komfor određen analizom srednje satnih vrednosti temperature, relativne vlažnosti vazduha i koncentracije CO<sub>2</sub> u kancelariji u vremenskom periodu 2020.-2022. (RV - period radnog vremena, NGS - negrejna sezona, GS - grejna sezona)

Vremenski period	Kategorija kvaliteta vazduha				Zadovoljavajući termalni komfor
	I	II	III	IV	
	%	%	%	%	%
2020 RV	88.1	8.5	3.4	-	56.2
2021 RV	62.7	21.0	16.3	-	66.1
2022 RV	71.7	17.7	10.6	-	52.3
2020 RV NGS	57.5	3.2	1.7	-	35.2
2021 RV NGS	34.1	5.2	5.7	-	48.6
2022 RV NGS	37.7	2.7	2.5	-	34.4
2020 RV GS	30.6	5.3	1.7	-	77.2
2021 RV GS	28.6	15.8	10.6	-	80.6
2022 RV GS	34.0	15.0	8.1	-	71.1



Na osnovu analize srednje satnih vrednosti koncentracije CO<sub>2</sub> u 2020. godini utvrđeno je da je kvalitet vazduha bio I kategorije u 88.1% radnog vremena, od toga 57.5 % u negrejnjoj i 30.6 % u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2020. godini bio II kategorije u 8.5% radnog vremena, 3.2 % u negrejnjoj i 5.3 % u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2020. godini bio je III kategorije u 3.4 % radnog vremena, od toga 1.7 % u negrejnjoj i 1.7 % u grejnoj sezoni.

Termalni komfor u kancelariji u 2020. godini je bio odgovarajući ( $24^{\circ}\text{C} > T_{\text{in}} > 20^{\circ}\text{C}$ ,  $70\% > \text{RH}_{\text{in}} > 30\%$ ) tokom 56.2% radnog vremena. Od toga u negrejnjoj sezoni termalni komfor bio je odgovarajući u 35.2 % radnog vremena, odnosno u 77.2 % radnog vremena u grejnoj sezoni.

Na osnovu analize srednje satnih vrednosti koncentracije CO<sub>2</sub> u 2021. godini utvrđeno je da je kvalitet vazduha bio I kategorije u 62.7% radnog vremena, od toga 34.1% u negrejnjoj i 28.6% u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2021. godini bio je II kategorije u 21 % radnog vremena, od toga 5.2% u negrejnjoj i 15.8% u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2021. godini bio je III kategorije u 16.3 % radnog vremena, od toga 5.7 % u negrejnjoj i 10.6 % u grejnoj sezoni.

Termalni komfor u 2021. godini je bio odgovarajući tokom 66.1% radnog vremena. U negrejnjoj sezoni termalni komfor bio je odgovarajući u 48.6 % radnog vremena, dok je u grejnoj sezoni bio odgovarajući u 80.6 % radnog vremena.

Na osnovu analize srednje satnih vrednosti koncentracije CO<sub>2</sub> u 2022. godini kvalitet vazduha bio je I kategorije u 71.7% radnog vremena, od toga 37.7% u negrejnjoj i 34% u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2022. godini bio II kategorije u 17.7% radnog vremena, 2.7% u negrejnjoj i 15.0% u grejnoj sezoni. Kvalitet vazduha u 2022. godini bio III kategorije u 10.6% radnog vremena, od toga 2.5% u negrejnjoj i 8.1% u grejnoj sezoni.

Termalni komfor u 2022. godini je bio odgovarajući tokom 52.3% radnog vremena. U negrejnjoj sezoni termalni komfor bio je odgovarajući u 34.4% radnog vremena, odnosno u 71.1% radnog vremena u grejnoj sezoni.

Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 3 može se utvrditi da je kvalitet vazduha u posmatranoj kancelariji bio najbolji u 2020. godini. Razlog tome je pandemija COVID-19 i mere koje su tokom pandemije preduzimate, pre svega u pogledu kraćeg boravka na radnom mestu, pojačanog provetravanja prostorija, i svodenja kontakata među zaposlenima na minimum.

Kvalitet vazduha u kancelariji u 2021. i 2022. godini bio je veoma sličan, pri čemu je u 2021. godini procenat kvaliteta vazduha u III kategoriji bio najviši, 16.3% što je skoro 6% više u odnosu na procenat kvaliteta vazduha u III kategoriji u 2022. godini. Takođe, uočava se sezonski trend promene kvaliteta vazduha, naime kvalitet vazduha u kancelariji je lošiji u toku grejne sezone u odnosu na negrejnju, što se pripisuje slabijem provetravanju prostorije.

Termalni komfor u kancelariji u posmatranom periodu je bio zadovoljavajući u proseku od 52% do 66% radnog vremena. U posmatranom periodu termalni komfor je u grejnoj sezoni bio zadovoljavajući u proseku od 71% do 81% radnog vremena, što je skoro duplo viši procenat vremena sa zadovoljavajućim termalnim komforom u odnosu na negrejnu sezonu (termalni komfor zadovoljavajući od 34% do 49% radnog vremena). I u grejnoj i u negrejnoj sezoni neodgovarajući termalni komfor prouzrokuje temperatura koja prelazi preporučenih 24°C.

### **3. ZAKLJUČAK**

U ovom radu prikazan je deo rezultata merenja kvaliteta vazduha i termalnog komfora u odabranoj kancelariji u IRM Bor u periodu od 2020. do 2022. godine. Na osnovu analize rezultata merenja utvrđeno je da je kvalitet vazduha u kancelariji bio zadovoljavajući u više od 90% radnog vremena (I i II kategorija), dok je termalni komfor bio zadovoljavajući u 60% radnog vremena.

U posmatranom periodu kvalitet vazduha u odabranoj kancelariji bio je najbolji u 2020. godini, kada su zbog pandemije COVID-19 preduzimate posebne mere u pogledu prisustva na radu i provetravanja radnih prostorija. Kvalitet vazduha u 2021. i 2022. godini bio je sličan, sa sezonskim trendom pogoršanja u periodu grejne sezone. Iz tog razloga u narednom periodu više pažnje treba posvetiti provetravanju radnog prostora u grejnoj sezoni.

Termalni komfor u kancelariji u posmatranom periodu je bio zadovoljavajući u proseku oko 60% radnog vremena, sa gotovo duplo višim procentom vremena sa zadovoljavajućim termalnim komforom u grejnoj sezoni. Razlog neodgovarajućeg termalnog komfora je viša temperatura od 24°C i u grejnoj i u negrejnoj sezoni. Posmatrana kancelarija ima prozore na južnoj strani pa je jedno od mogućih rešenja za poboljšanje termalnog komfora u negrejnoj sezoni klimatizovanje posmatrane prostorije.

### **ZAHVALNICA**

*Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2023. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-47/2023-01/200052.*

**LITERATURA**

- [1] M.G. Apte, W.J. Fisk, J.M. Daisey, Associations between Indoor CO<sub>2</sub> Concentrations and Sick Building Syndrome Symptoms in U.S. Office Buildings: An Analysis of the 1994-1996 BASE Study Data, *Indoor Air*, 10 (2000), 4, 246-257.
- [2] B.S. Vučićević, V.M. Turanjanin, M.P. Jovanović, N.S. Mirkov, I.M. Lazović, Uticaj nivoa provetrenosti na kvalitet vazduha, *Termotehnika*, Vol. XL, 1-2 (2014) 11-17.
- [3] B.S. Vučićević, Analiza i ocena održivog razvoja energetskog sistema u zgradarstvu, doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, Srbija, 2014. <https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/3894> (pristupljeno 05.03.2023.)
- [4] ASHRAE, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, in: ASHRAE Standard 62-1999, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1999. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2> (pristupljeno 05.03.2023.)
- [5] ISO:7730, Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, 2005. [https://iss.rs/sr\\_Cyrl/project/show/iso:proj:39155](https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iso:proj:39155) (pristupljeno 05.03.2023.)
- [6] [https://www.sysecol2.ethz.ch/OptiControl/LiteratureOC/CEN\\_06\\_prEN\\_15251\\_FinalDraft.pdf](https://www.sysecol2.ethz.ch/OptiControl/LiteratureOC/CEN_06_prEN_15251_FinalDraft.pdf) (pristupljeno 05.03.2023.)
- [7] V.Tasić, R. Kovačević, T. Apostolovski-Trujić, I. Lazović, N. Mirkov, D. Topalović, A. Božilov, N. Mišić, Uređaj za merenje kvaliteta vazduha - PAQMAN 2020, Naučno veće IRM Bor br. XXVIII/4. od 04.11.2020., tehničko rešenje M82, Arihiva Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor, 2020.
- [8] <https://www.ic-meter.com/what-is-ic-meter/> (pristupljeno 05.03.2023.)
- [9] V. Tasić, A. Božilov, I. Lazović, N. Mirkov, N., Measurement of CO<sub>2</sub> Concentrations in Indoor Air Using Low-Cost Sensors and Monitors, *Bakar*, Vol. 45, 2 (2020) 11-18.
- [10] <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf> (pristupljeno 05.03.2023.)
- [11] [https://www.ic-meter.com/dk/wp-content/uploads/2013/06/Sensirion\\_Humidity\\_SHT21\\_Datasheet\\_V3.pdf](https://www.ic-meter.com/dk/wp-content/uploads/2013/06/Sensirion_Humidity_SHT21_Datasheet_V3.pdf) (pristupljeno 05.03.2023.)

