

INSTITUT ZA RUDARSTVO I METALURGIJU BOR

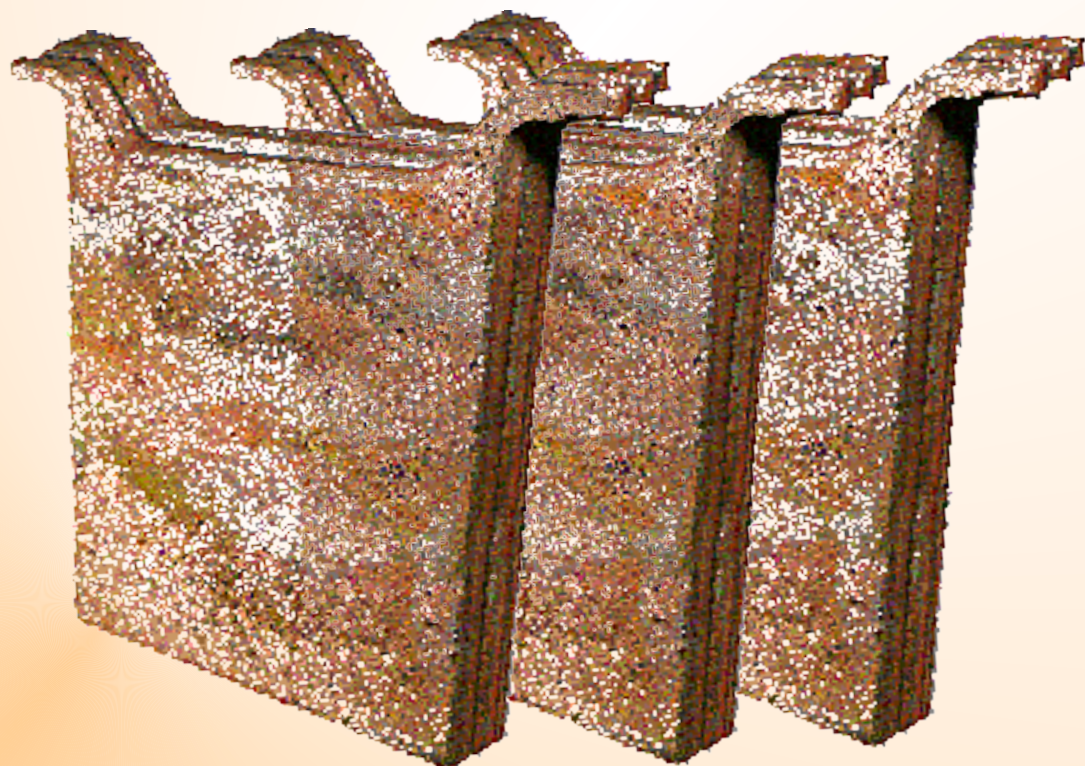


—Cu—

UDC 669.3
ISSN 0351-0212

Broj 2 Volumen 50 2025

BAKAR COPPER



BAKAR

2/2025

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

Izlazi dva puta godišnje još od 1968. godine.

Glavni urednik

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

Zamenik glavnog urednika

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

Urednik

Dr Vesna Marjanović, *naučni saradnik*

Prevodilac

Nevenka Vukašinović, *prof.*

Tehnički urednik

Suzana Cvetković, *teh.*

Priprema za štampu

Vesna Simić, *teh.*

Štampa

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

Tiraž: 30 primeraka

Internet adresa

www.imbor.co.rs

Izdavanje časopisa finansijski podržavaju

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

ISSN 0351-0212

Indeksiranje časopisa u SCIndeksu i u ISI.

Izdavač

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

Sva prava zadržana.

Članovi uredništva

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

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

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

Muntean Comelia, redovni profesor
Politehnički univerzitet u Temišvaru, Rumunija

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

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

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

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

Editor-in-Chief

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

Co-Editor

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

Editor

Ph.D. Vesna Marjanović, *research associate*

English Translation

Nevenka Vukašinović

Technical Editor

Suzana Cvetković

Preprinting

Vesna Simić

Printed in

Mining and Metallurgy Institute Bor

Circulation: 30 copies

Web site

www.irmbor.co.rs

COPPER is financially supported by

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

ISSN 0351-0212

Journal indexing in SCIndex and ISI.

Published by

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

All rights reserved.

Members of the Editorial Board

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

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

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

Muntean Cornelia, full professor
Polytechnic University of Timisoara, Romania

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

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

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

UDK: 622.271.3(045)=163.41
DOI: 10.5937/bakar2502001M
NAUČNI RAD
Oblast: Geotehnika

Primljen: 01.12.2025.
Prerađen: 03.12.2025.
Prihvaćen: 12.12.2025.

INŽENJERSKOGEOLOŠKI USLOVI I ANALIZA
STABILNOSTI JUŽNE KOSINE CENTRALNOG POLJA
POVRŠINSKOG KOPA „GACKO“

ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS AND
STABILITY ANALYSIS OF THE SOUTHERN SLOPE OF
THE CENTRAL FIELD OF THE "GACKO" OPEN-PIT MINE

Katarina Milivojević^{1a}, Mladen Supić^{1b}, Dragan Ignjatović^{1c}, Dušan Tašić^{1d}

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

^{1a} E-mail: katarina.milivojevic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-1306-4044>

^{1b} E-mail: mladjen.supic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0534-610X>

^{1c} E-mail: dragan.ignjatovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2333-6853>

^{1d} E-mail: dusan.tasic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8005-9640>

Izvod

Južna kosina površinskog kopa „Gacko“ pokazuje izraženu nestabilnost nakon zemljotresa i velikog prodora vode tokom 2022. godine, što je dovelo do deformacija terena i prekida eksploatacije. Cilj rada je da se, na osnovu inženjerskogeoloških, geofizičkih, hidrogeoloških i laboratorijskih istraživanja, sagleda građa i ponašanje kosine, identifikuju ključni mehanizmi nestabilnosti i definišu osnovne mere sanacije. Izdvojeno je jedanaest inženjerskogeoloških jedinica različitih svojstava, među kojima su posebno nepovoljne zone sa plastičnim glinama i degradiranim laporcima, kao i predisponirana klizna ravan na kontaktu jedinice ¹N i krečnjaka ²K₂. Geodetska merenja potvrđuju kontinuirana pomeranja. Rezultati omogućavaju pouzdano sagledavanje procesa nestabilnosti i definisanje sanacionih rešenja neophodnih za bezbedno vođenje eksploatacije.

Ključne reči: stabilnost kosina, klizna ravan, gline, laporci, geodinamički procesi, sanacija

Abstract

The southern slope of the Gacko open-pit mine shows pronounced instability after an earthquake and a large water intrusion during 2022, which led to terrain deformations and interruption of exploitation. The aim of the work is to, based on engineering geological, geophysical, hydrogeological and laboratory research, examine the structure and behavior of the slope, identify key instability mechanisms and define basic remediation measures. Eleven engineering geological units of different properties were identified, including particularly unfavorable zones with plastic clays and degraded marls, as well as a predisposed slip plane at the contact of unit ¹N and limestone ²K₂. Geodetic measurements confirm continuous movements. The results allow for a reliable understanding of the instability process and the definition of remediation solutions necessary for safe exploitation.

Keywords: slope stability, slip plane, clays, marls, geodynamic processes, rehabilitation

1. UVOD

Centralno polje rudnika uglja „Gacko“ predstavlja glavnu eksploatacionu zonu iz koje se termoelektrana „Gacko“ snabdeva ugljem. Tokom 2022. godine na području kopa dogodila su se dva ključna događaja koja su značajno uticala na stabilnost terena i kontinuitet eksploatacije: zemljotres u aprilu i veliki prodor vode u decembru iste godine. Kao posledica ovih procesa došlo je do pokretanja ukupne mase materijala iz unutrašnjeg odlagališta polja „C“ i formiranja akumulacije koja je prekrila etažu sa koje je izvođena eksploatacija. Od tada eksploatacija uglja nije obnovljena u punom kapacitetu. [1-4] Razmatrajući mogućnost nastavka proizvodnje neophodno je definisati uslove pod kojima bi eksploatacija mogla da se izvodi na održiv i bezbedan način. I nakon saniranja posledica događaja iz 2022. godine, kao dominantan geotehnički problem u Centralnom polju ostaje stabilnost Južne kosine [5-7].

Južna kosina se sastoji od više radnih rudarskih etaža formiranih u neogenim sedimentima, prvenstveno ugljevima, laporcima i glinama složene i promenljive prostorne distribucije (slika 1). Ona predstavlja južnu granicu Centralnog polja. U toku njenog formiranja nisu u potpunosti ispoštovani projektovani nagibi, visine i uglovi, što je nepovoljno uticalo na stabilnost. Dodatno, na kosinu se neposredno naslanja spoljašnje odlagalište, čija masa dovodi do istiskivanja slabonosivih sedimenata i daljeg pogoršanja stabilnosti.



Sl. 1. Južna kosina Centralnog polja površinskog kopa „Gacko“

Složena geološka i inženjerskogeološka građa, česte glinovite serije, prisustvo potencijalnih kliznih ravni i nestabilnih blokova, u kombinaciji sa nepravilnim zasecanjem terena i nedovoljnim održavanjem etaža, rezultirali su

značajnim pomeranjima masa i gubitkom stabilnosti radnog prostora. Geodetska služba Rudnika i Termoelektrane „Gacko“ u periodu mart–april 2024. godine registrovala je pomeranja površinskih repera i veća od 3 metra. Pomeranja se odvijaju kontinuirano i promenljivom dinamikom kroz duži period, a pravac kretanja je jug–sever, odnosno od južnog oboda kosine prema Centralnom polju. Ovi podaci jasno ukazuju da su geodinamički procesi i dalje aktivni i da trenutno stanje kosine ne obezbeđuje potrebnu stabilnost za bezbedno vođenje eksploatacije. Zbog toga je neophodno detaljno analizirati inženjerskogeološke uslove Južne kosine i proceniti mogućnosti i mere njenog stabilisanja.

2. INŽENJERSKOGEOLOŠKE KARAKTERISTIKE

Na osnovu terenskog inženjerskogeološkog kartiranja, kartiranja jezgra četiri istražne bušotine i laboratorijskih ispitivanja, definisane su inženjerskogeološke jedinice koje grade Južnu kosinu. U pogledu stabilnosti, najvažniji su njihovi litološki sastav, prostorni položaj, debljina i ponašanje u kontaktima. Iako u profilu Južne kosine postoji više jedinica, stabilnost određuju pre svega one koje sadrže glinu, degradirane laporce ili nepovoljne dubinske kontakte. U nastavku su predstavljene samo ključne jedinice, organizovane tako da bude jasno kakvu ulogu svaka ima u stabilnosti [5-7].

2.1. Površinske jedinice koje neposredno utiču na formiranje klizne ravni

Tt - Tehnogeni material - Ovu jedinicu čini humus i laporovita jalovina deponovana tokom prethodne eksploatacije. Materijal je porozan, slabo konsolidovan i vodozasićen, a u njemu se odvija aktivan proces tečenja. Zbog znatne količine i blizine kosini, Tt menja naponska stanja podloške i predstavlja nepovoljnu zonu koja dodatno utiče na deformisanje slabijih sedimenata ispod nje.

⁸N-peskoviti laporci i gline (najrasprostranjenija jedinica)- Ova jedinica čini glavni radni prostor kosine. Sastoji se od peskovitih laporaca i glina različite konzistencije i moćnosti.

Ključne osobine:

- Smenjivanje laporaca i glina je nepravilno, horizontalno do subhorizontalno,
- Gline imaju plastičnu konzistenciju i slaba mehanička svojstva,
- Formira se sistem vertikalnih pukotina zatezanja i subhorizontalnih pukotina uslojavanja.

Zbog toga se jedinica ⁸N ponaša kao površinska zona u kojoj nastaju pukotine, odvajanje blokova i lokalna pomeranja, što je najčešći vid nestabilnosti na etažama.

⁷N - tufitični laporci i visokoplastične gline - Jedinica ⁷N se odlikuje nepravilnim smenjivanjem degradiranih laporaca i vrlo mekih, visokoplastičnih glina. Ove gline:

- Imaju izrazito slaba nosiva svojstva,
- Lako se rasipaju kada su vlažne,
- Na kontaktima sa laporcima nastaju uglačane površine i lokalne klizne ravni.

Jedinica ⁷N je jedna od ključnih površinskih slabosti, jer omogućava razvoj plitkih, ali vrlo aktivnih procesa klizanja, posebno gde se voda zadržava na etažama.

2.2 Srednje duboke jedinice koje mogu lokalno doprineti klizanju

⁶N - ugalj sa laporcima i glinama - Ovaj kompleks čini glavni ugljeni sloj. Ugalj je često ispucao, a pukotine su zapunjene glinovitim materijalom. Na kontaktima različitih litoloških članova javljaju se subhorizontalne i strme pukotine, što lokalno može predstavljati ravni smicanja. Međutim, generalni pravac pada slojeva ka jugoistoku – od kosine – daje ovoj jedinici u proseku povoljniji uticaj na globalnu stabilnost. Lokalno, tamo gde je jedinica blizu površine, moguća su manja pomeranja.

⁴N, ⁵N - kompaktni laporci - Ove jedinice su male moćnosti, povoljnijih mehaničkih osobina i nemaju presudan uticaj na stabilnost. Njihov značaj je sekundaran i svodi se na povremenu pojavu pukotina ili lokalnu degradaciju.

2.3 Dubinske jedinice koje kontrolišu globalnu stabilnost

³N - visokoplastične gline i glinoviti laporci

Iako se jedinica ³N nalazi ispod podinskog ugljenog sloja, njen značaj za stabilnost ogleda se u tome što na pojedinim lokacijama formira kontakt sa krečnjakom, koji predstavlja zonu prelaza između stabilne podloge i kretanja iznad nje. Na tim mestima je zabeleženo blokovsko pomeranje, što ukazuje da jedinica ³N može imati ulogu u prenosu klizanja sa viših nivoa.

¹N - sivozelene i zelene gline sa laporcima (ključna jedinica za stabilnost) - ovo je najkritičnija jedinica Južne kosine. Uočene karakteristike:

- Tvrdе gline sa karbonatnim konkcijama,
- Uklopци krečnjaka (tragovi otkidanja podloge),
- Laporci koji su mestimično polomljeni ili zdrobljeni,
- Gotovo u svim bušotinama zabeležene su pukotine sa jasnim tragovima smicanja.

Na kontaktu između jedinice ¹N i krečnjačke podloge (²K₂) nalazi se glavna predisponirana klizna ravan Južne kosine. U toj zoni su registrovane uglačane površine strmog (~70°) padnog ugla, deformacije, tragovi kretanja i

prisustvo komada krečnjaka koji potiču iz podloge. Ovaj kontakt predstavlja dubinsku kontrolu stabilnosti i ključni element u svim analizama klizanja.

2K_2 - krečnjak- Krečnjak je čvrst, kompaktan i povoljan materijal, ali je na kontaktu sa jedinicom 1N tektonski oslabljen pukotinama i smičnim površinama. On je donja granica globalnog klizanja, odnosno podloga duž koje se prenose pomeranja svih nadležnih jedinica.

Posmatrano u celini, stabilnost Južne kosine određena je međudejstvom površinskih, srednje dubokih i dubinskih inženjerskogeoloških jedinica, pri čemu svaka ima specifičnu ulogu u formiranju kliznih ravni i zonama deformacija. Površinske jedinice Tt, 8N i 7N predstavljaju najaktivnije nestabilne zone u kojima se, usled smenjivanja laporaca i glina, zadržavanja vode, pojave pukotina i degradiranog materijala, razvijaju plitka klizanja i odvajanje blokova. Srednje duboke jedinice, pre svega kompleks 6N i delovi 3N , lokalno doprinose nestabilnosti tamo gde se približavaju površini terena, ali ne kontrolišu globalno ponašanje kosine. Ključnu ulogu u dubinskoj stabilnosti ima jedinica 1N , u kojoj su registrovani jasni tragovi smicanja i tektonski oslabljen kontakt sa krečnjakom 2K_2 . Upravo na tom kontaktu formirana je glavna predisponirana klizna ravan duž koje se odvija sporo, ali kontinuirano kretanje blokovskih masa ka Centralnom polju. Ovakva inženjerskogeološka građa ukazuje da je Južna kosina složen geodinamički sistem u kome se istovremeno razvijaju plitke i dubinske forme nestabilnosti, a ukupna stabilnost u najvećoj meri zavisi od ponašanja jedinice 1N i njenog kontakta sa krečnjačkom podlogom.

3. UTICAJ HIDROGEOLOŠKIH USLOVA NA STABILNOST

Hidrogeološki uslovi imaju presudan značaj za stabilnost Južne kosine, jer prisustvo vode direktno utiče na smičuću čvrstoću neogenih laporaca, glina i ugljeva. U površinskim jedinicama (7N i 8N) lako dolazi do zasićenja glinovitih članova, povećanja pornog pritiska i gubitka čvrstoće, što pogoduje formiranju plitkih klizanja i odvajanja blokova. Poseban rizik predstavljaju litološki kontakti materijala različite propustljivosti, naročito na prelazima laporci–gline, gde voda najbrže destabilizuje teren.

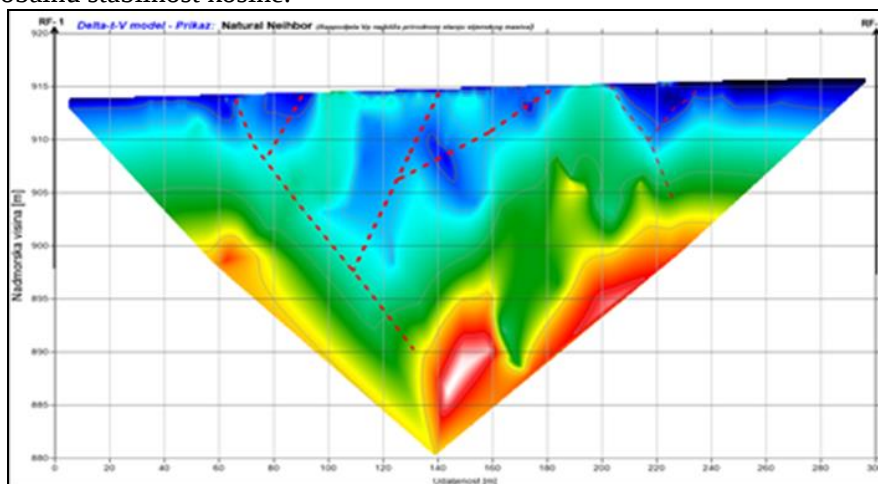
Ključni dubinski destabilizacioni faktor je kontakt jedinice 1N (gline i laporci) sa krečnjačkom podlogom 2K_2 , koji predstavlja glavni klizni nivo Južne kosine. Akumulacija vode u ovoj zoni smanjuje efektivni napon, ubrzava spor pokret blokova i utiče na globalnu stabilnost kosine, naročito kada se voda dovodi pukotinama u krečnjaku ili glinovitim ispunama.

Neadekvatna drenaža površinskih voda dodatno povećava rizik, jer infiltracija kroz površinske slojeve doprinosi porastu pornih pritisaka na kritičnim dubinama. Kako na lokalitetu ne postoji aktivna pijezometarska mreža, promene režima podzemnih voda nisu praćene, što otežava blagovremeno prepoznavanje

nepovoljnih procesa. Efikasno upravljanje površinskim i podzemnim vodama, uključujući drenažu i osmatranje nivoa podzemnih voda, predstavlja osnovnu meru za dugoročno očuvanje stabilnosti Južne kosine.

4. GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA

Radi procene stanja stenskog masiva i identifikovanja potencijalnih nestabilnih zona, tokom jula 2024. urađen je refrakciono-seizmički profil RF-1. Analiza interpretacije (slika 2) jasno ukazuje na zone značajne degradacije u kojima su brzine P-talasa izrazito snižene, što odgovara slabo vezanim, glinovito-prašinstim i laporovitim materijalima. Posebno je kritična duboka anomalija u centralnom delu profila, koja se proteže do približno kote 900 m n.v. i ukazuje na dubinski poremećen masiv koji može imati presudan uticaj na globalnu stabilnost kosine.



Sl. 2. Interpretacija profila RF-1

Pored toga, seizmika je potvrdila postojanje bliskopovršinskih zona vrlo niskih brzina, koje predstavljaju mesta intenzivne degradacije i potencijalne ravni odvajanja blokova na radnim etažama. U kombinaciji sa terenskim uvidima o blokovskim pomeranjima i geodetskim podacima, pokazuje se da identifikovane anomalije direktno kontrolišu aktivne klizne procese i smer kretanja materijala prema Centralnom polju [1,2].

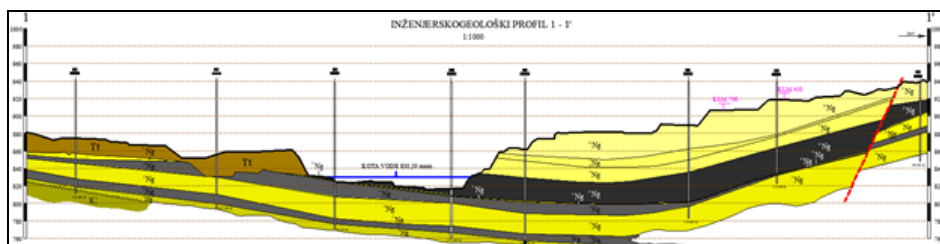
5. ANALIZA STABILNOSTI KARAKTERISTIČNIH PROFILA

U okviru periodičnih šestomesečnih elaborata o stanju stabilnosti radnih i završnih kosina površinskog kopa „Gacko“ redovno se vrši provera stabilnosti Južne kosine. Za potrebe analize izrađena su dva inženjerskogeološka profila, 1-

1' i 77-77', koji predstavljaju karakteristične preseke kosine. Proračun stabilnosti je izvršen pomoću softverskog paketa *Rocscience*, odnosno njegovim alatom *Slide* koji se bazira na uslovima granične ravnoteže [8-10]. Proračuni su sprovedeni metodama *Bishop*, *Janbu* i *Morgenstern-Price* za proizvoljne klizne površine. Uticaj podzemene vode modeliran je koeficijentom pornog pritiska za vrednosti $r_u=0,0$, $r_u=0,2$, i $r_u=0,4$. Program omogućava automatsko traženje kritične klizne ravni sa minimalnim faktorom sigurnosti.

5.1 Inženjerskogološki profil 1-1'

Za potrebe izrade Elaborata o stabilnosti kosina (2024. godine) na trasi inženjerskogološkog profila 1-1' uzeta su tri uzorka na kojima su sprovedena geomehnička ispitivanja. Inženjerskogološki profil koji je korišćen kao osnova za analizu koeficijenta sigurnosti prikazan je na slici 3.



Sl. 3. Inženjerskogološki profil na kojem je vršena analiza stabilnosti radnih i završne kosine 1

Na osnovu inženjerskogološkog profila 1-1' u polju „C“ izvršena je analiza stabilnosti radnih i završnih kosina primenom prethodno navedenih numeričkih metoda. Dobijeni koeficijenti sigurnosti prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Vrednosti koeficijenta sigurnosti za profil 1-1'

Profil	Numeričke metode	Koeficijent sigurnosti F_s		
		Koeficijent pornog pritiska		
		$r_u = 0,0$	$r_u = 0,2$	$r_u = 0,4$
1-1'	Bishop	1,528	1,291	1,103
	Janbu	1,474	1,249	1,048
	Morgenstern-Price	1,756	1,458	1,138

U skladu sa Pravilnikom o izvođenju rudarskih površinskih radova (Službeni glasnik Republike Srpske, broj 7/2014), koeficijent stabilnosti radnih kosina mora biti $F_s \geq 1,20$ [4].

Analiza stabilnosti kosina na profilu 1-1' pokazuje da svi proračuni izvedeni metodama Bishop, Janbu i Morgenstern-Price zadovoljavaju propisani uslov stabilnosti pri koeficijentima pornog pritiska $ru = 0,0$ i $ru = 0,2$. Međutim, pri povećanom vrednovanju ovodnjenosti ($ru = 0,4$) nijedna od korišćenih numeričkih metoda ne ispunjava zakonski zahtev, što ukazuje da kosina ulazi u zonu nedovoljne stabilnosti pri višim nivoima zasićenja i povećanom pornom pritisku.

Na terenu su lokalno uočena odvajanja blokova laporovitog materijala, što predstavlja neposredan rizik za rad mehanizacije, posebno rotorne bagere, zbog mogućnosti oštećenja rotirajućeg radnog organa. Pored toga, prisustvo nekontrolisanih voda koje izvire i zadržavaju se na etažama dodatno utiče na degradaciju radnih površina i smanjenje njihove nosivosti.

Ovi nalazi ukazuju da je, uz zadovoljavajuće vrednosti faktora sigurnosti u uslovima niske i umerene ovodnjenosti, potrebno posvetiti posebnu pažnju kontroli i odvođenju površinskih i podzemnih voda, kao i uklanjanju nestabilnih blokova, kako bi se sprečilo narušavanje stabilnosti kosine pri promeni hidrogeoloških uslova (slika 4).



Sl. 4. Pojava voda - koje teku ili se zadržavaju nekontrolisano, samim tim oštećuju etaže i smanjuju stabilnost istih (2024. godine)

S obzirom na složenu inženjerskogeološku građu, nepovoljne geotehničke uslove i nepoštovanje projektovane geometrije kosine, na području polja „C“ razvili su se brojni geodinamički procesi, uključujući formiranje klizišta, rasednih zona, pukotina smicanja, zona kidanja i obrušavanja blokova. Ove pojave direktno ugrožavaju kontinuitet proizvodnje i zahtevaju detaljnu analizu i planiranje adekvatnih sanacionih postupaka.

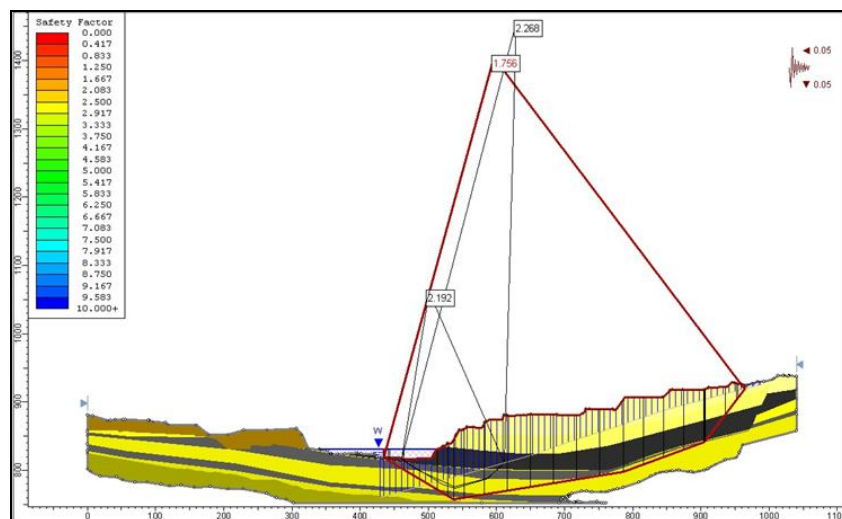


Sl. 5. Pukotine na etaži - potencijalne klizne ravni (2024. godine)

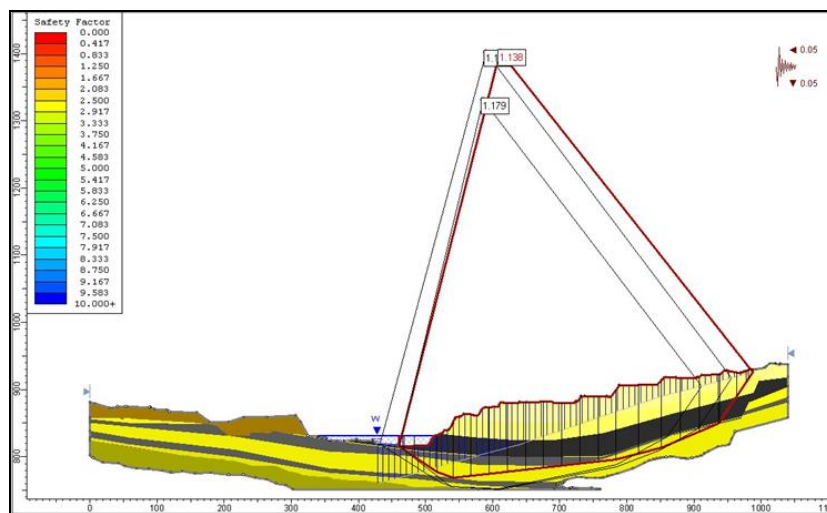
Na slici 5 prikazan je razvijen pukotinski sistem duž radne etaže. Ovakvi sistemi pukotina predstavljaju predisponirane ravni klizanja po kojima se odvijaju blokovska pomeranja, a njihov razvoj povezan je sa razlikama u čvrstoći i deformabilnosti laporovitih i glinovitih članova.

Sanacija bi trebalo da se zasniva na smanjenju nagiba etažanih kosina u zonama povećanog rizika, formiranju obodnih kanala i obezbeđivanju usmerenog odvođenja površinskih i podzemnih voda ka odgovarajućim drenaznim sistemima. Posebnu pažnju neophodno je posvetiti održavanju prohodnosti etažnih puteva kako bi se obezbedilo bezbedno kretanje mehanizacije i radnog osoblja.

U okviru numeričke analize stabilnosti profila 1-1' sprovedeni su proračuni prema metodama Bishop, Janbu i Morgenstern–Price, kao i za više nivoa pronađenog pritiska ($ru = 0,0$, $ru = 0,2$ i $ru = 0,4$). Međutim, za potrebe grafičkog prikaza u radu odabrani su rezultati **samo po metodi Morgenstern–Price i samo za koeficijente ovodnjenosti $ru = 0,0$ i $ru = 0,4$** , slike 6 i 7.



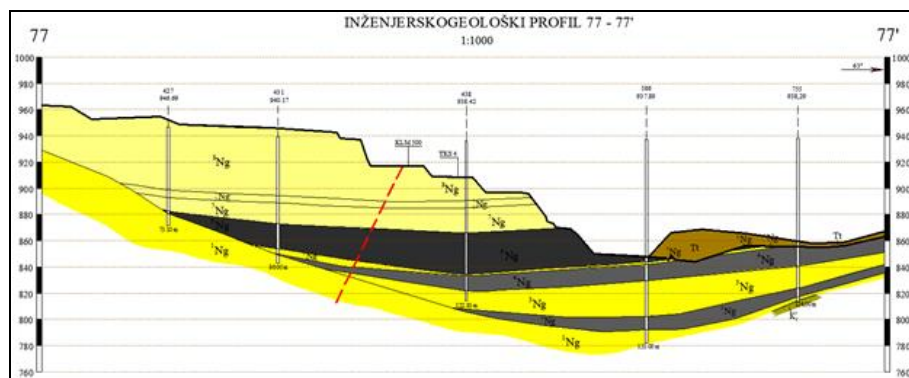
SI. 6. Analiza stabilnosti kosina profila 1-1' po numeričkoj metodi Morgenstern-Price



SI. 7. Analiza stabilnosti kosina profila 1-1' po numeričkoj metodi Morgenstern-Price

5.2 Inženjerskogeološki profil 77-77'

Na trasi inženjerskogeološkog profila 77-77' uzeta su tri uzorka na kojima su sprovedena geomehnička ispitivanja. Inženjerskogeološki profil korišćen za analizu koeficijenta sigurnosti prikazan je na slici 8.



Sl. 8. Inženjerskogeološki profil na kojem je vršena analiza stabilnosti radnih kosina i završne kosine

Na osnovu inženjerskogeološkog profila 77-77' u polju „C“ izvršena je analiza stabilnosti radnih i završnih kosina primenom ranije navedenih numeričkih metoda. Dobijeni koeficijenti sigurnosti predstavljeni su u tabeli 2.

Tabela 2. Vrednosti koeficijenta sigurnosti za profil 77-77'

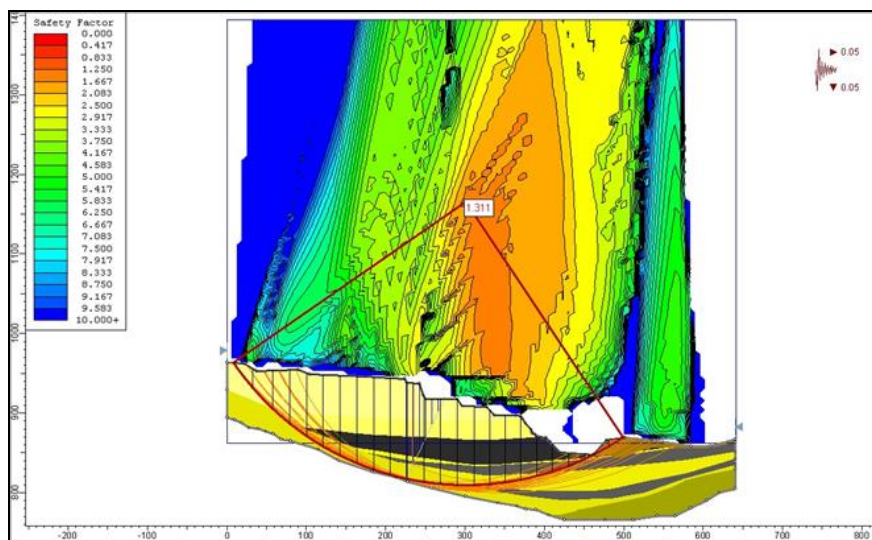
Profil	Numeričke metode	Koeficijent sigurnosti F_s		
		Koeficijent pornog pritiska		
		$r_u = 0,0$	$r_u = 0,2$	$r_u = 0,4$
77-77'	Bishop	1,294	1,074	0,857
	Janbu	1,188	0,988	0,791
	Morgenstern-Price	1,311	1,092	0,878

Rezultati analize stabilnosti profila 77-77' pokazuju da zahtevani faktor sigurnosti zadovoljavaju samo proračuni pri suvim uslovima ($r_u = 0,0$) i to za metode Bishop i Morgenstern-Price. Pri povećanim vrednostima pornog pritiska ($r_u = 0,2$ i $r_u = 0,4$) nijedna od primenjenih numeričkih metoda ne ispunjava zakonski uslov stabilnosti. Ovakvi rezultati ukazuju da bi, u slučaju srednje ili potpune ovodnjenosti, sistem kosina i radnih etaža bio zahvaćen procesom klizanja, što bi direktno ugrozilo stabilnost i funkcionalnost Centralnog polja.

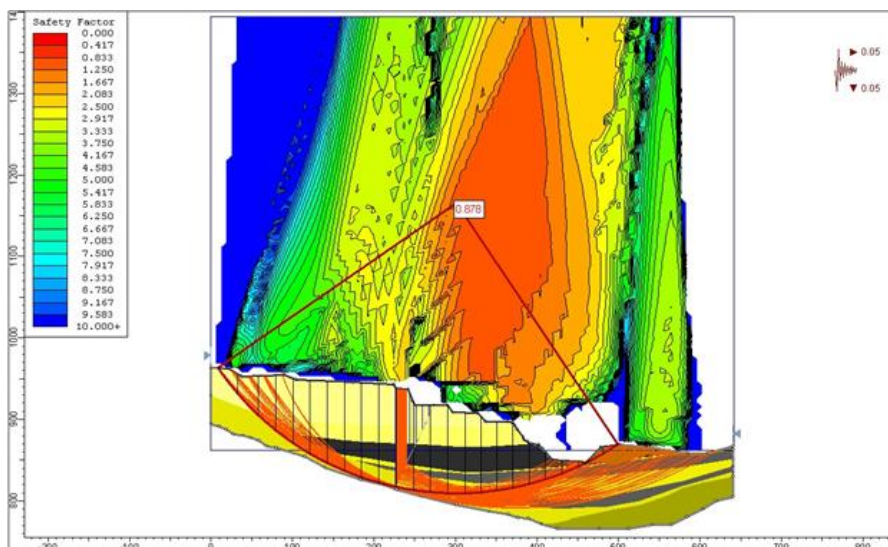
Kao i za profil 1-1' i na osnovu rezultata proračuna stabilnosti na profilu 77-77' kompletna Južna kosina se može smatrati nestabilnom, te se u postojećim uslovima ne preporučuje obavljanje rudarskih aktivnosti [7].

Analize stabilnosti kosina profila 77-77' izvedene su za sve vrednosti pornog pritiska i primenom sve tri numeričke metode korišćene u radu (Bishop, Janbu i Morgenstern-Price). Međutim, zbog velikog broja grafičkih rezultata i njihove međusobne sličnosti, u radu su prikazane samo one analize koje jasno

ukazuju na nepovoljna stanja stabilnosti, odnosno analize koje daju faktore sigurnosti ispod propisanog minimuma, slike 9 i 10.



Sl. 9. Analiza stabilnosti kosina profila 77-77' po numeričkoj metodi Morgenstern-Price pri pornom pritisku $ru=0,0$. $Fs=1,311$



Sl. 10. Analiza stabilnosti kosina profila 77-77' po numeričkoj metodi Morgenstern-Price pri pornom pritisku $ru=0,4$. $Fs=0,878$

6. PREDLOZI MERA SANACIJE

U cilju procene stabilnosti Južne kosine Centralnog polja identifikovane su ključne pojave i procesi koji direktno ugrožavaju bezbednost i kontinuitet eksploatacije. Na terenu su registrovani strukturni, geodinamički i hidrološki faktori nestabilnosti, među kojima se izdvajaju rasedne zone, razvijeni pukotinski sistemi, blokovska pomeranja, klizišta i zadržavanje vode na etažama.

Rasedne i pukotinske zone predstavljaju predisponirane ravni klizanja po kojima dolazi do odvajanja blokova i njihovog obrušavanja. Ove zone ukazuju na izraženu strukturnu degradaciju terena i zahtevaju blagovremeno uklanjanje nestabilnih blokova i zapunjavanje pukotina.

Od geodinamičkih procesa najizraženiji su kidanje blokova, rotaciono i translaciono klizanje, kao i aktiviranje lokalnih klizišta. Klizišta se najčešće razvijaju na kontaktima neogenih sedimenata i odlaganog materijala, pri čemu se pokreće veća količina materijala koja može ugroziti radnu sredinu i opremu.

Hidrogeološke pojave takođe imaju značajan uticaj na stabilnost. Proceđivanje i zadržavanje vode na etažama dovode do smanjenja čvrstoće materijala, gubitka nosivosti podloge i ubrzanog razvoja kliznih procesa. Ne-funkcionalna kanalizaciona mreža dodatno pogoršava stanje, posebno na mestima gde je koncentrisana radna mehanizacija.

Na osnovu identifikovanih pojava procenjuje se da je Južna kosina u postojećim uslovima nestabilna i da bi nastavak eksploatacije mogao dovesti do pokretanja većih masa i ozbiljnog ugrožavanja bezbednosti radnika i opreme.

U cilju stabilizacije terena preporučuju se sledeće mere sanacije [7]:

- Ublažavanje nagiba kosina i rasterećenje vršnih zona,
- Uspostavljanje funkcionalne mreže obodnih i etažnih kanala za usmeravanje i odvođenje voda,
- Uklanjanje nestabilnih blokova i zapunjavanje rasednih i pukotinskih zona,
- Redovno održavanje etaža sa obaveznim padom ka vodosabirniku,
- Proširenje mreže geodetskih repa za praćenje površinskih pomeranja,
- Uvođenje pijezometara i inklinometara za praćenje režima podzemnih voda i dubinskih pomeranja.