UDK: 661.92:628.539:669.04(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2301053T

NAUČNI RAD

Oblast: Zaštita životne sredine

Primljen: 23.01.2023.

Prerađen: 13.04.2023.

Prihvaćen: 18.04.2023.

**MERENJE KVALITETA VAZDUHA U AGLOMERACIJI BOR  
U 2022. GODINI U PERIODU REKONSTRUKCIJE  
TOPIONICE BAKRA U BORU**

**MEASUREMENT OF THE AIR QUALITY IN THE AGGLOMERATION  
OF BOR IN 2022 DURING THE COPPER SMELTER  
RECONSTRUCTION IN BOR**

Viša Tasić<sup>1a</sup>, Tatjana Apostolovski-Trujić<sup>1b</sup>, Bojan Radović<sup>1c</sup>,  
Renata Kovačević<sup>1d</sup>, Nevena Ristić<sup>1e</sup>, Tamara Urošević<sup>1f</sup>, Vladan Kamenović<sup>1g</sup>

<sup>1</sup>Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

E-mail: visa.tasic@irmbor.co.rs

**Orcid:**

<sup>1a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6710-6529>, <sup>1b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9369-160X>,

<sup>1c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4884-1418>, <sup>1d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4108-0855>,

<sup>1e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1408-237X>, <sup>1f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9838-3702>,

<sup>1g</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9476-5378>

**Izvod**

*U ovom radu prikazani su rezultati merenja kvaliteta vazduha u aglomeraciji Bor u periodu jun-decembar 2022. godine u vreme kada topionica bakra u Boru nije radila zbog radova na rekonstrukciji i povećanju kapaciteta za preradu koncentrata bakra.*

*Na osnovu analize postojećih mernih mesta i koncentracija zagađujućih materija koje se mere u lokalnoj i državnoj mreži monitoringa kvaliteta vazduha na teritoriji aglomeracije Bor, kao i mogućeg uticaja novih rudarskih i metalurških objekata u kompaniji Serbia Zijin Copper Bor, izabrane su lokacije na kojima su vršena merenja nivoa zagađujućih materija, a koje nisu u sastavu državne ili lokalne mreže monitoringa kvaliteta vazduha.*

*Rezultati dodatnih merenja kvaliteta vazduha pokazuju da nije bilo prekoračenja satnih i dnevnih graničnih vrednosti za gasovite polutante, kao ni prekoračenja granične vrednosti za srednje dnevnu koncentraciju olova u suspendovanim česticama frakcije  $PM_{10}$  kao i ciljanih srednjih godišnjih vrednosti za koncentracije kadmijuma i nikla u  $PM_{10}$ . Koncentracija arsena u  $PM_{10}$  na mernom mestu PU Bor bila je iznad ciljne srednje godišnje vrednosti u trajanju od 3 dana. Maksimalna izmerena srednja dnevna vrednost koncentracije arsena u  $PM_{10}$  na ovom mernom mestu iznosila je  $11.3 \text{ ng/m}^3$ .*

*Na osnovu kompletnog uvida u rezultate merenja kvaliteta vazduha u aglomeraciji Bor u toku 2022. godine može se zaključiti da, u periodu kada topionica bakra radi, dominantan udeo u nivoima  $SO_2$ , CO, kao i koncentracijama arsena, kadmijuma i olova u  $PM_{10}$  potiče od emisija gasovitih polutanata iz topionice bakra.*

*Utvrđeno je da na mernom mestu IRM Bor, na nivo azotnih oksida u vazduhu dominantan uticaj imaju emisije azotnih oksida poreklom iz saobraćaja. Takođe, rezultati merenja ukazuju na to da rad topionice u 2022. godini nije u većoj meri doprineo povećanju koncentracija suspendovanih čestica  $PM_{10}$ , i da u periodu rada topionice bakra u 2022. godini, nisu prerađivani koncentraciji bakra sa povećanim sadržajem nikla.*

**Ključne reči:** *merenje, topionica bakra, kvalitet vazduha, suspendovane čestice, arsen*

### Abstract

*This paper presents the results of the air quality measurements in the agglomeration of Bor in the period June-December 2022, in which the Copper Smelter in Bor was not working due to the works on reconstruction and increasing the capacity for copper concentrate processing.*

*Based on an analysis of the existing measuring points and concentrations of pollutants, measured in the local and national air quality monitoring network in the territory of the Bor agglomeration, as well as the possible impact of the new mining and metallurgical facilities in the company Serbia Zijin Copper Bor, the additional locations, where the measurements were performed, were selected.*

*The air quality measurement results show that there was no exceedance of the hourly and daily limit values for gaseous pollutants, nor were there an exceedance of the limit value for the mean daily concentration of lead in the suspended particles of the  $PM_{10}$  fraction, as well as the target values for the concentrations of cadmium and nickel in  $PM_{10}$ . The arsenic concentration in  $PM_{10}$  at the measuring point of PU Bor was above the target annual value for 3 days. The maximum measured mean daily value of arsenic concentration in  $PM_{10}$  at this measuring point was  $11.3 \text{ ng/m}^3$ .*

*Based on a complete insight into the results of air quality measurements in the Bor agglomeration in 2022, it can be concluded that the dominant share of concentration of  $SO_2$ , CO, as well as the concentration of arsenic, cadmium, and lead in  $PM_{10}$ , originates from the gaseous pollutant emissions from the Copper Smelter Bor in the period when it operates.*

*It was established that at the measuring point MMI Bor, the nitrogen oxide emissions from traffic mostly affect the level of nitrogen oxides in the air. Also, the measurement results indicate that the operation of the Smelter in 2022 did not significantly contribute to the concentration increase of suspended  $PM_{10}$  particles in the agglomeration of Bor, and that during the period of operation of the Copper Smelter in 2022, no copper concentrates with increased nickel content were processed.*

**Keywords:** *measurement, copper smelter, air quality, suspended particles, arsenic*

## 1. UVOD

Aglomeracija Bor (teritorija grada Bora) je više od jednog veka poznata po otkopavanju i preradi rude bakra i plemenitih metala. Aerozagađenje u Boru pretežno nastaje usled emisija gasovitih polutanata iz procesa prerade koncentrata bakra u topionici bakra u Boru [1]. Usled rudarskih radova na površinskim kopovima u okolini grada topografija terena je značajno promenjena. Usled formiranja visokih rudarskih odlagališta došlo je do smanjenja prirodnog provetravanja, promene pravca vetra, i povećanja perioda tišine (brzina vetra manja od  $1 \text{ m/s}$ ), što je dovelo do porasta aerozagađenja u urbanoj sredini grada Bora.

Na teritoriji aglomeracije Bor vrši se sistematski monitoring kvaliteta vazduha (monitoring koncentracija sumpordioksida, suspendovanih čestica i toksičnih elemenata u suspendovanim česticama) još od 1976. godine.

Automatski monitoring kvaliteta vazduha u Boru počinje 2004. godine postavljanjem automatskih analizatora sumpordioksida na mernim mestima Park i Jugopetrol, a kasnije i na drugim mernim mestima: Brezonik (2007), Institut (2009), Krivelj (2015) i Slatina (2016). U tabeli 1. prikazani su osnovni podaci o automatskim mernim stanicama za monitoring kvaliteta vazduha u aglomeraciji Bor koje su bile operativne u 2022. godini.

**Tabela 1.** Automatske merne stanice za monitoring kvaliteta vazduha u aglomeraciji Bor

Red. br.	Ime /Organizacija	Geografske koordinate (latitude/N/E)	Tip	Parametri koji se mere	
				Zagađujuće materije	Meteorološki parametri
1.	Bor - Park / SEPA	44°04'33'' N 22°05'58'' E	U/I	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> , SO <sub>2</sub>	t, RH, p, wd, ws
2.	Bor - Institut / SEPA	44°03'35'' N 22°06'05'' E	U/I	SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, O <sub>3</sub> ,	t, RH, p, wd, ws
3.	Bor - Brezonik / SEPA	44°05'52'' N 22°05'30'' E	U/I	SO <sub>2</sub>	-
4.	Bor - Krivelj / ZiJin	44°08'16'' N 22°05'35'' E	R/I	SO <sub>2</sub>	t, RH, p, wd, ws
5.	Bor - Slatina / ZiJin	44°02'24'' N 22°09'46'' E	R/I	SO <sub>2</sub>	-

\*U/I - Urbana/Industrijska, R/I - Ruralna/Industrijska

Kako bi se izvršila što preciznija procena uticaja rada topionice bakra Bor na kvalitet vazduha i zdravlje ljudi period rekonstrukcije topionice bakra iskorišćen je za dodatna merenja kvaliteta vazduha na lokacijama koje nisu u sastavu državne ili lokalne mreže monitoringa kvaliteta vazduha, a koje su od značaja za lokalnu zajednicu.