Sve navedene aktivnosti trebalo bi da budu obuhvaćene jedinstvenim projektom sanacije Južne kosine, kojim bi se definisali uslovi za eventualni nastavak bezbedne i održive eksploatacije.

7. ZAKLJUČAK

Istraživanja sprovedena na Južnoj kosini Centralnog polja obuhvatila su geološku i geomehaničku karakterizaciju terena, refrakciono-seizmička ispitivanja i numeričke analize stabilnosti za različite uslove ovodnjenosti. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da složena inženjerskogeološka građa, prisutni strukturni kontakti, degradirane zone u masivu i nepovoljni hidrološki uslovi imaju dominantan uticaj na stabilnost kosine.

Analize stabilnosti na profilima 1-1' i 77-77' pokazale su da su kosine stabilne samo u uslovima minimalne ovodnjenosti ($r_u = 0,0$), dok pri povećanom pornom pritisku dolazi do značajnog smanjenja faktora sigurnosti, a u više slučajeva i do njegovog pada ispod propisanih graničnih vrednosti. Ovakvi rezultati ukazuju da prisustvo podzemnih i površinskih voda predstavlja jedan od ključnih faktora rizika koji može aktivirati klizišta, blokovska pomeranja i druge geodinamičke procese.

Teren Južne kosine odlikuje se razvijenim pukotinskim i rasednim sistemima, lokalnim i dubinskim kliznim ravnicama, kao i čestim pojavama kidanja i obrušavanja blokova. Ove pojave, zajedno sa uočenim hidrogeološkim problemima i neuređenom drenažom, potvrđuju da je kosina u postojećem stanju nestabilna i da bi nastavak eksploatacije mogao dovesti do ozbiljnog ugrožavanja ljudstva i opreme.

Na osnovu svega sprovedenog, zaključuje se da je neophodno izraditi jedinstven projekat sanacije Južne kosine, koji bi obuhvatio izmene geometrije kosina, regulaciju površinskih i podzemnih voda, sanaciju strukturnih i geodinamičkih zona, kao i uspostavljanje sveobuhvatnog sistema monitoringa. Tek nakon primene adekvatnih sanacionih mera i održivog praćenja stanja moći će da se razmatra nastavak bezbedne eksploatacije na ovom području.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] Arsenović, S. (2023). Izvještaj geofizičkih seizmičko-seizmoloških istraživanja u zoni eksploatacionog polja površinskog kopa „Gacko“. CTU-IPKIN d.o.o. Bijeljina, MH „ERS“ MP a.d. Trebinje, ZP „RiTE Gacko“ a.d. Gacko.
- [2] Arsenović, S. (2024). Izvještaj rezultata geofizičkih ispitivanja primjenom refrakcione seizmike za potrebe analize stabilnosti radnih i završnih kosina na površinskom kopu „Gacko“ – Južna kosina. CTU-IPKIN d.o.o. Bijeljina.
- [3] Pavlović, M. (2023). Elaborat o ispitivanju stabilnosti radnih i završnih kosina i odlagališta na površinskom kopu „Gacko“ i površinskom kopu krečnjaka „Ponikve“. MH „ERS“ MP a.d. Trebinje, ZP „RiTE Gacko“ a.d. Gacko, IRM Bor d.o.o. Zvornik.
- [4] Pravilnik o izvođenju rudarskih površinskih radova. Službeni glasnik Republike Srpske, broj 7/2014.
- [5] Supić, M. (2024). Elaborat o ispitivanju stabilnosti radnih i završnih kosina i odlagališta na površinskom kopu „Gacko“ i površinskom kopu krečnjaka „Ponikve“. MH „ERS“ MP a.d. Trebinje, ZP „RiTE Gacko“ a.d. Gacko, IRM Bor d.o.o. Zvornik.
- [6] Vasilčić, M. (2020). Elaborat o izvedenim geomehaničkim istraživanjima južnog i jugoistočnog oboda centralne eksploatacione zone površinskog kopa „Gacko“. IRM Bor d.o.o. Zvornik.
- [7] Supić, M. (2024). Izvještaj o stabilnosti Južne kosine Centralnog polja površinskog kopa „Gacko“ sa prijedlogom sanacije. IRM Bor d.o.o. Zvornik.
- [8] Rajković, R., Gomilanović, M., Kržanović, D., Stepanović, S., Mikić, M., & Jovanović, M. (2024). Determination of safety distances due to the seismic earthquakes during blasting at the open pit North mining district of the Majdanpek copper mine. Mining and Metallurgy Engineering Bor, 2, 21-34. DOI: 10.5937/mmeh2402021R
- [9] Rajković, R., Kržanović, D., Mikić, M., Jovanović, M., & Milutinović, S. (2023). Stability analysis of the integrated waste dumps of the open pits Žuta Prla and Brskovo near Mojkovac. Mining and Metallurgy Engineering Bor, 2, 9-16. DOI: 10.5937/mmeh2302009R

- [10] Rajković, R., Obradović, Lj., Kržanović, D., & Mikić, M. (2019). Stability of the Dam "Prevoj Šaška" of the Flotation Tailing Dump "Valja Fundata" in Majdanpek. Mining and Metallurgy Engineering Bor, 1-2, 9-18. DOI 10.5937/mmeb1902009R

UDK: 622.33(045)=163.41
DOI: 10.5937/bakar2502017T
NAUČNI RAD
Oblast: Geologija

Primljen: 04.12.2025.
Prerađen: 10.12.2025.
Prihvaćen: 12.12.2025.

**DETALJNA GEOLOŠKA ISTRAŽIVANJA POVLATNE ZONE
GATAČKOG UGLJENOG BASENA KAO OSNOVA ZA
PREKATEGORIZACIJU REZERV I IZBOR TEHNOLOGIJE
PREČIŠĆAVANJA UGLJA**

**DETAILED GEOLOGICAL RESEARCH OF THE GACKO COAL
BASIN'S RETURN ZONE AS A BASIS FOR RECATEGORIZATION OF
RESERVES AND SELECTION OF COAL PURIFICATION
TECHNOLOGY**

Stefan Trujić^{1a}, Anđela Marinčić^{1b}, Željana Novković^{1c}, Boško Vuković²

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

^{1a} E-mail: stefan.trujic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-5297-4309>

^{1b} E-mail: andjela.marincic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-0142-4775>

^{1c} E-mail: zeljana.sekulic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5905-2874>

² E-mail: bosko.vukovic@ritegacko.com, Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-1088-540X>

Izvod

Detaljna geološka i inženjersko-geološka istraživanja povlatne ugljene zone i istočnog polja gatačkog ugljenog basena sprovedena su radi obezbeđenja pouzdanih podloga za rudarsko projektovanje i rad termoelektrane Gacko. Istraživanja, realizovana u skladu sa važećom regulativom i projektnom dokumentacijom, obuhvatila su 28 bušotina i širok spektar laboratorijskih ispitivanja s ciljem definisanja kvalitativnih i kvantitativnih parametara uglja te prekategorizacije rezervi do A kategorije. Poseban akcenat stavljen je na analizu raslojenosti ugljenih slojeva i karakteristika pratećih sedimenata, što je ključno za izbor optimalne tehnologije prečišćavanja uglja. Dobijeni rezultati predstavljaju osnovu za dalju klasifikaciju rezervi, rudarska projektovanja i planiranje eksploatacije.

Ključne reči: geološka istraživanja, ugalj, istražno bušenje, ležište

Abstract

Detailed geological and engineering-geological investigations of the coal zone and the eastern field of the Gacko coal basin were carried out to provide reliable bases for mining design and operation of the Gacko thermal power plant. The investigations, carried out in accordance with the applicable regulations and project documentation, included 28 drillholes and a wide range of laboratory tests with the aim of defining the qualitative and quantitative parameters of coal and re-categorizing reserves to category A. Special emphasis was placed on the analysis of the stratification of coal seams and the characteristics of accompanying sediments, which is crucial for the selection of the optimal coal purification technology. The results obtained represent the basis for further classification of reserves, mining design and exploitation planning.

Keywords: geological exploration, coal, exploratory drilling, deposit

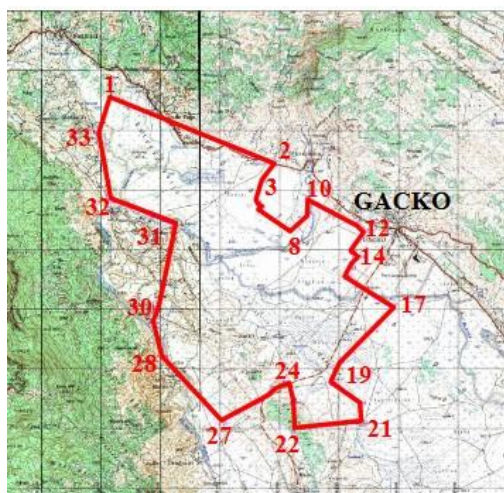
1. UVOD

Gatački ugljeni basen nalazi se u opštini Gacko (Slika 1), na jugoistočnom delu Republike Srpske, i obuhvata oko 40 km² centralnog dela Gatačkog polja. Ugljonosni neogenski sedimenti pružaju se u pravcu severozapad–jugoistok, u dužini od približno 16,5 km, od Nadanića do Gareve i Dobrelja, sa maksimalnom širinom basena od oko 3 km. Južno od Dobrelja, prema Kazancima, teren poprima karakteristike kraške površi na nadmorskoj visini od oko 950 m. Nadmorska visina Gatačkog polja pretežno varira između 940 i 950 m, dok se krajnje vrednosti kreću od 935 do 955 m n.v.



Sl. 1. Geografski položaj mesta Gacko [1]

Eksploataciono polje obuhvata list Gacko sa signaturom K-34-26 Osnovne geološke karte 1:100.000, odnosno listove Gacko (signatura 576-3-1) i Nevesinje (signatura 575-4-2) vojnotopografske karte razmere 1:25.000. Eksploataciono polje uglja „Gacko“ definisano je rešenjem Ministarstva energetike i rudarstva broj 05.04/310-54-3/24 od 22.02.2024. godine. Površina eksploatacionog polja, ograničena prelomnim tačkama 1–33, iznosi 14.144.083 m² (Slika 2).



Sl. 2. Definisani prostor eksploatacionog polja rudnika "Gacko" [2]

Morfologija terena Gatačkog ugljonosnog basena i oblik reljefa u njegovoj neposrednoj okolini značajno utiču na uslove i način eksploatacije uglja, transport, kao i na druge aspekte rudarskih aktivnosti. Eksploatacija u površinskom kopu dovela je do promene reljefa i formiranja inverznih oblika u širem području ležišta, kao što su udubljenja površinskog kopa i nadvišenja terena u zonama jalovišta.

Ugljonosni basen Gacko, sa geomorfološkog aspekta, predstavlja tipično kraško polje, odnosno međuplaninsku depresiju ispunjenu neogenim sedimentima, formiranu nakon relaksacije terena po prestanku usmerenih tektonskih pritisaka. Današnji reljef karakteriše površ sa blagim padom od ulaska reke Mušnice u polje na istoku kod Avtovca, do ušća Gojković potoka u Gračanicu, odnosno u staro korito Mušnice pre njenog regulisanog toka. U užem i širem području Gatačkog polja osnovni geomorfološki oblici jasno su povezani sa geološkom građom terena i mogu se svrstati u tri kategorije:

1. Kraške depresije, delom ispunjene jezerskim i/ili fluvijalnim sedimentima, sa meandrirajućim rečicama i potocima.
2. Kraške površi, razvijene u području mlađih mezozojskih karbonata i pretežno karbonatnih fliševa.
3. Srednje do visoke planine, u zoni mezozojskih tvorevina različitog litoškog sastava.

2. GEOLOŠKA GRAĐA ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Na osnovu rezultata istraživanja i geološkog kartiranja istražnih bušotina na predmetnom prostoru kartirani su sedimenti neogene i kvartarne starosti, slika 3 [3].

Grafički prikaz	Oznaka paketa	Maks. deblj. (m)	Naziv paketa
al	Q	8	Gline, peskovi i šljunkovi
	¹³ Ng	35	Krovinske gline i laporci
	¹² Ng	31	Treći krovinski ugljeni sloj
	¹¹ Ng	28	Drugi krovinski ugljeni sloj
	¹⁰ Ng	24	Prvi krovinski ugljeni sloj
	⁹ Ng	22	Gornji tufogeni paket
	⁸ Ng	166	Laporci visoke krovine glavnog ugljenog sloja
	^{7a} Ng	7	Trakasti laporci sa ugljem
	⁷ Ng	36	Vapnoviti laporci - "kongerijski nivo"
	⁶ Ng	34	Glavni ugljeni sloj
	⁵ Ng	45	Laporovi i tufični laporci (sa melanopsisima)
	⁴ Ng	22	Prvi podinski ugljeni sloj
	³ Ng	95	Laporci, gline i tufovi (sa fosforulima) (donji tufogeni paket)
	² Ng	21	Drugi podinski ugljeni sloj
	¹ Ng	<100	Gline sa karbonatnim konkrecijama

Sl. 3. Šematski prikaz geološkog stuba Gatačke ugljonošne formacije [4]

Laporci visoke krovine glavnog ugljenog sloja (8Ng)

U ovoj fazi istraživanja litološki član (8Ng) nije nabušen nijednom istražnom bušotinom.

Ranijim geološkim istraživanjima utvrđeno je, da je ovaj litološki paket izgrađen od laporaca i čvrstih glina sa karbonatnim konkrecijama, uz prisustvo tankih sočiva slabo vezanih peščara, rjeđe tufova, te povremenih tankih slojeva uglja u gornjem delu.

Laporci i tufovi – podina krovinskog ugljenog sloja, član A (9Ng)

Ovaj član leži iznad osmog paketa „visoke krovine“ i predstavlja podinu krovinskog sloja ili slojeva u „krovinskoj ugljonosnoj zoni“. Paket, debljine do 22 m, sadrži laporce i tufove različitog porekla – od tufogenih laporaca i laporovitih tufova do čvrstih vitroklastičnih tufova. Manji tufogeni sedimenti sadrže centimetarske trake uglja, što predstavlja prvu koncentraciju biljne materije nakon deponovanja u paketu 72Ng (izuzimajući retke proslojke u gornjem delu 8Ng). Iako je u ovom paketu manje tufova nego u trećem (3Ng), ipak može nositi naziv gornji (mlađi) tufogeni paket.

Prvi krovinski ugljenosni sloj (10Ng)

Prvi krovinski ugljeni sloj karakterističan je po brojnim trakama tankih slojeva uglja, koje u pojedinim delovima, posebno u gornjem delu člana, mogu imati ekonomski značaj. Sa ugljem se preslojavaju tamnosivi, žutosmeđi i tamnožuti peskoviti laporci, milimetarski do centimetarski slojevi uglja, tamnosive i ugljevite gline, retko tufovi.

Ispod traka uglja i laporaca često se preslojavaju sivobeli i beli sitnozrnasti do prašnasti kvarcni peskovi, u kojima su prisutna zrna tufogenog materijala. Debljina ovog litološkog člana kreće se od 15 do 20 m.

Drugi krovinski ugljenosni sloj (11Ng)

Drugi krovinski ugljeni sloj, poznat i kao srednji ugljeni nivo, ekonomski je najznačajniji deo krovinskih ugljeva. Sastoji se od traka drvenastog do slabo drvenastog uglja sa malim proslojcima jalovih sedimenata. Među najzastupljenijim međuslojnim jalovinama su tamnosivi do smeđi i žutosmeđi laporci sa fosilima, mrke i ugljevite gline, često sa karbonatnim konkcijama u vidu praha i gnezdašaca, retko i tufovima. Debljina ovog člana doseže do 30 m.

Treći krovinski ugljenosni sloj (12Ng)

U ovom članu značajno raste učešće jalovine, a karakteristično je da se od dna prema vrhu i jugoistoku smanjuje udeo uglja u odnosu na prateće međuslojne sedimente. Ovaj član čine trake uglja promjenljive moćnosti i kvaliteta, ugljevite gline, tamnosivi i smeđi peskoviti laporci. Mestimično se javljaju tanki slojevi silifikovanih žutosivih i sivih krečnjaka, često sa fosilima. Zavisno od moćnosti, ovaj litološki član može negativno uticati na buduću eksploataciju. Maksimalna debljina iznosi oko 30 m.

Krovinske gline i laporci (13Ng)

Ovaj najmlađi litostratigrafski član u basenu izgrađen je od sivih i tamnosivih glina, ugljevitih i laporovitih glina, te sivosmeđih do tamnosivih peskovitih laporaca. Često se javljaju i sitnozrnasti do srednjezrnasti peskovi sivih nijansi.

Kvartar (Q)

Kvartarne tvorevine čine površinske delove istraživanog terena. Registrovane su ispod humusnog pokrivača u svim istražnim bušotinama. Prema lito-loškom sastavu to su prašinasto-peskoviti materijali, često masni i plastični, različitih boja i nijansi – od smeđih, svetlosivih, mrkih, sivozelenih do golubije plavih.

3. ISTRAŽNI RADOVI

Na osnovu dosadašnjih geoloških istraživanja u povlatnoj zoni ležišta Gacko definisane su koncepcija i metodologija daljih radova, sa ciljem detaljnijeg ispitivanja ležišta i dostizanja nivoa istraženosti potrebnog za izradu Elaborata o sirovinskoj bazi uglja [5]. Dobijeni rezultati omogućiće prekategoricizaciju rezervi do A kategorije i poslužiće kao osnova za izradu glavnih rudarskih projekata, planiranje eksploatacije i uvođenje postrojenja za prečišćavanje uglja.

Da bi se energetska sirovina mogla ekonomično i racionalno eksploatirati, u fazi geoloških istraživanja moraju se primeniti odgovarajuće metode i obezbediti pouzdani podaci o obliku i veličini ležišta, njegovom prostornom položaju, tektonskim i hidrogeološkim karakteristikama, kao i o kvalitetu sirovine. Projektom detaljnih istraživanja u povlatnoj zoni ležišta Gacko definisane su tri faze rada: terenska istraživanja, laboratorijska ispitivanja i kabinetska obrada podataka [6]. Terenski radovi realizovani su istražnim bušenjem uz stalni stručni nadzor, uz obavezno oprobavanje svih bušotina prema važećem pravilniku. Istovremeno su sprovedena laboratorijska ispitivanja kvalitativnih i fizičko-mehaničkih osobina uzoraka radi pouzdane prekategoricizacije rezervi do A kategorije.

Radi preciznog određivanja lokacija istražnih radova i prostornog položaja rudnog tela, izvedeni su geodetski radovi koji su obuhvatili lociranje svih bušotina pre početka bušenja, kao i naknadno snimanje njihovih koordinata i kota po završetku radova. Geodetska služba Rudnika i Termoelektrane Gacko izvršila je snimanje ukupno 28 istražnih bušotina.

Tabela 1. *Oznaka i dužine izvedenih istražnih bušotina „Povlatne zone”*

Redni broj	Oznaka bušotine	Dužina (m)
1.	BP-138/2025	84
2.	BP-146/2025	45
3.	BP-152/2025	70
4.	BP-153/2025	45
5.	BP-159/2025	100
6.	BP-160/2025	75
7.	BP-161/2025	63
8.	BP-169/2025	100
9.	BP-168/2025	105
10.	BP-177/2025	93
11.	BP-171/2025	75
12.	BP-179/2025	57
13.	BP-178/2025	76
14.	BP-170/2025	90
15.	BP-186/2025	75
16.	BP-194/2025	69
17.	BP-193/2025	87
18.	BP-185/2025	87
19.	BP-192/2025	93
20.	BP-184/2025	96
21.	BP-183/2025	99
22.	BP (gm)-191/2025	75
23.	BP-190/2025	60
24.	BP-182/2025	60
25.	BP-174/2025	51
26.	BP-165/2025	63
27.	BP-156/2025	54
28.	BP (gm)-164/2025	51
Ukupno:		2.098,00 m

Istražno bušenje

Istražno bušenje realizovano je u periodu od 20. avgusta do 05. septembra 2025. godine. Tokom ovog perioda izvedeno je ukupno 28 istražnih bušotina, ukupne dužine 2.098,00 m.