## 2. OPIS MERNIH MESTA I METODE MERENJA

Na osnovu analize postojećih mernih mesta i koncentracija zagađujućih materija koje se mere u lokalnoj i državnoj mreži monitoringa kvaliteta vazduha na teritoriji grada Bora, kao i mogućeg uticaja novih rudarskih i metalurških objekata u kompaniji Serbia ZiJin Copper Bor, proistekao je i izbor dodatnih lokacija na kojim bi se vršila merenja nivoa zagađujućih materija u periodu kada topionica bakra u Boru ne radi. U tabelama 2 i 3 prikazani su podaci o najznačajnijim tačkastim i površinskim izvorima emisija zagađujućih materija u aglomeraciji Bor.

**Tabela 2.** Najznačajniji tačkasti izvori emisije zagađujućih materija u aglomeraciji Bor

R. br.	Emiteri (tačkasti izvori emisije)	Skrraćena oznaka	Geografske koordinate	Nadmorska visina	Udaljenost od topionice bakra
				m	m
1	Topionica	E1	44°04'39" N 22°06'34" E	361	0
2	Toplana Bor	E2	44°04'22" N 22°06'43" E	378	566
3	Postrojenje za odsumporavanje		44°04'38" N 22°06'39" E	360	120
4	Energana		44°04'26" N 22°06'41" E	377	440
5	Fabrika sumporne kiseline		44°04'41" N 22°06'36" E	356	75
6	Postrojenje za sušenje koncentrata		44°04'38" N 22°06'23" E	374	288
7	Kotlarnica Banjsko polje	E3	44°03'44" N 22°03'20" E	365	4634

**Tabela 3.** Najznačajniji površinski izvori emisije zagađujućih materija u aglomeraciji Bor

R.br.	Emiteri (površinski izvori emisije)	Skrraćena oznaka	Nadmorska visina	Udaljenost od topionice bakra
			m	m
1	Površinski kop Bor	ПКБ	128-267	1600-2400
2	Površinski kop Veliki Krivelj	ПКБК	151-495	3900-7400
3	Površinski kop Kriveljski kamen	ПККК	529-614	5800-6600
4	Površinski kop Cerovo	ПКЦ	423-515	11400-13900
5	Površinski kop Donja Bela Reka	ПКДБР	350-400	7600-8000
6	Površinski kop Zagrađe	ПКЗА	230-400	9100-10000
7	Flotacijsko jalovište Bor	ФЈБ	360-365	400-1300
8	Flotacijsko jalovište Veliki Krivelj	ФЈБК	300-400	1900-4500

Odabrane dodatne lokacije za merenje kvaliteta vazduha u periodu kada topionica bakra Bor nije u radu prikazane su u tabeli 4 i na slici 1.





Na svakom mernom mestu opisanom u tabeli 4 vršeno je uzorkovanje suspendovanih čestica referentnim semplerom Sven/Leckel LVS3 [2] sa glavom za uzorkovanje frakcije  $PM_{10}$ . Uzorkovanje je vršeno u trajanju od 10 dana (24-časovni uzorci su prikupljeni od 14 h do 14 h narednog dana). Kao medijum za prikupljanje uzoraka  $PM_{10}$  korišćeni su kvarcni filteri Whatman QM-A prečnika 47 mm. Uzorkovanje i određivanje masene koncentracije suspendovanih čestica  $PM_{10}$  vršeno je u skladu sa standardom SRPS EN12341:2015 [3]. Nakon određivanja mase eksponiranih filtera vršena je njihova dalja priprema za hemijske analize u skladu sa procedurom SRPS EN14902:2008 [4]. Sadržaj hemijskih elemenata u uzorcima je određen primenom ICP MS (Agilent model 7700). Limiti detekcije ovog uređaja za As, Pb, Cd, i Ni bili su 0.1, 0.5, 0.02, i 0.7  $ng/m^3$ , respektivno. Kontrola primenjenih postupaka izvršena je korišćenjem standarda Urban Particulate Matter Standard Reference Material 1648a [5].

Pored toga, u istom vremenskom periodu, simultano sa gravimetrijskim merenjima suspendovanih čestica  $PM_{10}$  na svakom mernom mestu iz tabele 4 vršena su kontinuirana merenja masenih koncentracija gasovitih polutanata  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NO_2$ ,  $NO$ ,  $CO$  i  $O_3$  pomoću automatskih gasnih analizatora ( $SO_2$  Analizator - MODEL T100, EN 14212, TUV-Report: 936/21205926/B, 2007,  $NO_2$  Analizator MODEL T200, USEPA: Reference Method Number RFNA 1194-099 CE: EN61326,  $CO$  Analizator MODEL T300E, EU: EN14626 TÜV Rheinland,  $O_3$  Analizator MODEL T400, US EPA EQQA-0992-087 EU: EN14625 TÜV Rheinland) [6]. Navedeni analizatori ugrađeni su u mobilnu mernu stanicu kao što je prikazano na slici 2.



**Sl. 2.** Mobilna merna stanica sa automatskim analizatorima za merenje gasovitih polutanata

### 3. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

U tabeli 5 prikazane su srednje vrednosti srednje dnevni koncentracija gasovitih polutanata PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, kao i srednje vrednosti dnevnih osmočasovnih maksimuma koncentracija CO i O<sub>3</sub> u toku kampanje merenja. Za vreme kampanje merenja nisu detektovana prekoračenja dnevnih graničnih vrednosti gasovitih polutanata ni na jednom mernom mestu.

U tabeli 6 prikazane su srednje vrednosti srednje dnevni koncentracija arsena, kadmijuma, olova i nikla detektovanih u suspendovanim česticama frakcije PM<sub>10</sub> na posmatranim mernim mestima.

**Tabela 5.** Rezultati automatskog monitoringa kvaliteta vazduha (srednje dnevne koncentracije PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, i maksimumi dnevnih srednjih osmočasovnih vrednosti CO i O<sub>3</sub>)

Merno mesto	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NO <sub>2</sub>	NO	CO	O <sub>3</sub>
	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>
MM Borsko jezero	12.8	9.3	8.0	4.6	3.0	0.24	66.1
MM Brestovačka banja	19.4	7.3	6.5	3.6	1.8	0.25	72.6
MM Metovnica	26.3	21.0	7.9	4.1	2.4	0.23	94.7
MM Brestovac	19.1	4.4	10.0	6.7	2.4	0.21	93.0
MM Oštrej	20.9	6.1	9.9	6.4	2.3	0.16	91.8
MM Industrijska zona (7. km)	44.2	8.0	19.6	12.8	4.4	0.66	57.6
MM Slatinsko naselje	25.7	8.0	16.5	12.9	2.5	0.24	87.1
MM PU Bor	35.9	15.9	25.7	11.0	9.7	0.62	68.0
MM Slatina	23.3	21.4	14.2	8.7	3.5	0.40	88.0
MM Gornjane	34.8	5.3	12.2	8.0	2.9	0.52	67.6

**Tabela 6.** Rezultati analize sastava suspendovanih čestica frakcije PM<sub>10</sub> (statistika srednje dnevni koncentracija posmatranih hemijskih elemenata);  
 ND - ispod granice detekcije

Merno mesto	As	Cd	Pb	Ni
	ng/m <sup>3</sup>	ng/m <sup>3</sup>	ng/m <sup>3</sup>	ng/m <sup>3</sup>
MM Borsko jezero	0.3	ND	0.5	1.9
MM Brestovačka banja	0.5	ND	1.7	1.3
MM Metovnica	1.2	ND	3.9	2.9
MM Brestovac	2.8	0.2	8.5	2.0
MM Oštrej	0.7	ND	2.6	2.4
MM Industrijska zona (7. km)	4.2	0.4	19.6	4.2
MM Slatinsko naselje	3.5	0.1	47.6	3.9
MM PU Bor	6.1	0.2	10.9	0.9
MM Slatina	3.6	0.1	5.1	2.6
MM Gornjane	0.5	ND	3.5	0.8

U toku kampanje merenja nisu detektovana prekoračenja granične vrednosti za srednje dnevnu koncentraciju olova u  $PM_{10}$ , niti prekoračenja ciljnih godišnjih vrednosti za koncentracije kadmijuma i nikla u  $PM_{10}$ . Na mernom mestu PU Bor koncentracije arsena u  $PM_{10}$  bile su iznad ciljne godišnje vrednosti u toku tri dana od 10 dana merenja. Maksimalna izmerena srednja dnevna vrednost koncentracije arsena u  $PM_{10}$  iznosila je  $11.3 \text{ ng/m}^3$ . Dominantan izvor zagađenja arsenom na ovom mernom mestu su emisije suspendovanih čestica  $PM_{10}$  iz površinskih izvora u krugu topionice bakra Bor (prašina koja se podiže i raznosi pod uticajem vetra i saobraćaja).