Sve bušotine izvedene su u skladu s projektovanim parametrima prikazanim u Tabeli 1. Označene su prema vremenu projektovanja i sve nose oznaku /2025.

Bušenje je izvršeno bušačom garniturom Cassagrande C6 (slika 4), primenom wireline sistema bušenja, rotacionim postupkom, što je omogućilo kontinuirano jezgrovanje duž celog profila bušotine. Kao bušači fluid korištena je voda, u skladu s tehnologijom definisanom projektom istraživanja.



Sl. 4. Garnitura za bušenje Cassagrande C6 na istražnoj lokaciji (Trujić S., 2025)

Istražno bušenje izvedeno je garniturom Casagrande C6, pri čemu je ostvaren visok procenat iskorišćenja jezgra, preko 95%. Početni i završni prečnik bušenja iznosio je 101 mm. Jezgro je vađeno iz duple sržne cevi istiskivanjem vodom u korito dužine 3 m, zatim isprano i složeno u plastične sanduke sa pregradama koje sprečavaju mešanje intervala (slika 5). Svaki uzorak obeležen je oznakom dužine radi jasne identifikacije. Pregled svih realizovanih bušotina dat je u Tabeli 1.



Sl. 5. Izvađeno, označeno i spakovano jezgro u sanducima (Trujić S., 2025.)

Geološko kartiranje istražnih bušotina obavljeno je detaljno, uz evidentiranje svake litološke promene, njene debljine i procenta izvađenog jezgra za svaki interval. Podaci su sistematski uneti u geološke profile bušotina. Pre početka kartiranja, svaki sanduk sa jezgrom je fotografisan radi dokumentovanja uzorka, a tokom determinacije posebne markice korišćene su za razdvajanje ugljenih slojeva, međuslojne jalovine i uzoraka namenjenih petrološkim analizama. Na slici 6 prikazano je jezgro pripremljeno za oprobavanje.



Sl. 6. Izgled iskartiranog jezgra (Trujić S., 2025.)

Profil bušotine sadrži podatke o apsolutnoj i relativnoj visini, dubini i debljini svakog litološkog člana, procentu izvađenog jezgra, litološkom opisu, intervalima i mestima uzimanja uzoraka, dijagramu RQD-a (Rock Quality Designation) za geomehničke bušotine i laboratorijskim rezultatima. Analizom 28 bušotina u „Povlatnoj zoni“ tokom 2025. godine utvrđeno je da prosečna moćnost ugljenog sloja iznosi 11,07 m, od čega je prosečna debljina čistog uglja 3,80 m, a rovnog uglja 7,27 m. Debljina sloja varira od 0,90 m (BP-160/2025) do 20,20 m (BP-168/2025), dok je ukupna dužina međuslojne jalovine u rovnom uglju 32,40 m.

Oprobavanje uglja u Povlatnoj ugljenoj zoni

Oprobavanje i ispitivanje uglja sprovedeno je tokom bušenja uz prisustvo predstavnika nadzornog organa investitora. Intervali za oprobavanje određivani su tako da dužina jedne probe ne prelazi 5 m. Proslojci jalovine do 10 cm uključivani su u čist ugalj, dok proslojci do 30 cm ulaze u rovni ugalj; deblji slojevi prekidali su probu, a slojevi manji od 30 cm u jalovini nisu oprobavani. Uzete probe pakovane su u polivinil vreće, čvrsto zatvorene radi očuvanja vlage, i otpremljene u laboratoriju. Tokom istraživanja uzeto je ukupno 1 872 proba.



Sl. 7. Upakovane probe za laboratorijska ispitivanja (S. Trujić, 2025)

Analize rovnog uglja vršene su formiranjem kompozitnih proba uglja i jalovine u procentualnom odnosu prema debljini slojeva i njihovoj zapreminskoj masi. Paralelno su uzimani uzorci za određivanje zapreminske mase uglja i pratećih stenskih masa (ukupno 826 uzoraka), uključujući i petrografska ispitivanja.

Uzorkovanje je sprovedeno u skladu sa planiranim ispitivanjima, radi dobijanja potpunih podataka o mineraloško-petrografskom sastavu, strukturi i teksturi stenskih masa, kao i uticaju jalovine na termotehničke karakteristike uglja. Po završetku oprobavanja sačinjen je propratni dokument sa intervalima i vrstama laboratorijskih ispitivanja, potpisan od strane nadzora i izvođača. Svi uzorci pakovani su u polivinil vreće radi očuvanja vlažnosti i transportovani u laboratoriju Instituta za rudarstvo i metalurgiju u Boru (slika 7). Rezultati su dokumentovani u posebnoj evidenciji i predstavljaju integralni deo elaborata, dok su duplikati uzoraka predati investitoru radi čuvanja.

Ispitivanja su sprovedena po akreditovanim i standardizovanim metodama. Sva geološka i laboratorijska ispitivanja, usmerena na precizno određivanje mineraloško-petrografskog sastava, strukture i teksture stenskih masa unutar pojedinih litostratigrafskih jedinica, realizovana su u skladu sa važećim geološkim i laboratorijskim normama.

- imedijatno-tehničke analize uglja,
- određivanje elementarnog sastava uglja,
- određivanje silikatno-hemijskog sastava pepela uglja,
- određivanje sadržaja karbonata u pepelu uglja,
- određivanje tačke paljenja uglja,
- određivanje topljivosti pepela uglja,
- određivanje makro- i mikroelemenata u pepelu uglja,
- određivanje sadržaja teških metala u pepelu uglja,
- određivanje meljivosti uglja,
- određivanje zapreminske mase uglja i pratećih stena u ugljenom sloju,
- petrografska ispitivanja pratećih stena u ugljenim slojevima,
- određivanje topivosti glina,
- određivanje topivosti laporaca,
- određivanje topivosti ugljevitih glina,
- određivanje sadržaja fluorida i hlorida.

Uporedo sa istražnim bušenjem vršeno je detaljno kartiranje jezgra bušotina, pri čemu je posebna pažnja posvećena određivanju litološke vrste stenske mase, stepena raspadnutosti, vlažnosti, strukturnih i teksturnih karakteristika, mehaničkih diskontinuiteta i drugih makroskopski uočljivih fizičkih svojstava. Svi mehanički diskontinuiteti su analizirani i mereni, a kvalitet izvađenog jezgra (RQD) određen u svakoj bušotini. Rezultati su prikazani kroz pojedinačne profile u razmeri 1:100. Detaljnim inženjersko-geološkim kartiranjem utvrđeno je da teren sadrži dvanaest litoloških članova unutar pet litogenetskih jedinica.

Po završetku kartiranja jezgra izvršen je odabir i uzimanje reprezentativnih uzoraka za laboratorijska ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava stenskih masa, radi dobijanja parametara potrebnih za geotehničke proračune (slika 8). Svi uzorci

evidentirani su u terenskom zapisniku i propisno označeni markicama sa podacima o bušotini, broju uzorka, intervalu i datumu uzorkovanja, te vrsti ispitivanja. Uzorci su obmotani prijanjajućom plastičnom folijom, imobilisani lepljivom trakom radi očuvanja vlage i zaštite pri transportu, a potom pakovani u kutije i poslani u laboratoriju. Iz svih litoloških članova uzeti su reprezentativni uzorci uglja, stene i gline, ukupno 18 uzoraka, za određivanje fizičko-mehaničkih parametara potrebnih za rudarska projektovanja.



Sl. 8. Uzimanje uzoraka za laboratorijska ispitivanja fiziko-mehaničkih svojstava stenskih masa (S. Trujić, 2025)

4. PRIKAZ REZULTATA ISPITIVANJA KVALITETA UGLJA

Ranija istraživanja Povlatne ugljene zone nisu pružila dovoljno podataka o kvalitetu uglja i sastavu međuslojne jalovine, zbog velike raslojenosti slojeva i čestih decimetarskih proslojaka pratećih sedimenata koji negativno utiču na kvalitet pri eksploataciji [5]. Prethodna metodologija oprobavanja uključivala je međuslojnu jalovinu debljine preko 0,3 m, dok je projektom definisana nova metodologija uzorkovanja u skladu sa planiranom nabavkom postrojenja za prečišćavanje uglja.

Na Povlatnoj zoni izvedeno je 28 istražnih bušotina ukupne dužine 2.098,00 m, pri čemu je uzeto 1.872 proba, odnosno ukupne dužine oprobavanja ugljenog sloja od 310,0 m. Istražnim bušenjem definisana je moćnost ugljenih slojeva i proslojaka jalovine, što zajedno sa laboratorijskim rezultatima omogućava prekategoriizaciju rezervi do A kategorije i planiranje budućih rudarskih aktivnosti.

Debljina ugljenih slojeva kreće se od 0,90 m (BP-160/2025) do 21,60 m (BP-168/2025), dok je prosečna debljina rovnog uglja 7,27 m, a čistog uglja 3,80 m. Kvalitet uglja za ležište izrađen je ponderisanjem po masi za sve ana-

lizirane parametre, a rezultati „čistog“ i „rovnog“ uglja po bušotinama i za ležište u celini ispitivana su po akreditovanim i validnim metodama, u skladu sa standardnim normama.

Kvalitet uglja za celo ležište utvrđen je određivanjem srednje ponderisane vrednosti po masi za sve analizirane parametre. U nastavku su prikazani rezultati proračuna kvaliteta „čistog“ i „rovnog“ uglja na osnovu laboratorijskih ispitivanja svih ugljenih slojeva ležišta.

Proračun kvaliteta „rovnog“ uglja izveden je na osnovu 131 analize. Proračunate prosečne vrednosti imedijatno-tehničke analize „rovnog“ uglja za Povlatnu zonu prikazane su u tabeli 2.

Tabela 2. Srednji sadržaj: vlage, pepela, sagorivog sumpora Donja toplota sagorevanja u „rovnom“ uglju Povlatne zone

Vrsta analize	Sadržaj	Jedinice	Standardna norma
Ukupna vlaga	35,31	%m/m	ISO 589:2008
Pepeo	31,64	%m/m	ASTM D 3174:2018
S sagoriv	0,72	%m/m	R
Donja toplota sagorevanja	6.592	J/g	ASTM D5865:2024

Litološki članovi istraživanog područja prikazani su na profilima izvedenih bušotina sa preciznom determinacijom intervala od 0,10 m moćnosti. Rezultati laboratorijskih ispitivanja mineralno-sirovinske baze uglja „Povlatne zone“ pružaju precizne podatke o termotehničkim svojstvima sagorive materije, što će poslužiti kao osnova za projektovanje kotlovskih postrojenja. Kvalitet uglja za istraživani prostor određen je ponderisanjem prema moćnosti za sve analizirane parametre. Na osnovu geološke determinacije jezgra i laboratorijskih rezultata izvršena je interpretacija ugljenih slojeva na vertikalnim profilima radi sagledavanja njihovog prostornog rasporeda i položaja u ovoj fazi istraživanja.

5. ZAKLJUČAK

Na Povlatnoj ugljenoj zoni ležišta Gacko, u periodu od 20.08. do 05.09.2025. godine, izvedena su detaljna geološka istraživanja i ispitivanja uglja i pratećih sedimenata. Ukupno je izvedeno 28 istražnih bušotina dužine 2.098,00 m, na površini istražnog prostora od 657.654,29 m². Cilj istraživanja bio je postizanje višeg nivoa istraženosti, definisanje geoloških karakteristika i stvaranje osnove za prekategORIZACIJU rezervi uglja do A kategorije, što predstavlja polaznu osnovu za rudarska projektovanja, eksploataciju i uvođenje postrojenja za prečišćavanje uglja.

Povlatnu zonu karakteriše izražena raslojenost ugljenih slojeva, pri čemu se izdvajaju tri glavna sloja: treći (krovinski) sloj sa povećanim prisustvom jalovine, drugi (srednji) sloj sa manjim proslojcima jalovih sedimenata i prvi (podinski) sloj sa tankim trakama uglja. Laboratorijska ispitivanja sprovedena su u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor po akreditovanim i standardizovanim metodama.

Analize kvaliteta uglja izvršene su za „čist“ ugalj (proslojci jalovine do 0,10 m) i „rovni“ ugalj (proslojci jalovine do 0,30 m). Rezultati pokazuju:

Rovni ugalj: ukupna vlaga 35,31%, pepeo 31,64%, sagorivi sumpor 0,72%, donja toplota sagorevanja 6.592 J/g.

Na osnovu dosadašnjih istraživanja može se zaključiti da stepen istraženosti Povlatne zone još nije dovoljan za izradu Elaborata o klasifikaciji i kategorizaciji rezervi do nivoa A kategorije. Karakteristike uglja kao termoeenergetske sirovinске baze su zadovoljavajuće, ali za potpuno sagledavanje ležišta neophodna su dodatna istraživanja. Preporučuje se nastavak istražnih radova prema jugoistočnom delu ležišta i povećanje gustine postojeće mreže bušotina, kako bi se dobili precizniji podaci o razviću, rasporedu i kvalitetu ugljenih slojeva do nivoa A kategorije.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] www.wikipedia.org
- [2] Ječmenica Z. (2024). Elaborat o izvedenim detaljnim geološkim i inženjersko-geološkim istraživanjima povlatne ugljene zone i istočnog polja u funkciji kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika ugljenih slojeva za potrebe izrade elaborata o rezervama i postrojenja za prečišćavanje uglja za period 2023-2025. godine. Zvornik.
- [3] Milojević, R., & Jović, R. (1979). Geološke karakteristike Južnog eksploatacionog polja u gatačkom basenu. Geološki glasnik, 23.
- [4] Olujić, J. (2007). Šematski prikaz geološkog stuba Gatačke ugljonosne formacije. Geološki zavod Univerziteta u Beogradu.
- [5] Bugarin M. (2019). Elaborat o izvedenim detaljnim geološkim, istraživanjima Povlatne zone ležišta uglja „Gacko“. Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor.
- [6] Vuković, B. (2025). Projekat detaljnih geoloških i inženjersko-geoloških istraživanja „Povlatne ugljene zone“ ležišta uglja Gacko. Rudnik i termoelektrana Gacko, a.d. Gacko.

UDK: 628.539:614.715(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2502031R

NAUČNI RAD

Oblast: Rudarstvo

Primljen: 26.11.2025.

Prerađen: 28.11.2025.

Prihvaćen: 01.12.2025.

**DEFINISANJE PROSTORNOG POLOŽAJA KLIZIŠTA I NESTABILNE
ZONE ISTOČNE KOSINE POVRŠINSKOG KOPA JUŽNI REVIR
RUDNIKA BAKRA MAJDANPEK**

**DEFINING THE SPATIAL POSITION OF THE LANDSLIDES AND
UNSTABLE ZONE OF THE EASTERN SLOPE OF THE OPEN-PIT
MINE, SOUTHERN DISTRICT OF THE MAJDANPEK COPPER MINE**

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

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Bor, Srbija

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

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

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

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

Izvod

Projektovanje konačne granice zahvata u istočnom delu površinskog kopa Južni revir izvršeno je na osnovu definisanog solida klizišta i nestabilne zone u prostoru ograničenom topografijom terena, gornjom površinom, granicom klizne ravni, i donjom ograničavajućom površinom. Solid je izrađen na osnovu geotehničke interpretacije klizišta i nestabilne zone, tj. na osnovu definisanih vertikalnih inženjersko-geoloških profila, koji predstavljaju zatvorene poligone.

Ključne reči: Površinski kop Južni revir, klizište i nestabilna zona, solid

Abstract

The design of the final boundary of the intervention in the eastern part of the South District open pit mine was carried out on the basis of a defined solid of the landslide and unstable zone in the space limited by the terrain topography, the upper surface, the boundary of the sliding plane, and the lower limiting surface. The solid was created on the basis of the geotechnical interpretation of the landslide and unstable zone, i.e. on the basis of defined vertical engineering-geological profiles, which represent closed polygons.

Keywords: South District open pit mine, landslide and unstable zone, solid

1. UVOD

Optimizacija i izbor završne konture površinskog kopa, planiranje i projektovanje faznog razvoja radova i dinamike otkopavanja površinskog kopa „Južni revir“ su izvršeni primenom *Gemcom GemsTM* i *WhittleTM* softvera, koji u savremenom rudarstvu predstavljaju standard za strateško planiranje i projektovanje površinskih kopova. Optimizacija je izvršena na osnovu blok modela ležišta i tehno – ekonomskih parametara proizvodnje [1].

Na istočnoj kosini kopa došlo je do pomeranja masa zbog čega su privremeno bili obustavljeni radovi na tom delu. Pomeranja su registrovana i instrumentalno, korišćenjem geodetskog monitoringa na fiksnim reperima, kao i odgovarajućim terestričkim radarom, ali i vizuelno, pri terenskim obilascima, kada su uočene sveže tenziona pukotine dekametskog pružanja, značajnog zeva cm-dm reda veličine, dubine više metara, i skoka povlatnog bloka, bližeg ivici kopa, reda veličine dm-m. Površina prizme klizanja nije konačno određena, ali kroz analizu pomeranja postavljenih repera i snimaka sa S-SAR terestričkog radara mogla je da se pretpostavi okvirna prizma klizanja [2].

Na samoj lokaciji postoji problem sa kontrolom podzemnih i površinskih voda. Velika količina vode prodire kroz kosinu u kop čime dodatno narušava stabilnost. Problem pravi Šaški potok u koji je odlagana jalovina i iznad njega oformljeno odlagalište. Pretpostavka je da voda i dalje prolazi tokom potoka i preko rasedne zone prodire u kop, čime dodatno prihranjuje stensku masu [2].

Dostupni podaci geotehničkih istraživanja i ispitivanja su bili ograničenog obima i starijeg datuma, i nisu sistematizovani za sve inženjersko – geološke sredine, tako da su pružali samo okvirnu sliku o problematici sadašnjeg stanja kopa.

Da bi se obezbedila sigurna i efikasna proizvodnja na površinskom kopu „Južni revir“, bilo je potrebno sistematski analizirati inženjerskogeološke i hidrogeološke karakteristike područja rudnika i postaviti temelje za analizu stabilnosti kosina površinskog kopa. Iz tog razloga je bilo potrebno upotrebiti rezultate prethodnih istraživanja i kombinovati sa rezultatima novih projektovanih istražnih radova [3], kako bi se pouzdano kontrolisali ključni delovi, saznali inženjersko – geološki i hidro – geološki uslovi i nepovoljni inženjersko – geološki uslovi na otvorenim kosinama.

Optimalna završna kontura površinskog kopa morala je da bude korigovana u istočnom delu usled pojave klizišta i nestabilne zone, a u cilju stvaranja bezbednih uslova za rad ljudi i mehanizacije [1,4,5].

2. DEFINISANJE PROSTORNOG POLOŽAJA KLIZIŠTA I NESTABILNE ZONE

Projektovanje konačne granice zahvata, odnosno istočne granice površinskog kopa „Južni revir“ izvršeno je na osnovu definisanog solida klizišta

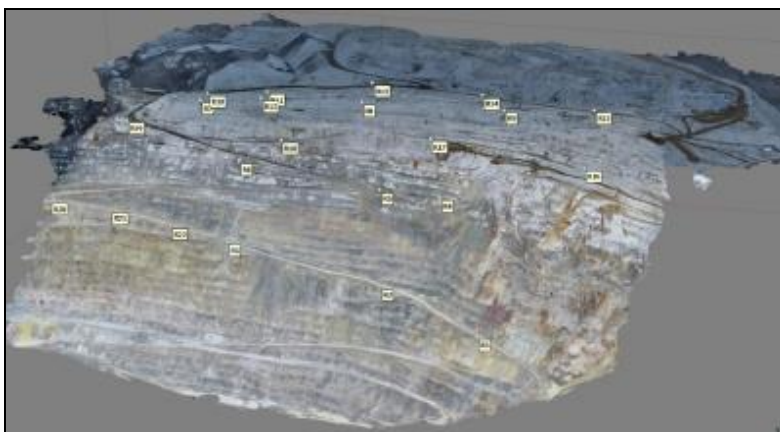
i nestabilne zone u prostoru ograničenom topografijom terena, gornjom površinom, granicom klizne ravni, i donjom ograničavajućom površinom.

Solid je izrađen na osnovu geotehničke interpretacije klizišta i nestabilne zone, tj. pomoću definisanih vertikalnih inženjersko-geoloških profila, koji predstavljaju zatvorene poligone (3D ringove).

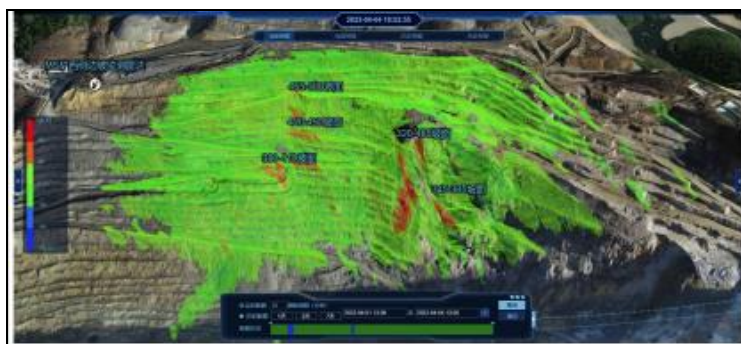
Kao podloge za određivanje gabarita klizišta i dela terena ugroženog aktivnim klizištem, korišćena je dostupna dokumentacija [2,3,6]. Pomeranja terena su registrovana instrumentalno, korišćenjem geodetskog monitoringa na fiksnim reperima u vršenim merenjima tokom 2023. i 2024. godine, (slika 1), kao i snimcima sa terestričkog radara S-SAR, (slika 2).

U zoni kretanja masa postavljena su 22 geodetska repera na kojima je beleženo pomeranje tla. Veća pomeranja tla su zabeležena na najvišim kotama, dok su nešto manja pomeranja registrovana pri dnu. Ukazuju na trend kretanja koji odgovara opštoj zakrivljenoj ili kružnoj kliznoj površi, jer se reperi u višim delovima, na kotama preko 525 mnv kreću dominantno vertikalno, dok se reperi u zoni oko kote 300 i 400 kreću dominantno horizontalno i to približno ka zapadu. S-SAR radar beleži konstantnu pozitivnu komponentu pomeranja ka zapadu u nižim delovima oko kote 300 do 400 mnv, dok su na koti 530 mnv uočena registrovana blaga negativna pomeranja.

Vizuelno, terenskim obilascima pri rekognosciranju terena i korišćenjem dostupnih ortofoto snimaka površinskog kopa, snimljene su tenziona pukotine u odloženom materijalu, koje se mogu pratiti desetinama, pa čak i stotinama metara paralelno sa ivicom kopa. Značajnog su zeva decimetarskog reda veličine i dubine više metara, (slika 3). Na osnovu prikupljenih podataka, pretpostavka je da se radi o globalno ugroženoj stabilnosti čitave istočne kosine i da se na kosini javlja progresivni lom.



Sl. 1. Položaj fiksnih repera u nestabilnoj zoni na istočnoj kosini površinskog kopa



Sl. 2. Snimak S-SAR radara



Sl. 3. Registrovane tenzione pukotine na površini terena u severoistočnoj zoni površinskog kopa

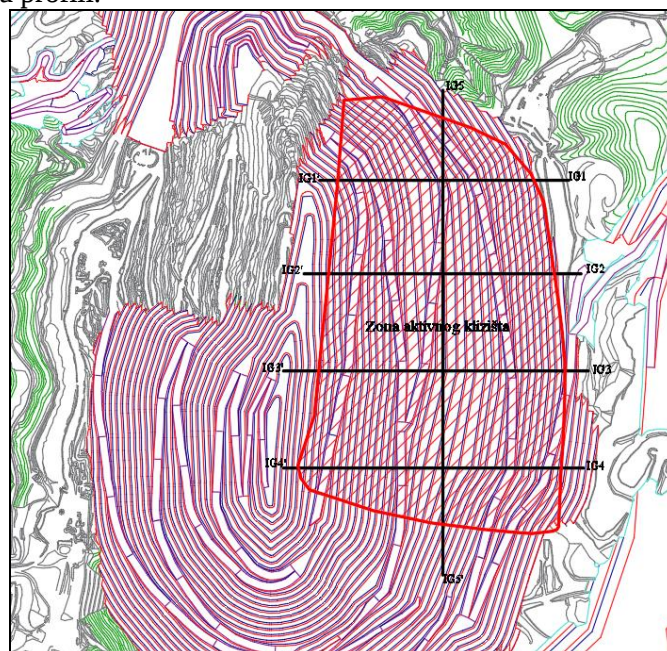
Na osnovu rezultata monitoringa seizmike koja je vršena u gradu Majdanpeku, nije bilo moguće definisati niti klizno telo, niti kritičnu kliznu površinu, na bilo kom delu kosina PK Južni Revir.

Na osnovu podataka dostupnih istraživanja, nije bilo moguće da se utvrdi tačan položaj klizne površi, pa je njena pretpostavljena dubina veća (15 - 90 m), kako bi se stalo na stranu sigurnosti. Materijal koji je zahvaćen koluvijalnim procesom predstavljaju: tehnogene tvorevine (kopovsko odlagalište), kompleks sačinjen od degradiranih škriljaca, gnajseva i u manjoj meri stena andezitskog sastava. Kao zona zahvaćena klizištem izdvojen je deo terena približnih dimenzija 1.250 x 720 m.

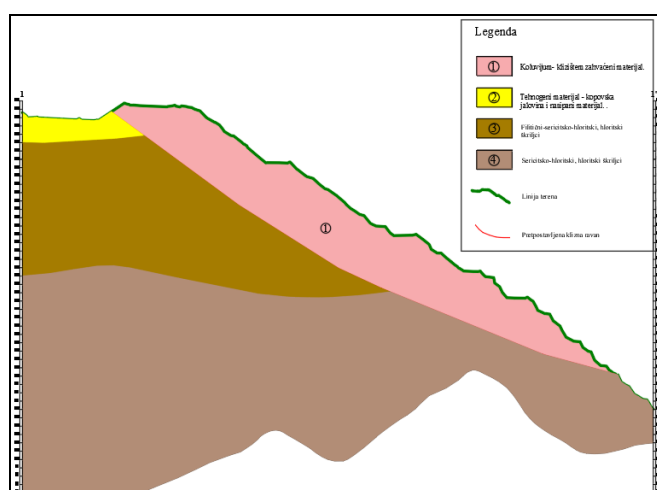
Izvršena je konstrukcija inženjersko – geoloških profila i modeliranje kliznog tela. Na situacionoj karti je definisana zona klizišta u planu.

Konstruisano je 5 profila na kojima je prikazana zona zahvaćena klizanjem, a pokrenuti materijal kao koluvijum.

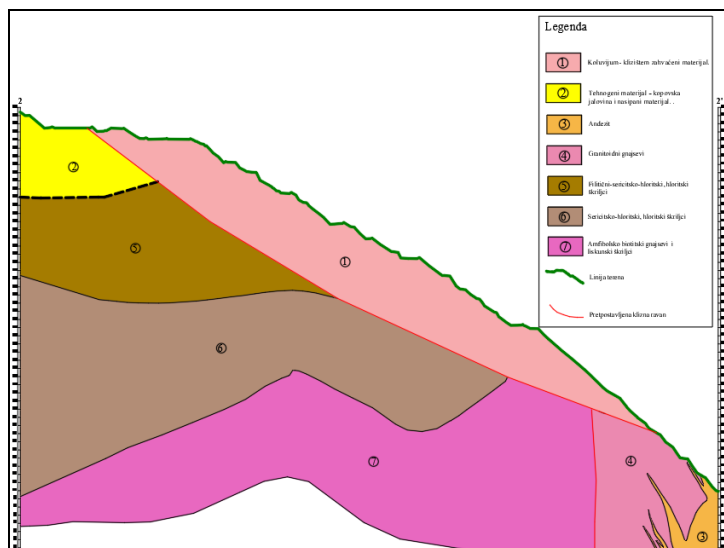
Na slici 4 prikazan je položaj profila i zona klizišta. Na slikama 5 – 9 prikazani su profili.



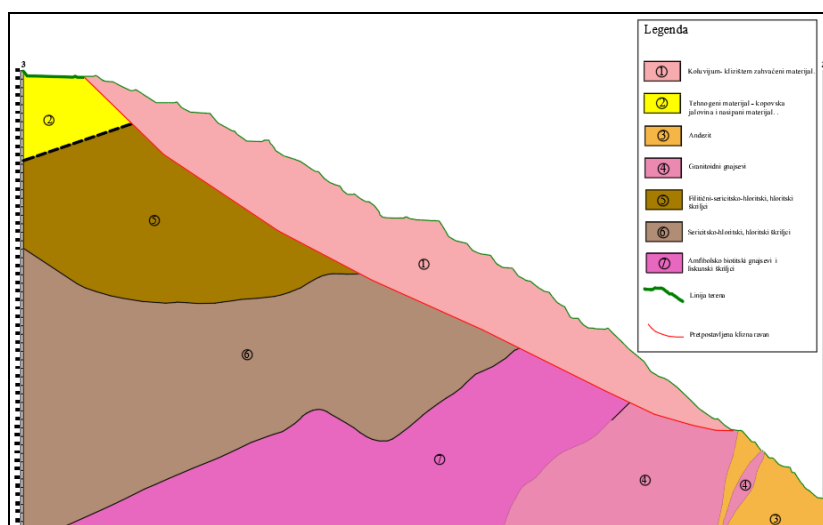
Sl. 4. Položaj profila i zona klizišta



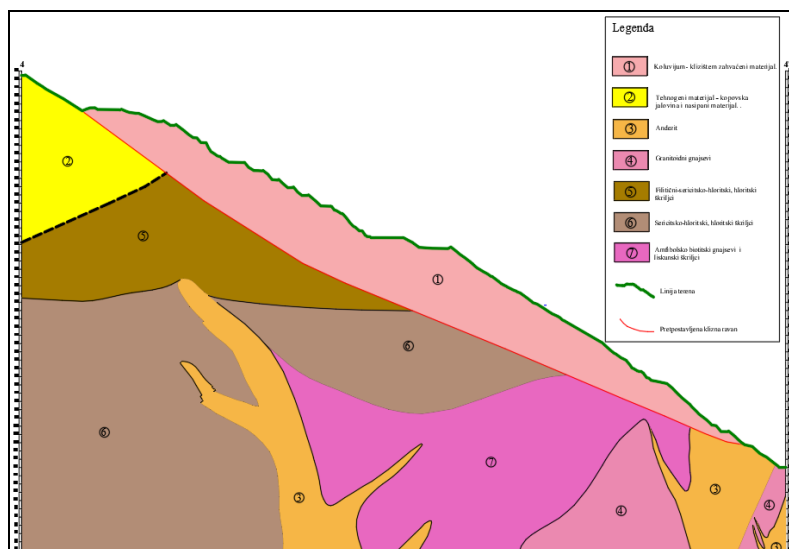
Sl. 5. Profil IG1-IG1'



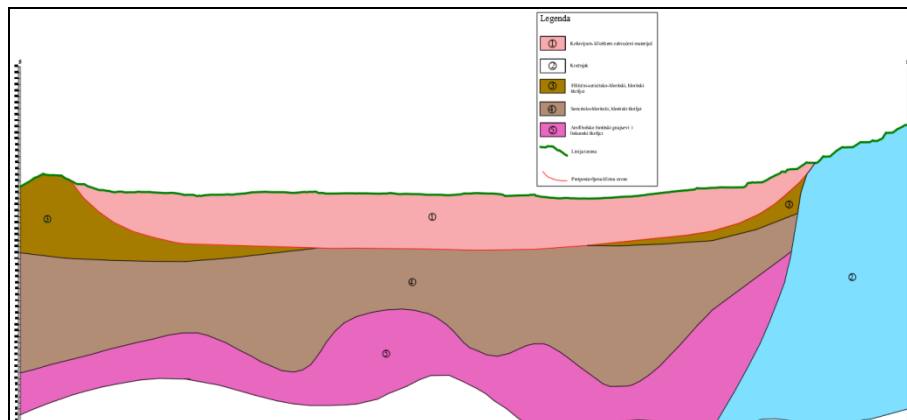
Sl. 6. Profil IG2-IG2'



Sl. 7. Profil IG3-IG3'



Sl. 8. Profil IG4-IG4'



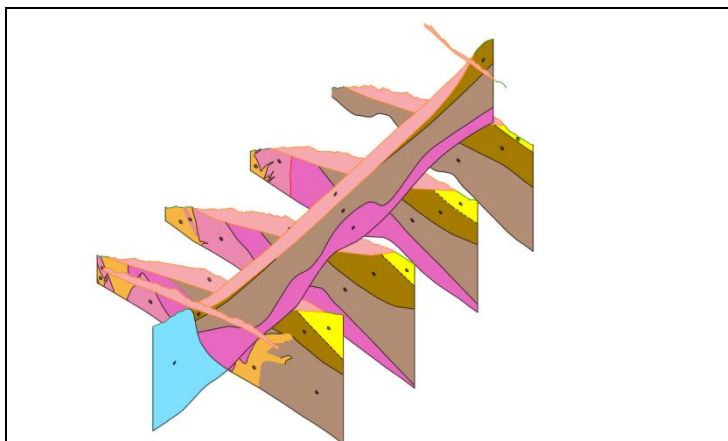
Sl. 9. Profil IG5-IG5'

3. 3D SOLID KLIZIŠTA I NESTABILNE ZONE

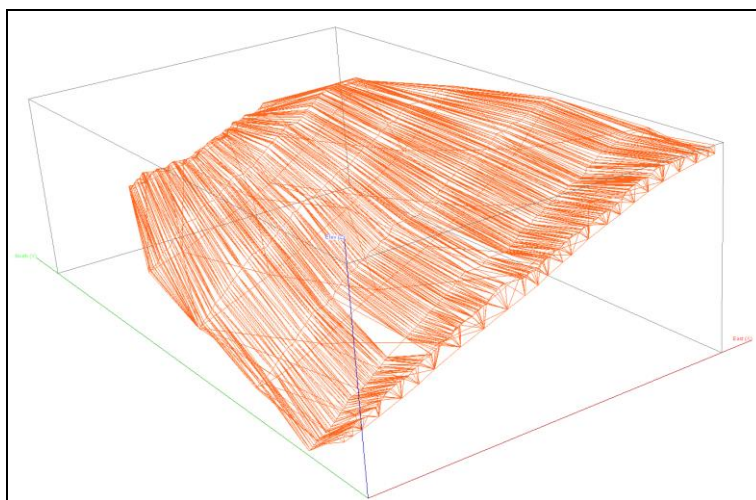
Solid je generisan u softveru Geovia GemsTM, na osnovu definisanih vertikalnih profila, koji predstavljaju zatvorene poligone (3D ringove). Solid je formiran metodom TIN (Triangle Irregular Network). Predstavlja triangulaciju mrežom nepravilnih trouglova na osnovu geotehničke interpretacije klizišta

vertikalnim profilima i karakteristike solida (zapremina solida, površina, broj čvorova u formiranoj površini, broj trouglova, i dr) [7-9].

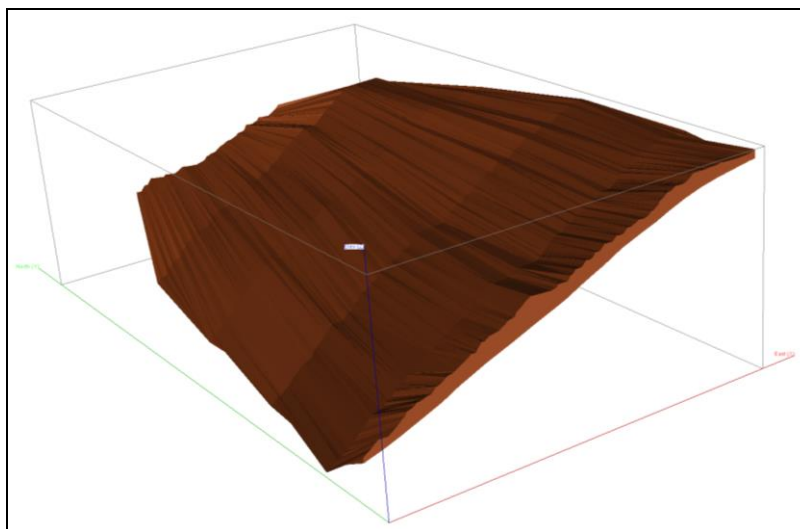
Na slikama 10 – 12 prikazan je generisan solid klizišta i nestabilne zone u istočnoj zoni površinskog kopa Južni revir.



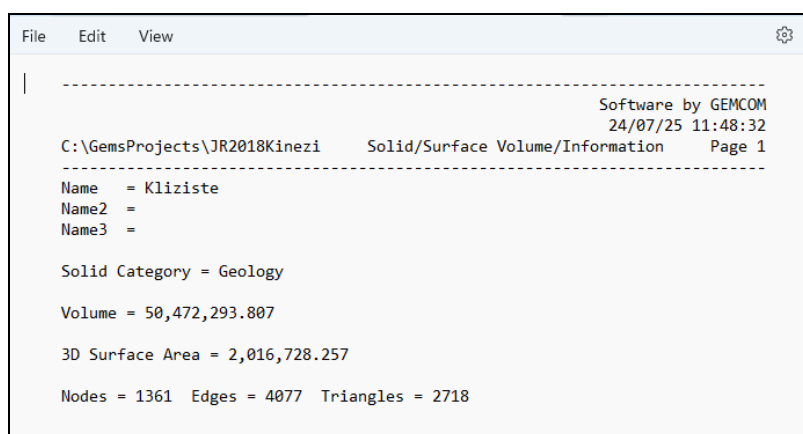
Sl. 10. 3D prikaz geotehničkih profila



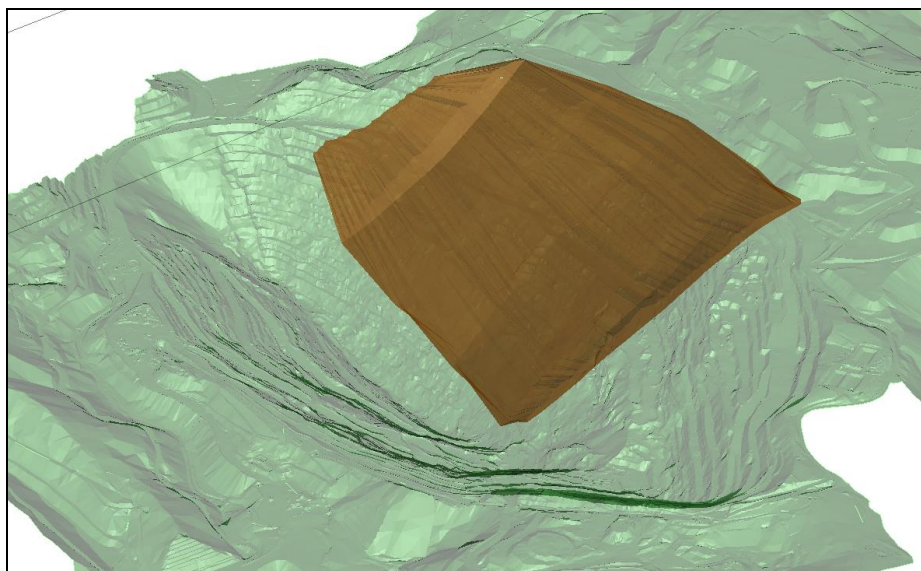
Sl. 11. Prikaz mreže neregularnih trouglova solida klizišta i nestabilne zone



Na slici 13 prikazan je izlazni rezultat proračuna zapremine solida klizišta i nestabilne zone kao tekstualni fajl programa Notepad, a na slici 14 dat je 3D prikaz prostornog položaja klizišta i nestabilne zone u istočnoj zoni površinskog kopa Južni revir.