Izvršeno je poređenje rezultata dodatnih merenja kvaliteta vazduha sa rezultatima redovnog monitoringa kvaliteta vazduha iz državne i lokalne mreže monitoringa za periode januar-maj 2022. godine i jun-decembar 2022. godine. Srednje vrednosti rezultata merenja u aglomeraciji Bor u nevedenim periodima prikazane su u tabelama 7 i 8.

**Tabela 7.** Prosečne vrednosti srednje dnevne koncentracije  $SO_2$ ,  $PM_{10}$ , i koncentracija arsena, kadmijuma, olova i nikla u  $PM_{10}$  u posmatranim vremenskim periodima u 2022. godini; RM - redovni monitoring (merna mesta u okviru državne i lokalne mreže monitoringa u aglomeraciji Bor); DM - dopunski monitoring (deset dodatnih lokacija opisanih u tabeli 4)

Period merenja	$SO_2$	$PM_{10}$	As	Cd	Pb	Ni
	$\mu\text{g/m}^3$	$\mu\text{g/m}^3$	$\text{ng/m}^3$	$\text{ng/m}^3$	$\text{ng/m}^3$	$\text{ng/m}^3$
RM: januar - maj 2022. god.	61.4	37.3	26.0	3.2	93.5	4.9
RM: jun - decembar 2022. god.	12.6	32.3	4.9	0.2	12.7	5.1
DM: jun - decembar 2022. god.	10.7	26.2	2.3	0.2	10.4	2.3

Rezultati merenja prikazani u tabeli 7 jasno pokazuju da su, u periodu rada topionice bakra (januar-maj 2022. godina), prosečne koncentracije  $SO_2$ , kao i koncentracije arsena, kadmijuma i olova u  $PM_{10}$  značajno više u odnosu na koncentracije ovih polutanata koje su izmerene u periodu kada topionica bakra nije radila (jun-decembar 2022. godina). Ovakvi rezultati pokazuju da se dominantni izvori emisije navedenih polutanata nalaze u topionici bakra. Suprotno tome, prosečne koncentracije suspendovanih čestica  $PM_{10}$ , kao i koncentracije nikla u  $PM_{10}$  približno su jednake u oba posmatrana perioda. Ovakvi rezultati pokazuju da rad topionice ne utiče u većoj meri na povećanje koncentracija suspendovanih čestica  $PM_{10}$  u aglomeraciji Bor, i na povećanje koncentracije nikla u  $PM_{10}$ . Stoga se može zaključiti da se u topionici bakra, u periodu njenog rada tokom 2022. godine, nisu prerađivali koncentri bakra sa povećanim sadržajem nikla.

Rezultati dopunskog monitoringa u periodu kada topionica nije radila tokom 2022. godine, prikazani u tabeli 7, pokazuju da su prosečne koncentracije posmatranih polutanata na dodatnim lokacijama istog reda veličine kao i na mernim mestima na kojima se vrši redovni monitoring kvaliteta vazduha.

**Tabela 8.** *Prosečne srednje dnevne koncentracije NOx, NO<sub>2</sub>, NO, i CO u posmatranom vremenskim periodima u 2022. godini, RM - redovni monitoring (AMS Bor Institut IRM), DM - dopunski monitoring (deset dodatnih lokacija koje su date u tabeli 4)*

Period merenja	NOx	NO <sub>2</sub>	NO	CO
	mg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
RM: januar - maj 2022	48.3	24.4	13.6	0.6
RM: jun - decembar 2022	47.1	23.7	13.3	0.3
DM: jun - decembar 2022	13.1	7.9	3.5	0.3

Rezultati merenja prikazani u tabeli 8 jasno pokazuju da su, u periodu rada topionice bakra (januar-maj 2022. godina), prosečne koncentracije NOx, NO<sub>2</sub>, i NO na automatskoj mernoj stanici Bor Institut IRM [7] bile približno jednake koncentracijama navedenih polutanata u periodu kada topionica bakra nije radila (jun-decembar 2022. godina). Iz navedenog proizilazi zaključak da dominantan izvor emisije NOx, NO<sub>2</sub>, i NO na ovom mernom mestu nisu emisije azotnih oksida iz topionice bakra, već saobraćaj, pošto se ovo merno mesto nalazi neposredno pored jedne od najprometnijih ulica u gradu. U prilog ovoj konstantaciji govore i rezultati merenja azotnih oksida na dodatnim mernim mestima u periodu kada topionica bakra u Boru nije radila. Koncentracije azotnih oksida na dodatnim mernim mestima u proseku su tri puta niže od onih na mernom mestu Bor Institut IRM. Osnovni razlog za ovakve rezultate je položaj dodatnih mernih mesta, koja se uglavnom ne nalaze pored prometnih puteva, pa je i uticaj saobraćaja na dodatnim mernim mestima znatno manji nego na mernom mestu Bor Institut IRM. Prosečne koncentracije CO na mernom mestu Bor Institut IRM bile su duplo niže u periodu kada topionica bakra nije radila u odnosu na period kada je topionica bakra bila u radu, što ukazuje na to da emisije CO iz topionice bakra znatno utiču na povećanje koncentracija CO na ovom mernom mestu.

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su rezultati dodatnih merenja kvaliteta vazduha u aglomeraciji Bor u periodu jun-decembar 2022. godine, u vreme kada topionica bakra u Boru nije radila.

Rezultati dodatnih merenja kvaliteta vazduha pokazuju da u posmatranom periodu nije bilo prekoračenja satnih i dnevnih graničnih vrednosti za gasovite polutante, kao ni prekoračenja granične vrednosti za srednje dnevnu koncentraciju olova u suspendovanim česticama frakcije PM<sub>10</sub>. Takođe, nisu detektovana prekoračenja ciljanih vrednosti za godišnje koncentracije kadmijuma i nikla u PM<sub>10</sub>. Koncentracija arsena u PM<sub>10</sub> na mernom mestu PU Bor bila je iznad ciljane godišnje vrednosti u trajanju od 3 od 10 dana merenja. Maksimalna izmerena

srednja dnevna vrednost koncentracije arsena u  $PM_{10}$  na ovom mernom mestu iznosila je  $11.3 \text{ ng/m}^3$ .

Na osnovu kompletnog uvida u rezultate merenja kvaliteta vazduha u aglomeraciji Bor u toku 2022. godine može se zaključiti da, u periodu kada je topionica bakra bila u radu, dominantan udeo u nivoima  $SO_2$ , CO, kao i koncentracijama arsena, kadmijuma i olova u  $PM_{10}$  potiče od emisija gasovitih polutanata iz topionice bakra.

Analizom rezultata merenja utvrđeno je da na mernom mestu Bor Institut IRM na nivo azotnih oksida dominantan uticaj imaju emisije azotnih oksida poreklom od saobraćaja. Takođe, rezultati merenja kvaliteta vazduha ukazuju na to da rad topionice bakra u 2022. godini nije u većoj meri doprineo povećanju koncentracija suspendovanih čestica  $PM_{10}$  u aglomeraciji Bor. U periodu rada topionice bakra u 2022. godini, nisu prerađivani koncentri bakra sa povećanim sadržajem nikla, tako da su izmerene koncentracije nikla u  $PM_{10}$  u 2022. godini bile na nivou prirodnog fona.

## ZAHVALNICA

*Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2023. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-47/2023-01/200052.*

## LITERATURA

- [1] N. Ristić, A. Simonovski, V. Tasić, T. Apostolovski-Trujić, T., Analiza rezultata merenja čestica  $PM_{10}$  na teritoriji grada Bora za period 2020-2021. godine, Bakar, Vol.46, 2 (2021) 19-28.
- [2] <https://www.et.co.uk/assets/resources/datasheets/lvs3mvs6e.pdf> (pristupljeno 03.03.2023.)
- [3] SRPS EN 12341:2015 Vazduh ambijenta - Standardna gravimetrijska metoda merenja za određivanje  $PM_{10}$  ili  $PM_{2.5}$  masene koncentracije suspendovanih čestica, [https://iss.rs/sr\\_Cyrl/publication/show/iss:pub:50728](https://iss.rs/sr_Cyrl/publication/show/iss:pub:50728) (pristupljeno 03.03.2023.)
- [4] SRPS EN 14902:2008 Kvalitet vazduha ambijenta - Standardna metoda za određivanje Pb, Cd, As i Ni u frakciji  $PM_{10}$  suspendovanih čestica; [https://iss.rs/sr\\_Cyrl/project/show/iss:proj:18667](https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:18667) (pristupljeno 03.03.2023.)
- [5] Standard Reference Material 1648a - Urban Particulate Matter [https://www-s.nist.gov/srmors/view\\_detail.cfm?srm=1648A](https://www-s.nist.gov/srmors/view_detail.cfm?srm=1648A) (pristupljeno 03.03.2023.)
- [6] <https://www.teledyne-api.com/products> (pristupljeno 03.03.2023.)
- [7] <http://www.amskv.sepa.gov.rs/pregledpodataka.php?stanica=26> (pristupljeno 03.03.2023.)