Sl. 13. Rezultat proračuna zapremine solidna klizišta i nestabilne zone u softveru Gems



Sl. 14. 3D prikaz prostornog položaja solida klizišta i nestabilne zone u istočnoj zoni površinskog kopa

4. ZAKLJUČAK

Određivanje prostornog položaja klizišta, odnosno izrada njegovog 3D modela, je jedan od primarnih činilaca za definisanje tehnologije eksploatacije na istočnom delu kopa i stvaranja uslova za bezbedan rad u ovoj zoni.

Prikazani model klizišta je definisan na osnovu raspoloživih podataka.

Za preciznije definisanje nestabilnosti na istočnoj kosini potrebno je sprovesti dodatna geotehnička i hidrogeološka istraživanja. Preporučuje se da se po prikazanim inženjerskogeološkim presecima u zoni nestabilnosti izvrši projektovanje 9 geotehničkih bušotina, prosečne dubine 70 – 100 m. U ovim bušotinama sproveda bi se ispitivanja vodopropusnosti i iste bi bile pretvorene u pijezometarske, kako bi se dobili egzaktni hidrogeološki podaci i sproveda hidrogeološka analiza nestabilnog područja i njegove okoline. Pored ovih radova, radi preciznijeg definisanja položaja klizne ravni i tela klizišta, predlaže se izvođenje geofizičkog skeniranja terena.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] (2025). Dopunski rudarski projekat otkopavanja površinskog kopa Južni revir u Rudniku bakra Majdanpek za godišnji kapacitet otkopavanja rude od 9,9 Mt/god. Bor: Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor.
- [2] (2023). Uprošćeni rudarski projekat I faze sanacije klizišta na istočnoj strani površinskog kopa južni revir RBM u delu od K+565 do K+500. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet Beograd.
- [3] (2020). Izveštaj o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu „Južni Revir“ u Majdanpeku. Bor: Institut za rudarstvo i metalurgiju.
- [4] Kržanović, D., Jovanović, M., Rajković, R., Mikić, M., & Gomilanović, M. (2024). Analysis of the impact of landslide rehabilitation in the eastern part of the open pit Južni revir on the economy of the Majdanpek copper mine. The 54th International October Conference on Mining and Metallurgy, 18-21 October 2024, Hotel Derdap, Kladovo, Serbia, (pp. 27-32).
- [5] Kržanović, D., Jovanović, M., Rajković, R., Mikić, M., & Gomilanović, M. (2025). Analiza odstupanja optimalne konture površinskog kopa usled delovanja prirodnih faktora i njegov uticaj na ekonomske performanse eksploatacije. „Rudarstvo 2015“ – 16. Simpozijum sa međunarodnim učešćem – održivi razvoj u rudarstvu i energetici, 27-30 maj 2025, Vrnjačka banja, Srbija. (pp. 82-90). <https://doi.org/10.30544/rudar8>
- [6] (2023). MS Mine Slope Radar Online Monitoring and Analysis Monthly Report April 2023. China Academy of Safety Science and Technology.
- [7] Rajković, R., Kržanović, D., Mikić, M., Jovanović, M., & Milutinović, S. (2024). 3D modeli u funkciji projektovanja zemljanih radova. „Rudarstvo 2024“ - 15. Simpozijum sa međunarodnim učešćem - Održivi razvoj u energetici i rudarstvu. 21.–24. maj 2024, Vrnjačka banja, Srbija. (pp. 196-201).

- [8] Rajković, R., Marinković, V., & Lekovski, R. (2011). Digital 3D terrain model. *Mining engineering*, 3, 25-40.
- [9] Marinković, V., Rajković, R., Kržanović, D., Pačkovski, G., & Mitić, D. (2009). 2D i 3D modeli, sličnosti i razlike. *Bakar*, 34(1). 1-8.

UDK: 622.271.3/.33(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2502043T

NAUČNI RAD

Oblast: Inženjerstvo zaštite životne sredine

Primljen: 28.10.2025.

Prerađen: 12.11.2025.

Prihvaćen: 14.11.2025.

**ISPITIVANJE SEZONSKIH PROMENA KONCENTRACIJA
SUSPENDOVANIH ČESTICA U STANOVIMA U BORU**

**INVESTIGATION OF SEASONAL CHANGES IN SUSPENDED
PARTICLE CONCENTRATIONS IN APARTMENTS IN BOR**

Viša Tasić^{1a}, Dušan Topalović², Bojan Radović^{1b}, Vladan Kamenović^{1c},
Renata Kovačević^{1d}, Zvonko Damjanović³

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Bor

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

³Građanska čitaonica Evropa, Bor, Bor

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

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

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

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

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

³ E-mail: office@kcbor.net, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0600-3988>

Izvod

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja sezonskih promena koncentracija suspendovanih čestica frakcija PM_{10} i $PM_{2.5}$ u 15 stanova u Boru u periodu februar - jun 2025. godine. Merenje koncentracija suspendovanih čestica vršeno je u trajanju od po 45 dana u grejnoj (februar - mart) i negrejnoj sezoni (maj - jun). Upoređivane su srednje vrednosti koncentracija suspendovanih čestica PM_{10} i $PM_{2.5}$ koje su izmerene u stanovima. U toku grejne sezone prosečne koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ u stanovima iznosile su $18.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respektivno. U negrejnoj sezoni prosečne koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ u stanovima iznosile su $19.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i $11.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Srednja vrednost koeficijenta korelacije (Pearson) između koncentracija PM_{10} u stanovima i u vazduhu ambijenta ne razlikuje se značajno u grejnoj (0.33) u odnosu na negrejnu sezonu (0.27). Isto se može reći i za srednju vrednost koeficijenta korelacije između koncentracija $PM_{2.5}$ u stanovima i u vazduhu ambijenta u grejnoj (0.51) i negrejnoj sezoni (0.47). Rezultati poređenja koncentracija PM izmerenih u stanovima u Boru i u vazduhu ambijenta ukazuju na to da nema značajnih sezonskih promena koncentracija PM u stanovima, te da je infiltracija PM iz spoljašnje sredine u unutrašnjost stanova dominantan izvor suspendovanih čestica u posmatranim stanovima. U pojedinim stanovima izražene su epizode emisija suspendovanih čestica poreklom od kuvanja, i resuspenzije čestica usled čišćenja prostorija, međutim, i pored toga, u posmatranim stanovima nije zabeležena pojava prekoračenja graničnih vrednosti propisanih za srednje dnevne koncentracije suspendovanih čestica frakcija PM_{10} i $PM_{2.5}$.

Ključne reči: suspendovane čestice, kvalitet vazduha, monitoring, stanovi, korelacije

Abstract

This study presents the results of seasonal variation analyses of suspended particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) concentrations measured in 15 residential apartments in the city of Bor, Serbia, during the period from February to June 2025. Measurements were conducted over 45-day intervals during both the heating season (February–March) and the non-heating season (May–June). The average concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ measured indoors were compared between these two periods. During the heating season, the mean PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations were $18.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, while in the non-heating season, they averaged $19.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $11.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The average Pearson correlation coefficients between indoor and outdoor PM_{10} concentrations were 0.33 in the heating season and 0.27 in the non-heating season, showing no significant seasonal difference. Similarly, the average correlation coefficients for $PM_{2.5}$ concentrations were 0.51 and 0.47, respectively. The results indicate that there were no substantial seasonal variations in indoor PM concentrations, suggesting that infiltration from outdoor air remains the dominant source of indoor particulate matter. Occasional short-term increases in PM levels were observed, primarily due to cooking or particle re-suspension during cleaning activities; however, none of the recorded indoor concentrations exceeded the prescribed daily limit values for PM_{10} and $PM_{2.5}$.

Keywords: suspended particulate matter, air quality, monitoring, indoor environment, correlations

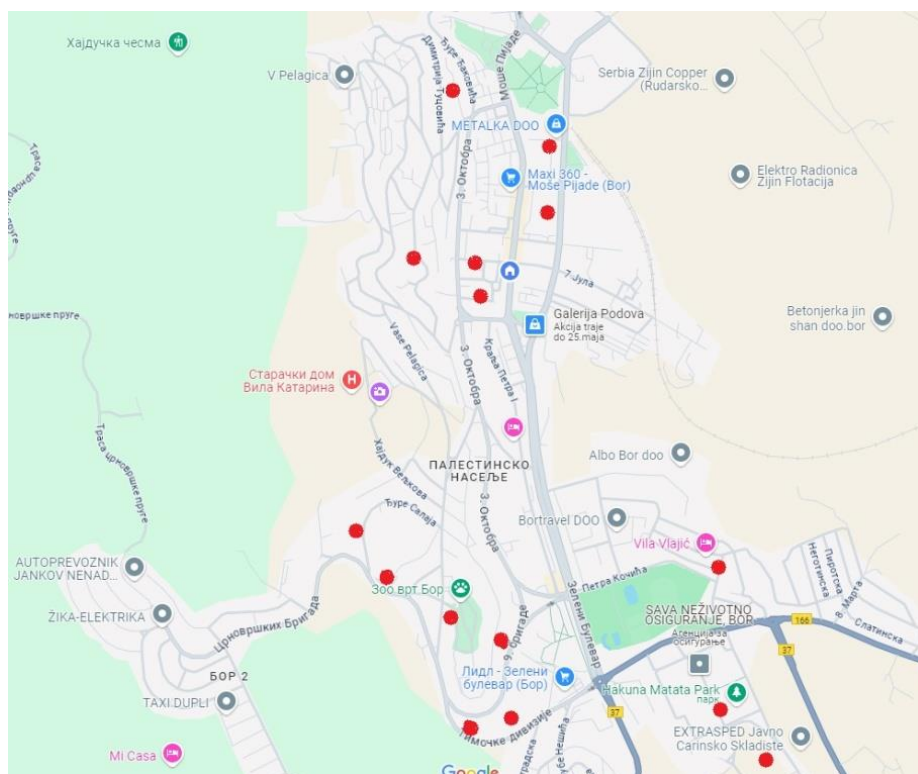
1. UVOD

Kvalitet vazduha u zatvorenom prostoru postao je jedno od ključnih pitanja savremenog života, budući da ljudi najveći deo dana provode u zatvorenom prostoru, često nesvesni prisustva potencijalno štetnih materija u vazduhu. Unutrašnji vazduh može sadržati stotine hemijskih jedinjenja različitog porekla i toksičnosti, uključujući i one sa dokazanim kancerogenim efektima. Među njima, suspendovane čestice (PM) imaju posebno značajnu ulogu, jer predstavljaju prenosioce hemijskih supstanci koje lako dospevaju u respiratorni sistem. Dok se veće čestice zadržavaju u gornjim disajnim putevima, fine ($PM_{2.5}$) i ultrafine čestice mogu prodrati duboko u pluća i krvotok, izazivajući brojne negativne zdravstvene efekte [1-3]. Na kvalitet unutrašnjeg vazduha utiču različiti faktori, od infiltracije spoljašnjih zagađivača do aktivnosti stanara, poput kuvanja, čišćenja ili pušenja, kao i emisija iz građevinskih i dekorativnih materijala. U gradu Boru, poznatom po rudarskoj i metalurškoj industriji, značajan izvor spoljašnjih suspendovanih čestica potiče od površinskih kopova, flotacijskih jalovišta i emisija iz postrojenja za topljenje bakra [4-7]. U okviru projekta *Joint research on air quality in our apartments*, koji zajednički realizuju Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor i Građanska čitaonica Evropa Bor, sprovodi se merenje koncentracija PM_{10} i $PM_{2.5}$ u odabranim domaćinstvima. Cilj projekta je da se utvrdi odnos između unutrašnjih i spoljašnjih koncentracija PM, kao i uticaj aktivnosti stanara na promene u kvalitetu unutrašnjeg vazduha. Istraživanje obuhvata ukupno 60 stanova na teritoriji Bora, a merenja se sprovode tokom grejne i negrejne sezone uz pomoć prenosnih PM monitora koji koriste optički princip merenja. Pre terenskih

merenja, vrši se provera svakog PM monitora poređenjem sa referentnim gravimetrijskim metodama radi provere tačnosti i pouzdanosti rezultata [8-9].

2. MATERIJAL I METODE

Ovaj rad prikazuje rezultate kampanje merenja koncentracija suspendovanih čestica PM_{10} i $PM_{2.5}$ u 15 stanova u gradu Boru, u periodu od 1. marta do 17. juna 2025. godine. Na slici 1 prikazane su lokacije odabranih stanova na karti grada Bora. Osam stanova od ukupno 15 ima PVC stolariju, dok je preostalih sedam sa drvenom stolarijom.



Sl. 1. Lokacije 15 odabranih stanova na karti grada Bora
(označene crvenim tačkama)[13]



Sl. 2. *PM monitor postavljen u stanu*

U svakom stanu postavljen je automatski PM monitor [9] koji omogućava kontinuirano praćenje koncentracija PM_{10} i $PM_{2.5}$, kao i unutrašnje temperature i relativne vlažnosti. Uređaji beleže prosečne vrednosti svakog minuta, a za potrebe analize korišćeni su satni proseci. Pre instalacije u stanove, svi PM monitori su testirani u laboratorijskim uslovima Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor kako bi se proverila preciznost i pouzdanost merenja. Tokom kalibracije, dobijeni rezultati sa uređaja upoređeni su sa rezultatima referentne gravimetrijske metode, kako bi se identifikovala odstupanja i izvršile potrebne korekcije.

Za poređenje sa koncentracijama PM u stanovima korišćeni su podaci sa automatske merne stanice (AMS) Bor-Gradski park. Na ovoj stanici, koncentracije PM se prate automatskim analizatorom Grimm EDM 180, a satne srednje vrednosti PM dostupne su na zvaničnoj internet stranici Agencije za zaštitu životne sredine Republike Srbije (SEPA): (<https://sepa.gov.rs>).

3. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

Srednje vrednosti koncentracija PM koje su izmerene u stanovima prikazane su u tabeli 1 (grejna sezona) i u tabeli 2 (negrejna sezona). U toku kampanja merenja nije zabeleženo prekoračenje dnevnih graničnih vrednosti za koncentracije PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) i $PM_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ni u jednom od posmatranih stanova.

Tabela 1. Srednje vrednosti PM koncentracija, srednji odnos unutra/spolja (I/O) i koeficijenti korelacije unutra/spolja (I/O) tokom kampanje merenja u grejnoj sezoni, kao i tip stolarije u svakom stanu

R.B.	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM_{10} I/O	$PM_{2.5}$ I/O	PM_{10} I/O corr. coef.	$PM_{2.5}$ I/O corr. coef.	Tip stolarije: drvena/PVC
1	18.2	12.9	0.58	0.73	0.36	0.64	drvena
2	16.5	12.5	0.53	0.71	0.45	0.60	pvc
3	16.6	12.1	0.53	0.79	0.35	0.55	drvena
4	23.2	12.0	0.74	0.68	0.22	0.42	pvc
5	17.6	11.9	0.56	0.67	0.40	0.68	drvena
6	16.1	11.3	0.51	0.64	0.25	0.36	drvena
7	20.8	17.0	0.66	0.97	0.27	0.31	pvc
8	12.9	9.1	0.41	0.52	0.40	0.48	pvc
9	16.0	9.4	0.51	0.53	0.27	0.34	drvena
10	25.0	14.1	0.80	0.80	0.45	0.60	pvc
11	18.3	12.4	0.58	0.71	0.40	0.61	drvena
12	16.2	11.1	0.52	0.63	0.45	0.55	pvc
13	16.3	9.8	0.52	0.56	0.20	0.52	pvc
14	19.1	13.5	0.61	0.77	0.22	0.46	pvc
15	20.1	11.1	0.64	0.63	0.32	0.53	drvena
Average	18.2	12.0	0.58	0.69	0.33	0.51	
Min	12.9	9.1	0.41	0.52	0.20	0.31	
Max	25.0	17.0	0.80	0.97	0.45	0.68	
Stdev	3.1	2.0	0.10	0.12	0.09	0.11	

Srednje vrednosti koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ u vazduhu ambijenta tokom kampanje merenja u grejnoj sezoni iznosile su $31.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i $17.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respektivno. Na osnovu toga proizilazi da je srednja vrednost odnosa koncentracija $PM_{2.5}$ i PM_{10} u ambijentalnom vazduhu tokom kampanje merenja u grejnoj sezoni iznosila 0.56, što je u dobroj saglasnosti sa rezultatima objavljenim u ranijem periodu [9]. Rezultati prikazani u Tabeli 1 ukazuju na to da su koncentracije PM u analiziranim stanovima u Boru tokom grejne sezone pretežno bile pod uticajem infiltracije čestica iz spoljašnje sredine, kao i povremenih aktivnosti stanara, poput kuvanja i čišćenja prostorija. Prosečni I/O odnosi od 0.58 za PM_{10} i 0.69 za $PM_{2.5}$

zajedno sa višim prosečnim koeficijentima korelacije (Pearson) za $PM_{2.5}$ ($r = 0.51$) u poređenju sa PM_{10} ($r = 0.33$), ukazuju na efikasnije prodiranje finijih čestica u unutrašnji prostor stanova u odnosu na krupne čestice.

Tabela 2. Srednje vrednosti PM koncentracija, srednji odnos unutra/spolja (I/O) i koeficijenti korelacije unutra/spolja (I/O) tokom kampanje merenja u negrejanjoj sezoni, kao i tip stolarije u svakom stanu

R.B.	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	PM_{10} I/O	$PM_{2.5}$ I/O	PM_{10} I/O corr. coef.	$PM_{2.5}$ I/O corr. coef.	Tip stolarije: drvena/PVC
1	13.6	10.6	0.68	1.08	0.31	0.36	drvena
2	17.8	11.6	0.89	1.18	0.33	0.53	pvc
3	17.4	12.8	0.87	1.31	0.20	0.52	drvena
4	24.0	11.0	1.20	1.13	0.23	0.45	pvc
5	21.1	10.9	1.05	1.11	0.34	0.58	drvena
6	14.3	8.9	0.72	0.82	0.30	0.42	drvena
7	25.4	16.1	1.27	1.65	0.27	0.31	pvc
8	22.0	11.0	1.10	1.13	0.33	0.50	pvc
9	15.4	7.9	0.77	0.81	0.31	0.39	drvena
10	21.2	9.7	1.06	0.90	0.25	0.36	pvc
11	16.4	9.9	0.82	1.01	0.31	0.54	drvena
12	14.2	8.8	0.71	0.90	0.29	0.56	pvc
13	22.8	11.3	1.14	1.15	0.13	0.33	pvc
14	23.4	14.4	1.17	1.47	0.27	0.60	pvc
15	23.5	11.3	1.18	1.16	0.25	0.56	drvena
Average	19.5	11.1	0.97	1.12	0.27	0.47	
Min	13.6	7.9	0.68	0.81	0.13	0.31	
Max	25.4	16.1	1.27	1.65	0.34	0.60	
Stdev	4.1	2.1	0.20	0.23	0.06	0.10	

Ambijentalne koncentracije PM_{10} i $PM_{2.5}$ tokom kampanje merenja u negrejanjoj sezoni iznosile su $20.0 \mu g/m^3$ i $9.8 \mu g/m^3$, respektivno. Iz toga proizilazi da je srednja vrednost odnosa koncentracija $PM_{2.5}$ i PM_{10} u ambijentalnom vazduhu 0.49, što je u dobroj saglasnosti sa rezultatima objavljenim u radu [7].