UDK: 621.313.13:681.31(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2301063M

NAUČNI RAD

Oblast: Energetika

Primljen: 04.03.2023.

Prerađen: 20.04.2023.

Prihvaćen: 25.04.2023.

**ANALIZA ASINHRONIH ELEKTROMOTORNIH POGONA  
ZA INDUSTRIJSKE MAŠINE SA CIKLIČNIM (INTERMITIRANIM)  
UDARNIM OPTEREĆENJEM**

**ANALYSIS OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRICAL DRIVES  
FOR THE INDUSTRIAL MACHINES WITH A CYCLIC  
(INTERMITTENT) ELECTRICAL SHOCK LOAD**

Nenad Marković<sup>1a</sup>, Slobodan Bjelić<sup>2a</sup>, Filip Marković<sup>2b</sup>

<sup>1</sup>Akademija strukovnih studija kosovsko metohijska, Odsek Uroševac –  
Leposavić, 38218 Leposavić, Srbija, E-mail: nen.mark74@yahoo.com

<sup>2</sup>Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Univerzitet u Prištini, Kneza  
Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija

**Orcid:**

<sup>1a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6960-1953>

<sup>2a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5642-8936>; <sup>2b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0832-0378>

**Izvod**

*U radu je prikazana analiza i predložena je tehnika optimizacije asinhronih električnih pogona proizvodnih mašina sa cikličnim udarnim opterećenjem uz uslov minimalne potrošnje energije. Pri izračunavanju su usvojene srednje vrednosti obrtnog momenta elektromotora u radnom opsegu klizača. Izvedene formule mogu da se koriste za izračunavanje optimalnih parametara elektromotornog pogona.*

**Ključne reči:** *elektromotorni pogon, asinhroni motor, ciklično (intermitirano) udarno opterećenje, analiza, optimizacija, parametri*

**Abstract**

*The analysis and proposed optimization technique of asynchronous electric drives of production machines with a cyclic impact load, under the condition of minimum energy consumption, was presented in this paper. The mean values of the electric motor torque in the working range of a slider, were adopted in calculation. The derived formulae can be used to calculate the optimal parameters of the electric motor drive.*

**Keywords:** *electric drive, asynchronous motor, cyclic (intermittent) impact load, analysis, optimization, parameters*

## 1. UVOD

U proizvodnim mašinama sa cikličnim udarnim opterećenjem (kovanje, presovanje, valjanje, razboji, pilane, itd.) za rasterećenje elektromotora glavnog pogona koriste se inercione mase pogona, a nekad se planira i poseban zamajac za obezbeđenje potrebne rezerve kinetičke energije [1]. U pogonima tih mašina koriste se asinhroni motori sa povećanom kontrolom klizanja mašine [2,3,4]. Rad pogona industrijskih mašina sa cikličnim opterećenjem karakteriše kontinualna promena vrednosti i smera toka energije. U toku tehnološke operacije obavlja se koristan rad, uglavnom pomoću energije predate inercionim masama pogona, a u pauzama između udarnih opterećenja, koristi se rezervna injektirana kinetička energija inercijalnih masa koju obnavlja elektromotor glavnog pogona.

Između motora i proizvodne (radne) mašine obično se postavlja mehanički prenosnik, u vidu zupčanika ili kajišnog prenosnika sa fiksnim prenosnim odnosom (to je često reduktor za smanjenje brzine i povećanje momenta). Ponekad je to i prenosnik sa promenljivim prenosnim odnosom (u višestepenom obliku kao kod automobilske menjalice) ili prenosnik rotacionog kretanja (pužasti prenosnik). Najjednostavniji slučaj je prenos pomoću vratila – osovine asinhronog motora koja spaja motor sa radnom mašinom [5,6].

Cilj rada je analiza rada asinhronih elektromotornih pogona proizvodnih mašina sa cikličnim udarnim opterećenjem iz uslova minimalne potrošnje energije pomoću univerzalnog indikatora energetske efikasnosti. Osnova za analizu asinhronih elektromotora je integracija diferencijalnih jednačina pogona koja je otežana zbog nelinearne prirode mehaničkih karakteristika asinhronih elektromotora. Zadatak se može pojednostaviti kada se radi sa srednjom vrednošću obrtnog momenta elektromotora u radnom opsegu promene klizanja [7,8].

## 2. PREGLED LITERATURNIH IZVORA

M. Faradej je 1831. godine otkrio pojavu i formulisao zakon elektromagnetne indukcije. U sledeće dve godine (1832.-1834.) ruski akademik E.H. Lenz, posle detaljne analize elektromagnetne indukcije je u „pravilu“ pokazao da ta pojava i Amperov fenomen dejstva magnetnog polja na struje i obratno predstavljaju dve strane istog elektromagnetnog procesa. Radovi G. Ferarijusa i N. Tesle u analizi elektromagnetnih polja naizmjenične struje su značajno doprineli teoriji i razvoju električnih motora. N. Tesla je 1886. godine stvorio prvi dvofazni električni motor.

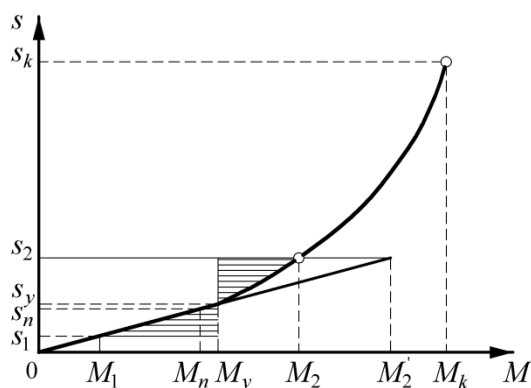
Druga polovina XX veka je rezervisana za veliki broj radova iz oblasti električnih mašina kojima su se bavili A.И. Вольдек [3], Bergeron [9], A.E.

Fitzgerald, C. Kingsley [10] i ostali - neka su od imena stotine naučnika i inženjera koji su razvijali teoriju o električnim mašinama.

Za sve veću primenu pogona asinhronih motora sa tiristorskim upravljanjem, sve su značajniji dinamički pristupi istraživanja uticaja elektromagnetnih prelaznih procesa u asinhronim motorima. U radu Markovića i ostalih [11] kroz simulaciju dinamičkih stanja asinhronih motora istražen je uticaj parametara koji se odnose na karakteristike asinhronih motora. Dobijeni rezultati su korišćeni za određivanje dinamičkih režima asinhronih motora.

### 3. PARAMETRI I VELIČINE ASINHRONOG ELEKTROMOTORA

Na slici 1 prikazan je stabilni deo mehaničke karakteristike asinhronog elektromotora, koji pokazuje promene klizanja u radnom domenu (oblast od  $s_1$  do  $s_2$ ) sa povećanjem obrtnog momenta motora od  $M_1$  do  $M_2$ . Vrednosti srednjeg obrtnog momenta elektromotora  $M_y$  i odgovarajućih klizanja  $s_y$  se određuju iz uslova jednakosti osenčenih površina, što uzrokuje povećanje udarnog momenta pri  $s_1 < s < s_y$  i ekvivalentno smanjenje udarnog momenta pri  $s_y < s < s_2$ .



SI. 1. Mehanička karakteristika elektromotornih pogona proizvodnih mašina sa cikličnim udarnim opterećenjem

Veličina klizne radne površine  $s_2 - s_y$  zavisi od intenziteta udarnog opterećenja, zakrivljenosti mehaničke karakteristike datog opsega klizanja i zaliha kinetičke energije inercijalnih masa. Tačnije, preslikavanje zone



mehaničkih karakteristika od  $s_y$  do  $s_2$  dobija se aproksimacijom preseka prave linije koja prolazi kroz tačke  $M_1, s_1$  i  $M_2, s_2$ .

Pri udarnom opterećenju suprostavljenu otporni mehanički moment  $M_{s0}$  je višestruko veći od srednje vrednosti obrtnog momenta elektromotora. U pauzi je prosečna rotaciona brzina obrtnog momenta motora mnogo veća od otpornog momenta u praznom hodu i asinhroni motor radi sasvim normalno sa srednjim obrtnim momentom. Proračuni po metodi u ovom radu pokazuju moguću grešku reda 5%.