Rezultati prikazani u tabeli 2 ukazuju na to da su koncentracije PM u analiziranim stanovima u Boru tokom negrejne sezone pretežno bile pod uticajem infiltracije spoljašnjih čestica, kao i povremenih aktivnosti stanara, poput kuvanja i čišćenja prostorija. Srednja vrednost I/O odnosa od 0.97 za PM_{10} i 1.12 za $PM_{2.5}$, zajedno sa višom vrednošću koeficijenta korelacije za $PM_{2.5}$ ($r = 0.47$) u poređenju sa PM_{10} ($r = 0.27$), ukazuju na efikasnije prodiranje finijih čestica u unutrašnji prostor stanova u odnosu na krupne čestice. U većini posmatranih stanova u negrejanjoj sezoni nije bilo značajnih unutrašnjih izvora PM. U stanovima 3, 4, 7 i 14 usled neadekvatnog provetravanja (3, 7), češće

aktivnosti kuvanja (14), korišćenja ovlaživača vazduha (4), i čišćenja stana (7) doprinele su povećanju prosečnih koncentracija PM tako da je u navedenim stanovima odnos I/O koncentracija PM u negrejnoj sezoni značajno viši u odnosu na ostale posmatrane stanove.

4. ZAKLJUČAK

Rezultati istraživanja koncentracija suspendovanih čestica PM₁₀ i PM_{2.5} u stanovima u Boru tokom grejne i negrejne sezone pokazuju da ne postoje značajne sezonske razlike u nivoima ovih zagađujućih materija u zatvorenom prostoru. U proseku, koncentracije PM₁₀ i PM_{2.5} bile su nešto više u negrejnem periodu, ali razlike nisu statistički značajne. Dobijene vrednosti koeficijenta korelacije između unutrašnjih i spoljašnjih koncentracija PM ukazuju na to da je infiltracija čestica iz spoljašnje sredine dominantan izvor suspendovanih čestica u posmatranim stanovima tokom cele godine.

Više vrednosti korelacije i odnosa I/O za PM_{2.5} u poređenju sa PM₁₀ potvrđuju da fine čestice lakše prodiru u unutrašnji prostor, što je u skladu sa njihovom veličinom i difuzionim osobinama. Povremeni porast koncentracija PM unutar stanova uglavnom su povezani sa aktivnostima stanara, kao što su kuvanje, čišćenje i korišćenje uređaja koji podižu čestice prašine, ali ni u jednom slučaju nije zabeleženo prekoračenje graničnih dnevnih vrednosti propisanih za PM₁₀ i PM_{2.5}.

Dobijeni rezultati ukazuju na potrebu za daljim istraživanjima usmerenim ka identifikaciji faktora koji utiču na razlike u stepenu infiltracije čestica, naročito u kontekstu različitih tipova stolarije, ventilacije i lokacije stanova u odnosu na izvore spoljašnjeg zagađenja. Takva istraživanja doprinela bi boljem razumevanju dinamike kretanja suspendovanih čestica između spoljašnjeg i unutrašnjeg okruženja i unapređenju strategija zaštite kvaliteta vazduha u zatvorenom prostoru.

ZAHVALNICA

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

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

LITERATURA

- [1] Gladović, A., Petrović, B., Vukelić, D., Buha Djordjević, A., Ćurčić, M., Đukić-Ćosić, D., Šoštarić, A., Antonijević, B., & Bulat, Z. (2023). Carcinogenic and human health risk assessment of children's and adults' exposure to toxic metal(oid)s from air PM₁₀ in critical sites of the Republic of Serbia. **Environmental Science and Pollution Research**, 30(22), 61753–61765. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26375-w>
- [2] Diapouli, E., Chaloulakou, A., & Spyrellis, N. (2008). Indoor and outdoor PM concentrations at a residential environment, in the Athens area, Global NEST Journal, 10, 201-208. https://journal.gnest.org/sites/default/files/Journal%20Papers/201-208_553_Diapouli_10-2.pdf
- [3] Pekey, B., Bozkurt, Z.B., Pekay, H., Dogan, G., Zararsiz, A., Efe, N. & Tuncel G. (2010). Indoor/outdoor concentrations and elemental composition of PM₁₀/PM_{2.5} in urban/industrial areas of Kocaeli City, Turkey, Indoor Air, 20, 112-125. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00628.x>
- [4] Radović, B., Tasić, V., Kovačević, R., Apostolovski-Trujić, T., Manojlović, D., Cocić, M., & Urošević, T. (2024). Chemical composition of PM₁₀ in a classroom near the copper smelter in Bor, Serbia. **Atmosphere**, 15(8), 920. <https://doi.org/10.3390/atmos15080920>
- [5] Serbula, S., Kalinovic, T., Kalinovic, J., & Ilic, A. (2013). Exceedance of air quality standards resulting from pyro-metallurgical reduction of copper: A case study, Bor (Eastern Serbia). **Environmental Earth Sciences**, 68(7), 1989–1998. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1886-6>
- [6] Tasić, V., Maluckov, B., Apostolovski-Trujić, T., Kovačević, R., Živković, M., & Lazović, I. (2015). Particulate Matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) Concentrations in Naturally Ventilated Offices in Bor, Serbia, Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection, 12(3), 279-288.
- [7] Tasić, V., Milošević, N., Kovačević, R., Jovašević-Stojanović, M., & Dimitrijević, M. (2012). Indicative levels of PM in the ambient air in the surrounding villages of the copper smelter complex, Bor, Serbia. **Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly**, 18(4), 643–652. <https://doi.org/10.2298/CICEQ111228109T>
- [8] Ramachandran, G., Adgate, J. L., Pratt, G. C., & Sexton, K. (2003). Characterizing indoor and outdoor 15-minute average PM_{2.5} concentrations in urban neighborhoods. *Aerosol Science and Technology*, 37, 33–45. <https://doi.org/10.1080/02786820300889>
- [9] Božilov, A., Tasić, V., Živković, N., Lazović, I., Blagojević, M., Mišić, N., & Topalović, D. (2022). Performance assessment of NOVA SDS011 low-cost PM sensor in various microenvironments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 595. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10290-7>

UDK: 622.333:628.539:614.715(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2502051S

NAUČNI RAD

Oblast: Inženjerstvo zaštite životne sredine/Termoenergetika

Primljen: 31.10.2025.

Prerađen: 16.12.2025.

Prihvaćen: 17.12.2025.

**TERMoeLEKTRANE U BOSNI I HERCEGOVINI I SRBIJI:
EMISIJE I TEHNOLOGIJE KONTROLE ZAGAĐENJA
NA PRIMERU TE STANARI**

**THERMAL POWER PLANTS IN BOSNIA AND HERZEGOVINA
AND SERBIA: EMISSIONS AND POLLUTION CONTROL
TECHNOLOGIES USING THE EXAMPLE OF
THE TTP STANARI**

Željko Simić¹

¹Elektreane Stanari (TE Stanari), Republika Srpska, Bosna i Hercegovina

¹E-mail: zeljko.simic@gmail.com, Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-3058-6813>

Izvod

Termoelektreane (TE) na ugalj čine osnovu elektroenergetskih sistema Bosne i Hercegovine (BiH) i Srbije, ali istovremeno predstavljaju najveće izvore emisija sumpor-dioksida, azotnih oksida, čvrstih čestica i ugljen-dioksida. Ove emisije značajno premašuju evropske granične vrednosti i otežavaju proces usklađivanja sa regulativama Evropske unije EU. Rad prikazuje stanje emisija u TE BiH i Srbije, s naglaskom na zastarelu tehnologiju sagorevanja i filtracije u većini postrojenja. Posebna pažnja posvećena je TE Stanari koja zahvaljujući sagorevanju uglja u fluidizovanom sloju i vrećastim filterima postiže emisije u skladu s EU standardima. Rezultati pokazuju da TE Stanari predstavlja primer dobre prakse u regionu i referentni model za modernizaciju drugih postrojenja. Na osnovu analize zaključuje se da je kombinacija energetske efikasnosti i savremenih sistema kontrole emisija jedini održivi put za smanjenje ekoloških posledica termoelektrarnog sektora.

Ključne reči: termoelektreane, emisije, SO₂, NO_x, CO₂, kontrola zagađenja, CFB tehnologija, vrećasti filteri, TE Stanari

Abstract

Coal-fired thermal power plants (TPPs) form the basis of the electric power systems of Bosnia and Herzegovina and Serbia, but at the same time they represent the largest sources of emissions of sulfur dioxide, nitrogen oxides, solid particles and carbon dioxide. These emissions significantly exceed EU limit values and complicate the process of alignment with EU environmental regulations. This paper examines the state of emissions in TPPs in Bosnia and Herzegovina and Serbia, with particular emphasis on outdated combustion and filtration technologies used in most facilities. Special attention is given to the TPP Stanari, which, thanks to the application of a circulating fluidized bed (CFB) boiler and fabric filters, achieves emission levels in line with EU standards. The findings suggest that TPP Stanari serves as an example of good practice in the region and a reference model for the modernization of other plants. It is concluded that the combination of energy efficiency and advanced emission control systems represents the only sustainable pathway for reducing the ecological consequences of the thermal energy sector.

Keywords: *thermal power plants, emissions, SO₂, NO_x, CO₂, pollution control, CFB technology, fabric filters, TPP Stanari*

1. UVOD

Termoelektrane (TE) na ugalj predstavljaju ključne stubove elektroenergetskih sistema Bosne i Hercegovine i Srbije. One obezbeđuju stabilno snabdevanje električnom energijom i značajan ekonomski doprinos, ali istovremeno nose i ozbiljne ekološke izazove. Najznačajniji problem su emisije štetnih materija – sumpor-dioksida (SO₂), azotnih oksida (NO_x), čvrstih čestica (PM₁₀ i PM_{2.5}) i ugljen-dioksida (CO₂) koje utiču na kvalitet vazduha, ljudsko zdravlje i globalne klimatske promene. Većina TE u regionu koristi zastarele tehnologije sagorevanja i filtracije, zbog čega redovno dolazi do prekoračenja graničnih vrednosti emisija u odnosu na zahteve EU direktiva i Nacionalnih planova smanjenja emisija (NERP). Većina TE u regionu koristi zastarele tehnologije što je posebno izraženo u TE Ugljevik, Gacko, TENT i Kostolac. S druge strane, primer TE Stanari pokazuje da primena savremenih tehnologija može značajno smanjiti emisije i omogućiti usklađivanje sa evropskim standardima. Zahvaljujući kombinaciji kotla sa cirkulacionim fluidizovanim slojem (CFB) i vrećastih filtera, ova elektrana ostvaruje znatno bolje rezultate u kontroli zagađenja u poređenju sa drugim postrojenjima u regionu. Cilj ovog rada je da prikaže emisije TE u BiH i Srbiji, analizira primenjene tehnologije kontrole zagađenja i istakne TE Stanari kao primer dobre prakse uvođenja inovativnih rešenja.

2. EMISIJE TERMOELEKTRANA U BIH I SRBIJI

Termoelektrane na ugalj u BiH i Srbiji ostaju najveći pojedinačni izvori emisija štetnih materija. Zbog oslanjanja na lignit i mrki ugalj, emisije SO₂ i CO₂ u ovim državama višestruko nadmašuju emisije iz drugih sektora. Prema izveštaju DERK, u BiH je 2023. godine emisija SO₂ iz TE iznosila preko 181.000 tona, pri čemu je najveći emiter bila TE Ugljevik (više od 97.000 tona) [1]. U Srbiji, podaci SEPA za 2023. godinu pokazuju emisije SO₂ od 326.000 tona i NO_x od 40.000 tona, dok su termoelektrane TENT i Kostolac najdominantniji izvori [2]. Ovi podaci jasno ukazuju da su zastarele tehnologije sagorevanja i nedovoljno efikasni sistemi za odsumporavanje glavni razlog ekološkog opterećenja [3]. Ukupne emisije CO₂ iz TE u BiH procenjuju se na oko 5,8 miliona tona godišnje, dok u Srbiji prelaze 26 miliona tona, što pokazuje razmere njihovog doprinosa klimatskim promenama. Posebno zabrinjava činjenica da se emisije u regionu i dalje kreću višestruko iznad granica propisanih Nacionalnim planovima smanjenja emisija (NERP), što ugrožava ispunjavanje obaveza u procesu pristupanja EU. NERP je obavezujući dokument Energetske zajednice kojim su BiH i Srbija od 2018. godine dužne

postupno smanjivati emisije SO₂, NO_x i praškastih materija iz TE, u skladu sa evropskim direktivama o industrijskim emisijama. Poređenja radi, emisije SO₂ iz TE u BiH i Srbiji su veće od ukupnih emisija istog zagađivača u svim državama članicama EU zajedno [3].

Tabela 1. Emisije termoelektrana u BiH i Srbiji (2022–2023) [1-3]

Država	Termoelektrana	SO ₂ (t)	NO _x (t)	CO ₂ (miliona tona)	Napomena
BiH	TE Ugljevik	≈97.000	n/p	≈2,0	Najveći pojedinačni emiter SO ₂ u BiH
BiH	TE Gacko	≈84.000	n/p	≈1,8	Visoke emisije zbog lignita sa visokim S
BiH	TE Tuzla	≈35.000	n/p	≈1,2	Emisije višestruko iznad NERP granica
BiH	TE Kakanj	≈18.000	n/p	≈0,8	Nedostatak FGD postrojenja
BiH	TE Stanari	<2000	<2000	≈1,0	Zahvaljujući CFB tehnologiji i filterima emisije u skladu s EU standardima
Srbija	TENT A i B (Obrenovac)	>130.000	≈15.000	≈15,0	Najveći izvor CO ₂ u Srbiji
Srbija	Kostolac B	≈90.000	≈7.000	≈5,0	Glavni izvor SO ₂ nakon TENT-a
Srbija	Kostolac A	≈35.000	n/p	≈2,0	Još uvek bez potpunog FGD
Srbija	Kolubara A	≈28.000	n/p	≈1,5	Starija postrojenja
Srbija	TE Morava	<5.000	n/p	<0,5	Manji emiter, ali bez modernih filtera

Legenda: n/p = nema podataka u javno dostupnim izveštajima (merenja nisu objavljena ili nisu razdvojena po jedinicama).

Prikazani podaci u tabeli 1 naglašavaju da TE u BiH i Srbiji i dalje ostvaruju emisije višestruko iznad granica propisanih NERP planovima, pri čemu dominiraju postrojenja u Ugljeviku, Gacku, TENT-u i Kostolcu. Ove disproporcije jasno pokazuju da će bez ubrzanog ulaganja u sisteme za odsumporavanje, denitrifikaciju i modernizaciju kotlova TE u BiH i Srbiji i dalje ostati među najvećim zagađivačima u jugoistočnoj Evropi. Ipak, izuzetak predstavlja TE Stanari, koja zahvaljujući CFB tehnologiji i savremenim

filterima održava emisije u skladu s EU standardima. Podaci za TE Stanari prikazani u tabeli 1 ($<200 \text{ mg/Nm}^3 \text{ SO}_2$ i $<200 \text{ mg/Nm}^3 \text{ NO}_x$) izraženi su u koncentracijama, a ne u ukupnim godišnjim tonama. Korišćena je formula: $\text{Emisija (t)} = \text{Koncentracija (mg/Nm}^3) * \text{Protok (Nm}^3/\text{h)} * \text{Radni sati (h)} / 1,000,000,000$. Poređenja radi, procenjena maksimalna godišnja emisija SO_2 iz TE Stanari iznosi <2.000 tona, što je značajno manje od emisija ostalih termoelektrana u regionu.

3. TEHNOLOGIJE KONTROLE EMISIJA U TERMOELEKTRANAMA

Termoelektrane u BiH i Srbiji primenjuju se različite tehnologije kontrole emisija:

- Elektrostatički filteri (ESP) – najrasprostranjeniji, ali efikasnost zavisi od sastava pepela i stabilnosti rada [4]. Rezultati istraživanja sprovedenih na TE Morava i TENT A pokazali su da primena savremenih visokofrekventnih napajanja elektrostatičkih filtera (VN VF) može smanjiti koncentraciju čvrstih čestica u dimnim gasovima gotovo četiri puta u poređenju sa konvencionalnim tiristorskim sistemima [5];
- Postrojenja za odsumporavanje dimnih gasova (FGD) – uvedena u pojedinim elektranama, ali često ne rade ili rade sa smanjenim kapacitetom [6]. Primer primene postrojenja za odsumporavanje dimnih gasova (FGD) predstavlja TE Ugljevik, gde je u saradnji sa japanskom agencijom JICA realizovan projekat ugradnje vlažnog krečnjačkog procesa, kojim se emisije SO_2 smanjuju na oko 200 mg/Nm^3 uz efikasnost uklanjanja od 99% [7];
- Vrećasti filteri (fabric filter) – efikasni za uklanjanje $>99\%$ praškastih čestica, sve češće zamena ili dopuna ESP sistemima [8,9];
- Kotao sa cirkulacionim fluidizovanim slojem (CFB) – najznačajnija inovacija u regionu, jer omogućava redukciju SO_2 i NO_x unutar samog procesa sagorevanja [10].

U praksi se često dešava da, iako TE poseduju određene sisteme za kontrolu emisija, njihova efikasnost nije uvek zadovoljavajuća zbog zastarele opreme ili neadekvatnog održavanja. Mnoge elektrane se oslanjaju isključivo na osnovne elektrostatičke filtere, dok modernije tehnologije kao što su FGD postrojenja, vrećasti filteri ili CFB kotlovi ostaju retkost. Posledica toga su visoke koncentracije SO_2 i čestica u dimnim gasovima, što negativno utiče na kvalitet vazduha i zdravlje stanovništva u okolini. S druge strane, uvođenje savremenih tehnologija u pojedinim postrojenjima pokazuje da je moguće značajno smanjiti emisije i postići standarde usklađene sa evropskim normama. Detaljan pregled primenjenih sistema kontrole emisija u različitim TE dat je u tabeli 2, gde se jasno vidi da TE Stanari koristi napredne tehnologije u poređenju sa većinom drugih postrojenja u BiH i Srbiji.

Tabela 2. *Sistemi kontrole emisija u termoelektranama BiH i Srbije [1,2,6,7,10,16]*

TE	Država	ESP (elektro- statički filter)	FGD (odsum- poravanje)	Vrećasti filter	CFB kotao	Napomena
TE Tuzla	BiH	✓	✗	✗	✗	Zastareli ESP, bez FGD
TE Kakanj	BiH	✓	✗	✗	✗	ESP, nema modernizacije
TE Ugljevik	BiH	✓	✓	✗	✗	FGD instaliran 2019, efikasnost ~99%
TE Gacko	BiH	✓	✗	✗	✗	Samo ESP, bez FGD
TE Stanari	BiH	✗	✗	✓	✓	Savremena tehnologija (CFB + vrećasti filteri)
TENT A/B (Obrenovac)	Srbija	✓	✗	✗	✗	Najveći izvor SO ₂ , plan FGD
Kostolac A	Srbija	✓	✗	✗	✗	ESP, bez potpunog FGD
Kostolac B	Srbija	✓	✓	✗	✗	FGD postrojenje od 2017. (~95% redukcija SO ₂)
Kolubara A	Srbija	✓	✗	✗	✗	Stara postrojenja, samo ESP
TE Morava	Srbija	✓	✗	✗	✗	Manja TE, samo ESP

Legenda: ✓ = koristi sistem; ✗ = ne koristi.