Za polaznu tačku u proračunu usvojena je tačka koja odgovara vrednostima  $s_n$  i  $M_n$  u nominalnom režimu. Jednačine koje odgovaraju karakteristici na slici 1 su:

$$\begin{aligned} (M_y - M_1)(s_y - s_1) &= (M_2 - M_y)(s_2 - s_y) \\ s_y &\cong s_n \frac{M_y}{M_n}, M_1 \cong M_n \frac{s_1}{s_n}, M_2 = k_{s2} M_n \frac{s_2}{s_n} \end{aligned} \quad (1)$$

gde  $k_{s2} = \frac{M_2}{M_n}$  odgovara vrednosti koeficijenta  $k_s$  u tački  $M_2, s_2$ , a  $M_2$  su vrednosti obrtnog momenta električnog motora u linearnom delu mehaničke karakteristike koji prolazi kroz tačke nominalnog režima pri  $s = s_2$ .

U analizi je korišćen Klosov aproksimacioni obrazac za određivanje koeficijenta  $k_s$  iz mehaničke karakteristike asinhronog motora sa većim klizanjem za opseg  $s_n > s > s_k$  [7,8]:

$$k_s \cong \frac{M_y}{M_n} \frac{s_n}{s} \sqrt{\frac{s}{s_k} \left( 2 - \frac{s}{s_k} \right)} \quad (2)$$

gde je  $M_k$  maksimalni obrtni moment dobijen pri kritičnom klizanju  $s_k$ . Rešavanjem jednačine (1) dobija se:

$$\frac{M_y}{M_n} = \frac{1}{s_n} \frac{k_s s_2^2 - s_1^2}{(1 + k_s)s_2 - 2s_1} \cong \frac{k_s}{1 + k_s} \frac{s_1 + s_2}{s_n} \quad (3)$$

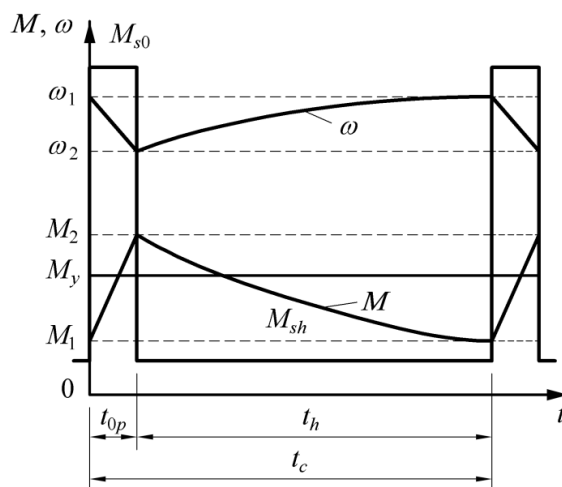
Ako je  $s_2 < s_n$  mogu se usvojiti vrednosti  $k_s = 1$  i  $\frac{M_y}{M_n} = \frac{s_1 + s_2}{2s_n}$ .

Na slici 2 su prikazani dijagrami promene suprostavljenog otpornog mehaničkog momenta proizvodne mašine  $M_s$ , obrtnog momenta električnog motora  $M$  i ugaona brzina obrtanja na vratilu mašine  $\omega$ . U vremenskom domenu radnog ciklusa  $t_c = t_{0p} + t_h$  (gde je  $t_{0p}$  vreme tehnološke operacije, a  $t_h$  vreme pauze) je:

$$iM_y - \eta_p M_{s0} = (J_M + i^2 J_d) \frac{d\omega}{dt} \quad \text{za } 0 < t < t_{0p} \quad (4)$$

$$iM_y - \eta_p M_{sh} = (J_M + i^2 J_d) \frac{d\omega}{dt} \quad \text{za } 0 < t < t_c \quad (5)$$

gde je  $i$  prenosni odnos,  $\eta_p$  koeficijent korisnog dejstva (KKD),  $J_M$  moment inercije proizvodnog mehanizma koji obuhvata uticaj zamajca i detalje reduktora,  $J_d$  dinamički moment inercije električnog motora.



**Sl. 2.** Vremenski dijagrami promene suprostavljenog otpornog mehaničkog momenta proizvodne mašine i obrtnog momenta električnog motora

Prema jednačinama (4) i (5) potrebna električna energija u toku jednog ciklusa iznosi:

$$W_c = \frac{1}{\eta_E} \left[ \int_0^{t_{0p}} iM_y \omega dt + \int_0^{t_h} iM_y \omega dt \right] = \frac{W_k}{\eta_d \eta_E} \quad (6)$$

$$W_k = \frac{1}{2} (J_M + i^2 J_d) (\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (7)$$

gde je  $\omega_1$  ugaona brzina obrtanja radnog vratila pre početka tehnološke operacije,  $\omega_2$  posle završetka te operacije, a  $\eta_E$  koeficijent korisnog dejstva električne mašine.

Jednačina (7) predstavlja kinetičku energiju predatu inercionim masama pogona za vreme tehnološke operacije.

#### 4. PRORAČUN DINAMIČKOG KOEFICIJENTA

Prema jednačinama (4), (5), (6) i (7), dinamički koeficijent KKD proizvodne mašine iznosi:

$$\eta_d = \frac{\left( \mu - \frac{1}{\eta_p} \right) \left( \eta_p \frac{M_{s0}}{M_{sh}} - 1 \right)}{\eta_p \frac{M_{s0}}{M_{sh}} - \frac{1}{\eta_p}} \quad (8)$$

dok je relativna vrednost srednje vrednosti obrtnog momenta motora:

$$\mu = \frac{iM_y}{M_{sh}} \quad (9)$$

Integracijom jednačina (4) i (5) u granicama ciklusa dobija se:

$$t_c = \frac{1}{\eta_d i M_y} (J_M + i^2 J_d) (\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (10)$$

Potreban nominalni obrtni moment električnog motora u uslovima stabilnosti u ciklusima prema jednačinama (3) i (10) iznosi:

$$\frac{M_y}{M_n} = \frac{1}{s_n} \frac{k_s s_2^2 - s_1^2}{(1 + k_s) s_2 - 2s_1} \approx \frac{k_s}{1 + k_s} \frac{s_1 + s_2}{s_n} \quad (11)$$

Prema metodama u [7,8] u odnosu na uslove dozvoljenog zagrevanja i uz primenu jednačine (5), potrebni nominalni obrtni moment motora se može računati po izvedenoj jednačini (12):

$$M_n = \frac{1}{s_n s_c} \left[ \int_0^{t_{0p}} M_y s dt + \int_0^{t_h} M_y s dt \right] = \frac{\omega_0 (J_M + i^2 J_d)}{2 i s_n t_c \eta_d} (s_2^2 - s_1^2) \quad (12)$$

Zamenom jednačine (11) u (12) dobija se kriterijumska zavisnost:

$$\frac{s_2 + s_1}{s_n} = \sqrt{\frac{2(1+k_s)}{k_s}} \quad (13)$$

Takođe, zamenom jednačine (13) u (3) dobija se:

$$\frac{M_y}{M_n} = \sqrt{\frac{2k_s}{1+k_s}} \quad (14)$$

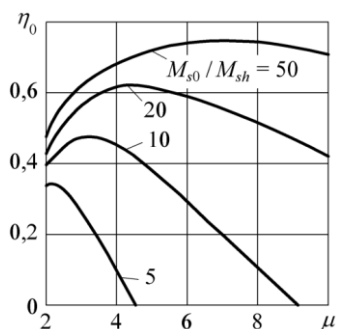
Na osnovu izvedenih jednačina može se zaključiti da dinamički KKD proizvodne mašine sa cikličnim udarnim opterećenjem u potpunosti karakteriše njenu efikasnost i prema tim jednačinama može se smanjiti iznos potrebne snage i obrtnog momenta električne mašine.

Iz uslova  $\partial\eta_d / \partial\mu \approx 0$  prema jednačini (8), za optimalnu vrednost parametra i maksimalnu vrednost dinamičkog KKD mašine može se izabrati:

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{M_{s0}}{M_{sh}}} \quad (15)$$

$$\eta_{d0} = \frac{\eta_p \frac{M_{s0}}{M_{sh}} - 2\sqrt{\frac{M_{s0}}{M_{sh}}} + \frac{1}{\eta_p}}{\eta_p \frac{M_{s0}}{M_{sh}} - \frac{1}{\eta_p}} \quad (16)$$

Na slici 3 zavisnost  $\eta_d(\mu)$  je izračunata prema jednačini (8) za  $\eta_p = 0,9$  za nekoliko vrednosti  $M_{s0} / M_{sh}$ .



Sl. 3. Zavisnost  $\eta_d(\mu)$  izračunata prema jednačini (8)

Iz dobijenog dijagrama je jasno da se maksimalna vrednost dinamičkog KKD pri povećanju snage tehnološkog opterećenja premešta u domen većih vrednosti. Ekstremna vrednost funkcije  $\eta_d(\mu)$  se smanjuje što daje mogućnost da se obezbedi kompromisna vrednost optimum. Opseg promene odnosa  $M_{s0}/M_{sh}$  je zadat prema tehnološkim zahtevima i pri tome se podržana vrednost bliska maksimumu može obezbediti izborom prenosnog odnosa reduktora, momenta inercije zamajca i dimenzija električnog motora. Optimalni prenosni odnos reduktora prema uslovu maksimalnog dinamičkog KKD mašine prema jednačinama (3) i (9) iznosi:

$$i_0 = \sqrt{\frac{1+k_s}{2k_s}} \frac{\sqrt{M_{s0}M_{sh}}}{M_n} \quad (17)$$

Istovremeno za obezbeđenje minimalnih dimenzija električnog motora i minimalne potrebne snage po uslovu  $\eta_d = \eta_{d0}$  važi:

$$i_0 = \sqrt{\frac{1+k_s}{2k_s}} \frac{\sqrt{M_{s0}M_{sh}}}{M_n} \quad (18)$$

Izjednačavanjem jednačina (17) i (18), optimalna vrednost momenta inercije proizvodnog mehanizma je:

$$J_{M0} = \frac{1+k_s}{2k_s} \frac{M_{s0}M_{sh}}{M_n^2} J_d \quad (19)$$

Dakle, optimalne vrednosti prenosnog odnosa reduktora, momenta inercije proizvodnog mehanizma i obrtni moment električnog motora rastu sa povećanjem snage udara opterećenja. Zbog toga je za optimizaciju elektromotornog pogona potrebno usvojiti kompromisno rešenje u odnosu na optimalne parametre i odrediti potrebni obrtni moment motora prema nekoj kompromisnoj vrednosti otpornog momenta mehanizma  $M_{s0k}$ . Ako se usvoji  $\eta_p = 0,9$ , prema jednačini (11) obrtni moment motora je:

$$M_n = \frac{1+k_{sM}}{k_{sM}} \frac{0,9s_n (J_{Mk} + i_k^2 J_d)}{i_k t_c \eta_d} \quad (20)$$

gde su  $i_k$  i  $J_{Mk}$  respektivno:

$$i_k = \sqrt{\frac{1+k_{sk}}{2k_{sk}}} \frac{\sqrt{M_{s0k}M_{sh}}}{M_n} \quad (21)$$

$$J_{Mk} = \frac{1+k_s}{2k_s} \frac{M_{s0k}M_{sh}}{M_n^2} J_d \quad (22)$$

Koeficijent  $k_{sM}$  odgovara vrednosti  $M_{s0} = M_{s0M}$ , a koeficijent  $k_{sk}$  vrednosti  $M_{s0} = M_{s0k}$ .

Zamenom jednačine (21) u (20) konačno se dobija jednačina:

$$M_n = \sqrt{\frac{1,8J_d\omega_0s_n}{t_c\eta_{dM}} \frac{1+k_{sM}}{2k_{sk}}} \sqrt[4]{\frac{1+k_{sk}}{2k_{sk}} M_{s0k}M_{sh}} \quad (23)$$

u kojoj je dinamički koeficijent  $\eta_{dM}$  pri  $M_{s0} = M_{s0M}$ .

## 5. SIMULACIJA DINAMIČKOG STANJA ASINHRONIH MOTORA I REZULTATI

Matematičke relacije (1-23) pokazuju funkcionalne mogućnosti metoda za analizu radnih, električnih i mehaničkih karakteristika elektromotornih pogona sa asinhronim motorima. Sistem prethodno izvedenih jednačina se lako implementira u blokove koje nudi softverski paket MATLAB Simulink [12]. MATLAB simulacija je zamenila nedostajuću laboratorijsku opremu koja je veoma skupa i koju autori nisu mogli koristiti u ovom radu.

Prezentovana metoda i simulacija omogućavaju brzo i kvalitetno rešavanje procesa koji su značajni za električnu opremu. Korišćenjem iskustava u simulaciji procesa u asinhronom motoru se mogu veoma precizno oceniti vrednosti momenata i brzine obrtanja.

Prednosti MATLAB-a su veliki broj mogućih simulacija, a rezultati tih simulacija, oblici i karakteristične vrednosti dobijenih talasnih dijagrama broja obrtaja i momenata potvrđuju uspešnu primenu predloženog metoda.

U tabeli 1 date su vrednosti veličina i parametara iste klase testiranog asinhronog motora tipa „Sever“-Subotica Republika Srbija, pomoću kojih su izračunati ulazni podaci parametara potrebnih za simulaciju u adaptiranom delu softverskog paketa MATLAB-Simulink pod nazivom psbpwmachine.mdl. Na osnovu tih podataka je realizovana simulacija i dobijeni su odzivi za brzine obrtanja i momente.

**Tabela 1.** Vrednosti asinhronih motora "Sever"-Subotica [13]

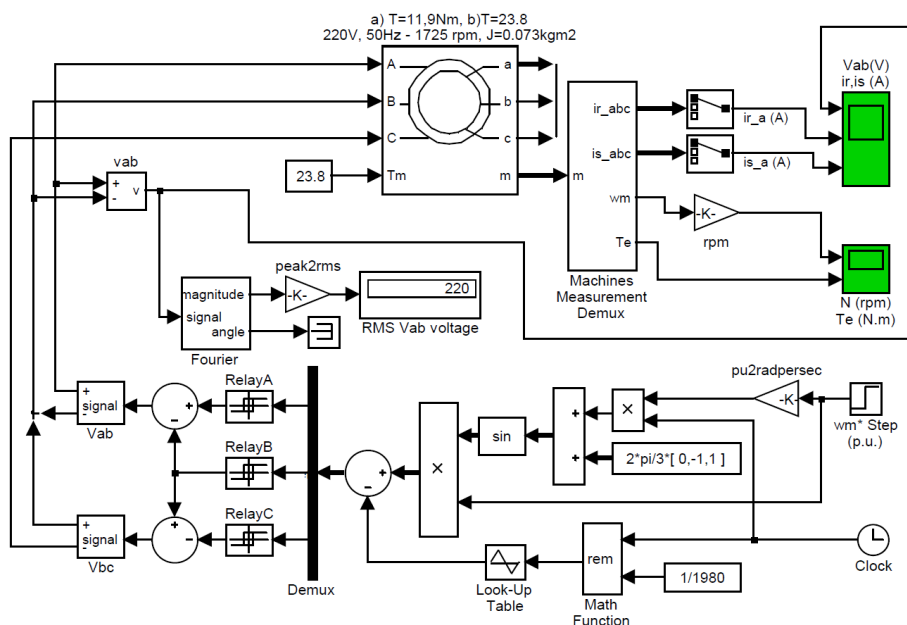
Tip asinhronog motora	Mehanička zaštita: IP 54					Napon: 400 V, 50 Hz,			
	$P_n$ kW	$M_n$ Nm	$n_n$ min <sup>-1</sup>	$J$ kgm <sup>2</sup>	$\mu$ %	$\cos\varphi$	$I_N$ A	$M_1/M_n$	$I_1/I_n$
1. ZK 132 S-4	7.5	25	2860	0.146	84.0	0.90	14.3	3.7	8.5
2. ZK 132 S-4	7.5	12.5	1440	0.073	88.0	0.82	30	3.7	6.8

Tip asinhronog motora	$R_1$	$L_1$	$R_2$	$L_2$	$L_m, L_0$
	$\Omega$	H	$\Omega$	H	H
1. ZK 132 S-4	0.6	$2 \cdot 4.14 \cdot 10^{-3}$	0.53	$4.14 \cdot 10^{-3}$	$168.8 \cdot 10^{-3}$
2. ZK 132 S-4	0.342	$2 \cdot 2.75 \cdot 10^{-3}$	0.217	$2.75 \cdot 10^{-3}$	$112.4 \cdot 10^{-3}$

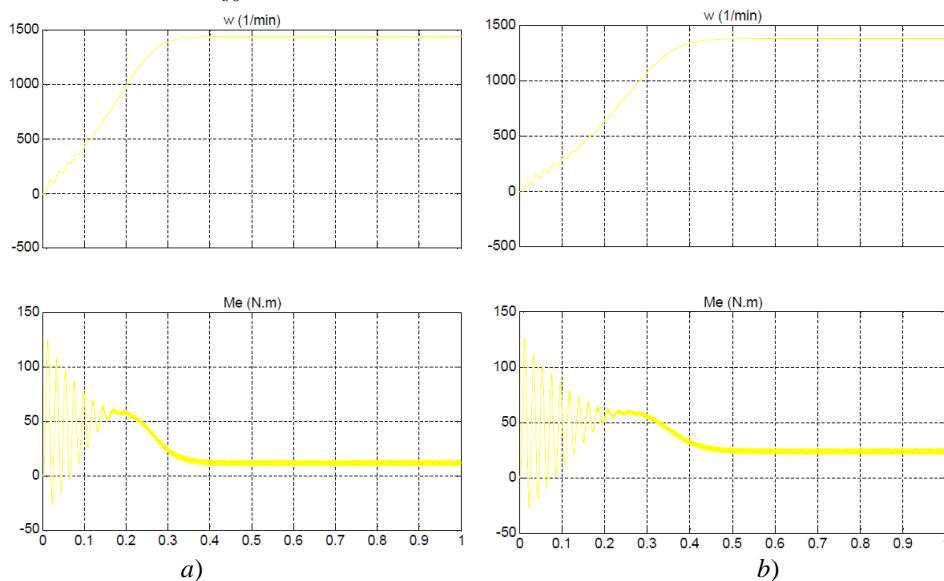
U šemi na slici 4 prikazan je adaptiran model za simulaciju dinamičkog stanja asinhronog motora.