Tabela 2 jasno pokazuje da TE u BiH i Srbiji dominantno koriste elektrostatičke filtere (ESP), dok je primena modernijih sistema poput FGD postrojenja, vrećastih filtera i CFB kotlova i dalje ograničena na manji broj postrojenja. Nedostatak ujednačene primene ovih tehnologija glavni je razlog visokih emisija SO₂ i čvrstih čestica u BiH i Srbiji.

4. PRIMENA CFB TEHNOLOGIJE SAGOREVANJA U TE STANARI

Kotao sa cirkulacionim fluidizovanim slojem u TE Stanari projektovan je za sagorevanje stanarskog lignita niske toplotne vrednosti (LCV 9,1 MJ/kg) sa visokim sadržajem vlage od 49%, čime se osigurava stabilan rad i visok stepen iskorišćenja i pri gorivima slabijeg kvaliteta [11]. CFB kotao radi na temperaturama od oko 850–900°C, što je znatno niže od konvencionalnih kotlova. Zahvaljujući tome, formiranje NO_x se značajno smanjuje. U ložište kotla ubacuje se inertni sloj koji čine kvarcni pesak i krečnjak (CaCO₃). Tokom sagorevanja krečnjak se razlaže i oslobađa kalcijum-oksidi (CaO), koji hemijski vezuje SO₂ pri čemu nastaje gips (CaSO₄). Stvoreni CaSO₄ ima veću specifičnu

zapreminu od kristala (CaO), usled čega dolazi do smanjenja poroznosti čestice [12]. Učinkovitost hvatanja SO₂ u CFB kotlovima u velikoj meri zavisi od reaktivnosti i mikrostrukture sorbenata, pri čemu slabije reaktivni krečnjaci povećavaju potrošnju sirovine i količinu nastalih ostataka, što se direktno odražava na troškove i emisije CO₂ [13]. Ovaj proces omogućava „in-situ“ desumporizaciju bez potrebe za dodatnim FGD postrojenjem. In-situ desumporizacija označava proces u kojem se sumpor-dioksid (SO₂) uklanja direktno tokom sagorevanja uglja u ložištu kotla, dodavanjem sorbenta (najčešće krečnjaka – CaCO₃). Na ovaj način se vezivanje sumpora odvija unutar samog procesa sagorevanja, za razliku od post-kombustionih metoda, gde se SO₂ uklanja naknadno u zasebnom postrojenju za odsumporavanje dimnih gasova (FGD). Efikasno sagorevanje i recirkulacija čestica doprinose boljem iskorišćenju goriva i nižim specifičnim emisijama CO₂ po proizvedenoj jedinici energije. Zahvaljujući tome, TE Stanari se bitno razlikuje od drugih termoelektrana u BiH i Srbiji koje i dalje koriste zastarele tehnologije. Rad CFB kotla može se opisati jednačinom materijalnog bilansa sloja, gde se promene masenog udela čestica različitih frakcija određuju protokom pepela iz goriva, letećeg i pepela sa dna kotla te procesima habanja materijala sloja [14]:

$$M = \frac{dX_i}{dt} = m_{fs(i)} - m_{fa(i)} - m_{ba(i)} + m_{att(i)}$$

gde je:

- M – ukupna masa sloja (kg),
- X_i – maseni udeo materijala sloja klase i ,
- $m_{fs(i)}$ – maseni protok čestica pepela iz uglja klase i (kg/s),
- $m_{fa(i)}$ – maseni protok letećeg pepela klase i (kg/s),
- $m_{ba(i)}$ – maseni protok pepela sa dna kotla klase i (kg/s),
- $m_{att(i)}$ – promena masenog protoka sloja klase i usled habanja/atricije (kg/s).

Pored visokog stepena redukcije emisija, CFB tehnologija omogućava korišćenje širokog spektra goriva, uključujući lignit nižeg kvaliteta, čime se povećava fleksibilnost rada termoelektrane i smanjuju ukupni troškovi emisijne kontrole [15].

5. VREĆASTI FILTERI I KONTROLA ČVRSTIH ČESTICA U TE STANARI

Pored CFB kotla, TE Stanari je opremljena i vrećastim (fabric) filterima koji omogućavaju uklanjanje više od 99% praškastih materija. Na taj način koncentracija čvrstih čestica u dimnim gasovima održava se na nivou ispod 30 mg/Nm³, što je potpuno usklađeno sa EU standardima [16]. Prednost vrećastih filtera je u tome što osiguravaju stabilne performanse, ne zavise od sastava

goriva i doprinose poboljšanju kvaliteta vazduha i zdravlja lokalnog stanovništva.

Tabela 3. Tehničke karakteristike vrećastih filtera u TE Stanari [16]

Br.	Stavka	Jedinica	Lignit (referentni, garantovani)	Standardni najlošiji ugalj
1.	Protok dimnih gasova (sa dodatkom od 10%)	m ³ /s	343	374
2.	Temperatura dimnih gasova	°C	158	168.5
3.	Količina prašine na ulazu	g/Nm ³	16	30
4.	Količina prašine na izlazu	mg/Nm ³	≤30	≤30
5.	Efikasnost	%	≥99.938	
6.	Otpor	Pa	≤1200	
7.	Broj vreća po filteru (dva korišena filtera)	-	7200	
8.	Prečnik vreća	mm	ø135	
9.	Dužina vreća	mm	8150	
10.	Materijal vreća za filter	-	PTFE (Polytetrafluoroethylene, poznatiji kao Teflon)	
11.	Broj (i dimenzije) levkova	-	8/liniji (6.63*6.555*5400)	
12.	Ugao ivica levka u odnosu na vertikalu	°	30	
13.	Količina vazduha pod pritiskom za otresanje	m ³ /min	12	
14.	Strujanje dimnih gasova prema vrećama	-	Sa strane (bočno)	
15.	Max. emisija buke koju emituje vrećasti filter merena sa rastojanja od 1m	dB	80	

Podaci iz tabele 3 pokazuju da vrećasti filteri u TE Stanari obezbeđuju izuzetno visoku efikasnost (≥99,9%) u uklanjanju praškastih materija, uz održavanje emisije čestica ispod 30 mg/Nm³, što je u potpunosti usklađeno sa evropskim standardima. Tehničke karakteristike, uključujući veliki broj filter vreća, upotrebu PTFE materijala i sistem otresanja komprimovanim vazduhom, potvrđuju stabilnost i dugotrajnost rada ovih filtera. Važno je napomenuti da savremeni vrećasti filteri, poput onih primenjenih u TE Stanari, odlikuju se dvostrukim usmeravanjem toka dimnih gasova, čime se sprečava njihova readsorpcija i obezbeđuje ujednačena raspodela prašine po komorama, uz visok stepen pouzdanosti i jednostavno održavanje [17].

6. STUDIJA SLUČAJA – TE STANARI KAO PRIMER DOBRE PRAKSE

Kombinacija CFB tehnologije i vrećastih filtera čini integrisani sistem kontrole emisija koji pokriva sve ključne zagađujuće materije: SO₂, NO_x, CO₂ i PM. Rezultati pokazuju da TE Stanari postiže znatno niže emisije od drugih termoelektrana u BiH i Srbiji, posebno u pogledu sumpor- dioksida i čvrstih čestica. Za razliku od postrojenja u Ugljeviku, Gacku, TENT-u i Kostolcu, gde emisije višestruko prelaze propisane vrednosti, TE Stanari se može smatrati modelom dobre prakse. Posebna vrednost ovog sistema ogleda se u tome što se odsumporavanje odvija in situ, unutar samog procesa sagorevanja, čime se izbegava potreba za dodatnim FGD postrojenjem i smanjuju operativni troškovi. Uz to, fleksibilnost CFB kotla omogućava sagorevanje lignita nižeg kvaliteta sa visokom vlažnošću, uz održavanje stabilnog rada i visokog stepena energetske efikasnosti.

Vrećasti filteri obezbeđuju zadržavanje više od 99,9% čvrstih čestica, zahvaljujući čemu koncentracije prašine na izlazu iz postrojenja ostaju ispod 30 mg/Nm³, što je značajno ispod važećih evropskih standarda. Ovakav rezultat stavlja TE Stanari u poziciju jedine TE u BiH i regionu koja već sada ispunjava ključne zahteve Direktive o industrijskim emisijama EU. Zbog kombinacije tehnološke efikasnosti, nižih emisija i usklađenosti sa evropskim regulativama, TE Stanari se može posmatrati ne samo kao primer dobre prakse u BiH, već i kao referentni model za širu regiju.

Dodatnu vrednost predstavlja i činjenica da je kompanija DEC, koja je projektovala i izgradila termoelektranu, izradila tehničku dokumentaciju o upravljanju letećim pepelom, čime je još u fazi planiranja predviđeno odgovorno postupanje sa nusproizvodima sagorevanja i njihovo usklađivanje sa ekološkim zahtevima [18]. Osim toga, Elektrane Stanari, odnosno EFT-RiTE Stanari (tadašnji naziv) su za svoj leteći pepeo dobili Sertifikat o usaglašenosti, kojim je potvrđeno da je ovaj nusproizvod pogodan za upotrebu u građevinskoj industriji kao dodatak betonu [19].

7. ZAKLJUČAK

Analiza pokazuje da su termoelektrane u BiH i Srbiji i dalje glavni izvori emisija štetnih materija, ali da primena novih tehnologija može značajno promeniti ekološki bilans. TE Stanari dokazuje da integracija CFB kotla i vrećastih filtera omogućava istovremeno očuvanje energetske sigurnosti i ispunjavanje ekoloških standarda Evropske unije. Jednostavnije rečeno, iako inicijalna ulaganja u CFB tehnologiju i vrećaste filtere predstavljaju značajan finansijski izdatak, dugoročna analiza troškova pokazuje da se ova investicija isplati kroz smanjene troškove emisijskih naknada i povećanu energetske efikasnost, što čini projekat ekonomski održivim na duže staze. Ovakav pristup

predstavlja putokaz i za modernizaciju postojećih termoelektrana u regionu. Uvođenje savremenih tehnologija u druge elektrane omogućilo bi smanjenje emisija na nivoe prihvatljive za EU, čime bi se smanjio pritisak na životnu sredinu i javno zdravlje. Time se pokazuje da ekološka održivost i energetska bezbednost ne moraju biti suprotstavljeni ciljevi već komplementarne dimenzije razvojne politike.

LITERATURA

- [1] DERK – Državna regulatorna komisija za električnu energiju. (2019). Izvještaj o radu za 2019. godinu. Tuzla, str. 80–81.
- [2] SEPA – Agencija za zaštitu životne sredine. (2023). Izvještaj o stanju životne sredine u Srbiji za 2023. godinu. Beograd, str. 79–82.
- [3] CEE Bankwatch Network. (2024). Uskladiti ili zatvoriti: Šest godina smrtonosnih prekršaja koje prave termoelektrane na Zapadnom Balkanu. Prag, str. 10–14.
- [4] Radić, M. D., & Petković, D. M. (2014). Elektrostatički filteri. Fakultet zaštite na radu, Niš, str. 33–37.
- [5] Despotović, V., Ž., Vukosavić, N., S., & Popov, Z., N. (2015). Uređaji energetske elektronike za smanjenje emisija čvrstih čestica na termoelektranama. Konferencija: "Informacione tehnologije- razvoj i primena u unapređenju životne sredine" - IT EKO 2015 (str. 1-14). Beograd.
- [6] Malović, Z., & Milanović, Ž. (2020). Projekat ODG postrojenja u Termoelektrani Ugljevik, Zbornik radova, Regionalni simpozijum o planiranju kvaliteta zraka u gradovima, (str. 266-276). Sarajevo: Udruženje Konsultanata Inženjera Bosne i Hercegovine.
- [7] RERI. Desulphurisation in the Western Balkans: Kostolac TPP. Beograd, str. 4–8.
- [8] Cheremisionoff, P. N. (2002). Handbook of Air Pollution Prevention and Control. Butterworth- Heinemann, Woburn, MA, pp. 239–246.
- [9] Liu, H., Chen, J., Yu, L., Wu, L., Zhao, L., Guo, Y., Liang, J., Cui, Y., & Liu, X. (2023). Energy efficiency investigation of fabric filter and electrostatic- fabric integrated precipitator in coal- fired power plants in China. *Energy Science & Engineering*, 11(10), 3655–3668.
- [10] Bačić, B. (2018). Ispitivanje uticaja parametara u ložištu kotla sa cirkulacionim fluidizovanim slojem TE Stanari na emisiju SO₂ i NO_x. Interni stručni rad, EFT Stanari, str. 46–53.

-
- [11] Steinmüller Engineering. (2015). CFB Boiler for TPP Stanari, Owner's Engineering for CFB Boiler Island, Consulting and Engineering Services, Gummersbach, str. 1-3.
 - [12] Oka, N. S., (1994). Sagorevanje u fluidizovanom sloju, procesi i primena. Jugoslovensko društvo termičara, Beograd, str. 475-480.
 - [13] Smith, I., M. (2007). Properties and behaviour of SO₂ adsorbents for CFBC. IEA Clean Coal Centre, London, pp. 22-23.
 - [14] Ryabov, G. A., & Folomeev, O. M. (2019). The Change in Bed Materials Size Distribution and its Effect on CFB Boiler Operation, 9th International Symposium on Coal Combustion (ISCC-9), (1-12) Qingdao, China.
 - [15] Melamane, G. (2021). Circulating Fluidised Bed – for emissions reduction, SANEDI - South African National Energy Development Institute, Sandton, pp. 1-4.
 - [16] Institut za zaštitu i ekologiju Republike Srpske. (2020). Izvještaj o mjeranju emisija zagađujućih materija u vazduhu iz TE Stanari. Banja Luka, str. 16–22.
 - [17] Feido, E. (2007). Introduction of FF (Fabric Filter) Technology, Flue Gas System. Zhejiang Feida Environmental Engineering Co. Ltd, Zhuji, China, pp. 2-5.
 - [18] DEC – Dongfang Electric Corporation Limited. (2014). Ash handling plant fly ash handling system description, EFT-RiTE Stanari, Document No.: STNR-DDBSE3-005-C0103-03, Chengdu, pp. 2-26.
 - [19] CPK-Centar za projektovanje i konsalting DOO, PJ CPK Institut sertifikaciono tijelo, (2020). Sertifikat o usaglašenosti, br.: IT009-20-ZGP-0001, Proizvod: Leteći pepeo za beton, Izvještaj o ispitivanju br.: 40008/20, Banja Luka.

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] Rokai, P., Đere, Z., Pal, T., & Kasaš, A. (2002). *Istorija Mađara*. Beograd: Clio. (za knjigu)
- [2] Bubnjević, S. (2009). Skriveni keltski tragovi. *National Geographic Srbija*, 38, 110-117. (za članak u časopisu)
- [3] Radović, Z. (2007). Donošenje ustava. U: Đurković, M. (ured.) (2007). *Srbija 2000-2006: država, društvo, privreda* (str. 27-38). Beograd: Institut za evropske studije. (za članak iz zbornika radova)
- [4] Stankov, S. (2006). Phylogenetic inference from homologous sequence data: minimum topological assumption, strict mutational compatibility consensus tree as the ultimate solution. *Biology Direct*, 1. doi:10.1186/1745-6150-1-5. Preuzeto sa <http://www.biology-direct.com/content/1/1/5> (članak iz online časopisa)
- [5] Kraizer, S. (2005). *Safe child*. Preuzeto 29. februara 2008, sa <http://www.safechild.org/> (za web dokument)

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

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

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

Adresa uredništva je:

Časopis BAKAR
Institut za rudarstvo i metalurgiju
Alberta Ajnštajna br. 1, 19210 Bor
E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs
Telefon: 030/454-260; 030/454-108

Svim autorima se zahvaljujemo na saradnji.

INSTRUCTIONS FOR THE AUTHORS

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

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

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

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

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

Abstract and Keywords should be also given in English language.

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

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

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

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

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

[1] Rokai, P., Đere, Z., Pal, T., & Kasaš, A. (2002). *Istorija Mađara*. Beograd: Clio. (for the book)

[2] Bubnjević, S. (2009). Skriveni keltski tragovi. *National Geographic Srbija*, 38, 110-117. (for the article in a journal)

[3] Radović, Z. (2007). Donošenje ustava. U: Đurković, M. (ured.) (2007). *Srbija 2000-2006: država, društvo, privreda* (str. 27-38). Beograd: Institut za evropske studije. (for the article in a proceedings)

[4] Stankov, S. (2006). Phylogenetic inference from homologous sequence data: minimum topological assumption, strict mutational compatibility consensus tree as the ultimate solution. *Biology Direct*, 1. doi:10.1186/1745-6150-1-5. Preuzeto sa <http://www.biology-direct.com/content/1/1/5> (for the article in an online journal)

[5] Kraizer, S. (2005). *Safe child*. Preuzeto 29. februara 2008, sa <http://www.safechild.org/> (for web document)

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

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

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

Editorial Address:

Journal COPPER

Mining and Metallurgy Institute Bor

1 Alberta Ajnštajna, 19210 Bor

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

Telephone: +381 30/454-260; +381 30/454-108

We are thankful for all authors on cooperation.

SADRŽAJ
CONTENS

Katarina Milivojević, Mladen Supić, Dragan Ignjatović, Dušan Tašić INŽENJERSKOGEOLOŠKI USLOVI I ANALIZA STABILNOSTI JUŽNE KOSINE CENTRALNOG POLJA POVRŠINSKOG KOPA „GACKO“ ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS AND STABILITY ANALYSIS OF THE SOUTHERN SLOPE OF THE CENTRAL FIELD OF THE "GACKO" OPEN-PIT MINE	1
Stefan Trujić, Anđela Marinčić, Željana Novković, Boško Vuković DETALJNA GEOLOŠKA ISTRAŽIVANJA POVLATNE ZONE GATAČKOG UGLJENOG BASENA KAO OSNOVA ZA PREKATEGORIZACIJU REZERV I IZBOR TEHNOLOGIJE PREČIŠĆAVANJA UGLJA DETAILED GEOLOGICAL RESEARCH OF THE GACKO COAL BASIN'S RETURN ZONE AS A BASIS FOR RECATEGORYIZATION OF RESERVES AND SELECTION OF COAL PURIFICATION TECHNOLOGY	17
Radmilo Rajković, Daniel Kržanović, Miomir Mikić, Milenko Jovanović DEFINISANJE PROSTORNOG POLOŽAJA KLIZIŠTA I NESTABILNE ZONE ISTOČNE KOSINE POVRŠINSKOG KOPA JUŽNI REVIR RUDNIKA BAKRA MAJDANPEK DEFINING THE SPATIAL POSITION OF THE LANDSLIDES AND UNSTABLE ZONE OF THE EASTERN SLOPE OF THE OPEN-PIT MINE, SOUTHERN DISTRICT OF THE MAJDANPEK COPPER MINE	31
Viša Tasić, Dušan Topalović, Bojan Radović, Vladan Kamenović, Renata Kovačević, Zvonko Damnjanović ISPITIVANJE SEZONSKIH PROMENA KONCENTRACIJA SUSPENDOVANIH ČESTICA U STANOVIMA U BORU INVESTIGATION OF SEASONAL CHANGES IN SUSPENDED PARTICLE CONCENTRATIONS IN APARTMENTS IN BOR	43
Željko Simić TERMoeLEKTRANE U BOSNI I HERCEGOVINI I SRBIJI: EMIISIJE I TEHNOLOGIJE KONTROLE ZAGAĐENJA NA PRIMERU TE STANARI THERMAL POWER PLANTS IN BOSNIA AND HERZEGOVINA AND SERBIA: EMISSIONS AND POLLUTION CONTROL TECHNOLOGIES USING THE EXAMPLE OF THE TTP STANARI	51