Vremenski oblici momenta i brzine obrtanja za različite vrednosti obrtnog momenta asinhronog motora prikazani su na slici 5.



**Sl. 4.** Adaptirani model *psbpwmachine.mdl* za simulaciju dinamičkog stanja asinhronog motora u softverskom paketu MATLAB-Simulink

Vrednosti koje su korišćene za dobijanje vremenskih oblika momenta i brzine obrtanja u toku zaleta asinhronog motora su:  $M_{s0} = 11,9 \text{ Nm}$ ,  $J = 0,073 \text{ kgm}^2$  (sl. 5.a) i  $M_{s0} = 23,8 \text{ Nm}$ ,  $J = 0,073 \text{ kgm}^2$  (sl. 5.b).



Sl. 5. Vremenski oblici momenta i brzine obrtanja za;

a)  $M_{s0} = 11,9 \text{ Nm}$ ,  $J = 0,073 \text{ kgm}^2$ , b)  $M_{s0} = 23,8 \text{ Nm}$ ,  $J = 0,073 \text{ kgm}^2$

Iz dijagrama na slici 5.a i 5.b zaključuje se kako se odvijao proces u svakom vremenskom trenutku. Vremenski oblik momenta i brzine obrtanja u toku zaleta asinhronog motora odražava se na kolebanje ugaone brzine rotora. Uticaji ove dve vrednosti na rad elektromotornog pogona potvrđeni su u simulaciji u adaptiranom delu softverskog paketa MATLAB-Simulink pod nazivom psbpwmachine.mdl.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan teorijski metod za izračunavanje dinamičkog stanja asinhronih elektromotornih pogona sa datim električnim i mehaničkim veličinama i sa zadatim vrednostima parametara.

Parametri asinhronog elektromotornog pogona značajno zavise od kompromisa i opsega odnosa definisanih prikazanim jednačinama. Proračuni i simulacije na računaru pokazuju da je kod pogona sa asinhronim motorima maksimalna vrednost dinamičkog KKD moguća samo ako je  $(M_{s0} / M_{sh}) > 15$ . Ako se želi da opseg promene tehnoloških opterećenja počne za manje vrednosti ovog količnika, smanjiće se efikasnost motora sa smanjenjem



opterećenja. Zato se pri značajnim promenama opsega tehnoloških opterećenja za dotični razmatrani asinhroni elektromotorni pogon moraju uraditi ili merni eksperiment ili simulacija.

Dijagrami dobijeni simulacijom veličina u softverskom paketu MATLAB-Simulink pokazuju da na veličine koje opisuju prelazni proces u asinhronim motorima imaju uticaj promene vrednosti parametara i to: suprostatavljenog otpornog mehaničkog momenta proizvodne mašine i obrtnog momenta električnog motora i momenta inercije.

## LITERATURA

- [1] S.J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals, Fifth Edition*, McGraw Hill, 2012.
- [2] W.V. Lyon, *Transient Analysis of Alternating Current Machinery*, John Wiley&Sons, Inc. New York, 1954.
- [3] А.И. Вольдек, *Электрические машины*, Ленинградское отделение Энергия, 1974.
- [4] V. Vučković, *General theory of electric machines*, Nauka, Belgrade, 1992, pp. 33-38.
- [5] A.J. Poska, J. Buksnaitis, *Research of cylindrical linear induction motor with unconventionally connected windings*, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 121, 5 (2012) 23-26.
- [6] P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, S. Pekarek, *Analysis of electric machinery and drive systems*, 3rd Edition, IEEE Press/Wiley, 2013.
- [7] N. Marković, *Matrični model elektromagnetskih procesa asinhronne mašine u uslovima izraženih naponskih nesimetrija*, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka Čačak, Univerzitet u Kragujevcu, 2018.
- [8] Z. Bogićević, S. Bjelić, *Električne mašine i uvod u elektromotorne pogone*, VTŠSS Zvečan, 2019, ISBN 978- 86-86727-20-6.
- [9] L. Bergeron, 'Du coup de Belier en hydraulique au coup de foudre en electricite's (Dunod, 1949). (English translation: 'Water Hammer in hydraulics and wave surges in electricity', ASME Committee, Wiley, New York, 1961.).
- [10] A.E. Fitzgerald, C. Kingsley, *Električne mašine za naizmjeničnu i jednosmernu struju*, Naučna knjiga, Beograd, 1962.
- [11] N.A. Marković, S.N. Bjelić, F.N. Marković, *Simulation model of dynamic states in an asynchronous machine with a short-circuited rotor*, 53<sup>rd</sup> International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor, 2022, pp. 231-236.
- [12] MATLAB SIMULINK Sim Power System, Copyright 1984-2002, The Math Works, Version 6.5.0,180913a, June 2, 2000.
- [13] *Low Voltage three-phase Motors Prospects*. [Online]. Available: <http://sever.rs/wp02/>

## 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 rade. 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.

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

**Izvod i ključne 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] www: <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

Zeleni bulevar 35, 19210 Bor

E-mail: [nti@irnbor.co.rs](mailto:nti@irnbor.co.rs) ; [ana.kostov@irnbor.co.rs](mailto:ana.kostov@irnbor.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  
35 Zeleni bulevar, 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**

---

Dušan Tašić, Ivan Jovanović, Katarina Milivojević, Dragan Ignjatović <b>IZRADA GEOTEHNIČKOG I HIDROGEOLOŠKOG MODELA SEKTORA BR. 6 FLOTACIJSKOG JALoviŠTA „VALJA FUNDATA“ U MAJDANPEKU</b> DEVELOPMENT OF A GEOTECHNICAL AND HYDROGEOLOGICAL MODEL ON THE SECTOR 6 OF THE "VALJA FU DATA" FLOTATION TAILING DUMP IN MAJDANPEK .....	
Ivan Jovanović, Dragan Ignjatović, Katarina Milivojević <b>ODREĐIVANJE PARAMETARA SMIČUĆE ČVRSTOĆE NA TRIAKSIJALNIM UREĐAJIMA</b> DETERMINATION OF THE SHEAR STRENGTH PARAMETERS ON TRIAxIAL DEVICES .....	11
Krsta Brčić <b>UNAPREĐENJE ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE U OKOLINI RUDNIKA AUTOMATIZACIJOM MONITORINGA KVALITETA TEKUĆE VODE</b> IMPROVEMENT OF THE ENVIRONMENTAL PROTECTION IN THE MINE AREA BY THE MONITORING AUTOMATIZATION OF THE FLOWING WATER QUALITY .....	23
Viša Tasić, Vladan Kamenović, Bojan Radović, Nikola Mišić, Ivan Zlatković <b>MERENJE KVALITETA VAZDUHA I TERMALNOG KOMFORA U KANCELARIJAMA PRIMENOM LOW-COST SENZORA I MONITORA</b> AIR QUALITY AND THERMAL COMFORT MEASUREMENTS IN THE OFFICES USING THE LOW-COST SENSORS AND MONITORS .....	43
Viša Tasić, Tatjana Apostolovski-Trujić, Bojan Radović, Renata Kovačević, Nevena Ristić, Tamara Urošević, Vladan Kamenović <b>MERENJE KVALITETA VAZDUHA U AGLOMERACIJI BOR U 2022. GODINI U PERIODU REKONSTRUKCIJE TOPIONICE BAKRA U BORU</b> MEASUREMENT OF THE AIR QUALITY IN THE AGGLOMERATION OF BOR IN 2022 DURING THE COPPER SMELTER RECONSTRUCTION IN BOR .....	53
Nenad Marković, Slobodan Bjelić, Filip Marković <b>ANALIZA ASINHRONIH ELEKTROMOTORNIH POGONA ZA INDUSTRIJSKE MAŠINE SA CIKLIČNIM (INTERMITIRANIM) UDARNIM OPTEREĆENJEM</b> ANALYSIS OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRICAL DRIVES FOR THE INDUSTRIAL MACHINES WITH A CYCLIC (INTERMITTENT) ELECTRICAL SHOCK LOAD .....	63

---