

INSTITUT ZA RUDARSTVO I METALURGIJU BOR

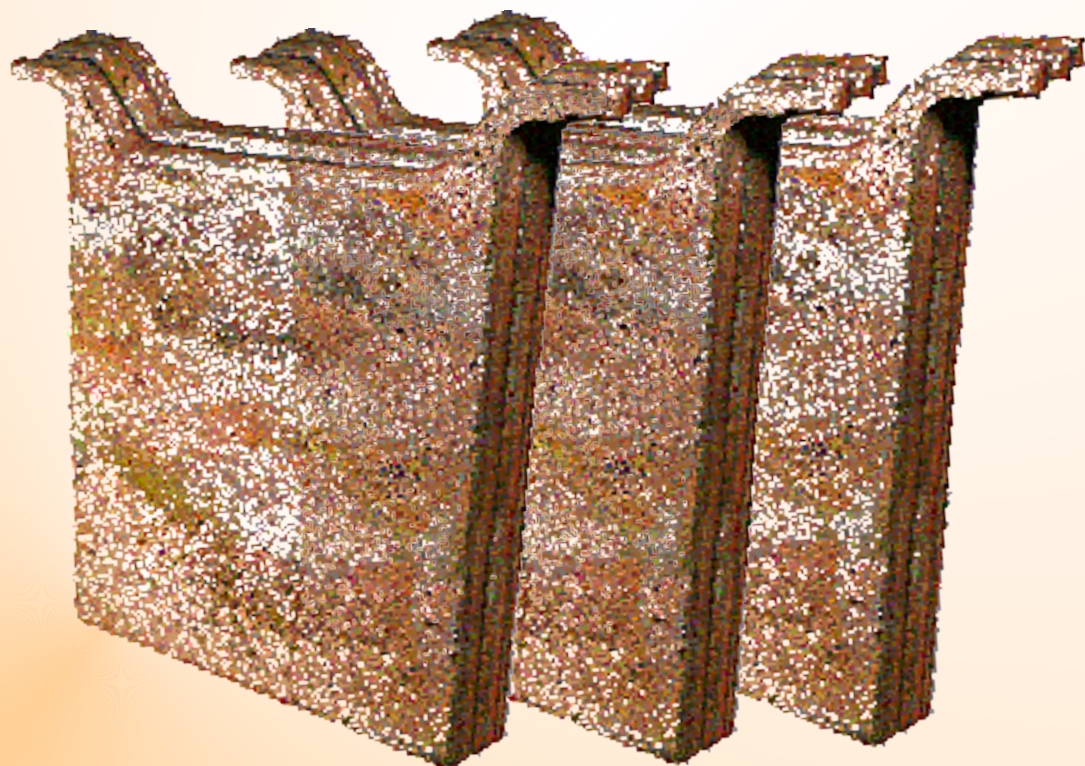


—Cu—

UDC 669.3
ISSN 0351-0212

Broj 1 Volumen 51 2026

BAKAR COPPER



BAKAR

1/2026

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

Izlazi dva puta godišnje još od 1968. godine.

Glavni urednik

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

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

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/izdavastvo

Izdavanje časopisa finansijski podržavaju

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

ISSN 0351-0212

Indeksiranje časopisa: SCIndeks, DOAJ.

Licenca CC BY

Izdavač

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

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, naučni savetnik
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Srbija
Orcid: 0000-0001-9754-1150

Muntean Cornelia, 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, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, Srbija
Orcid: 0000-0003-3318-6836

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

Naučna tehnička saradnja sa Inženjerskom akademijom Srbije

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

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

Technical Editor

Suzana Cvetković

Preprinting

Vesna Simić

Printed in

Mining and Metallurgy Institute Bor

Circulation: 30 copies

Web site

www.irmbor.co.rs/izdavastvo

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: SCIndex, DOAJ.

License CC BY

Published by

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

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, principal research fellow
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, full 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*

**Scientific – Technical Cooperation with the
Engineering Academy of Serbia**

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

DOI: 10.5937/bakar2601001R

NAUČNI RAD

Oblast: Inženjerstvo zaštite životne sredine

Primljen: 17.04.2026.

Prerađen: 03.05.2026.

Prihvaćen: 06.05.2026.

**ZAGAĐENJE VAZDUHA I UTICAJ METEOROLOŠKIH
PARAMETARA U BORU (SRBIJA): KORELACIONA ANALIZA**
**AIR POLLUTION AND METEOROLOGICAL INFLUENCES IN BOR
(SERBIA): A CORRELATION STUDY**

Nevena Ristić^{1a}, Viša Tasić^{1b}, Tatjana Apostolovski Trujić^{1c}, Bojan Radović^{1d},
Vladan Kamenović^{1e}, Renata Kovačević^{1f}, Milan Radivojević^{1g}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Bor

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

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

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

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

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

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

^{1g}E-mail: milan.radivojevic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2337-0306>

Izvod

Korelaciona analiza koncentracija SO_2 , PM_{10} , $PM_{2.5}$ i meteoroloških parametara na mernom mestu Bor - Gradski park pokazuje značajne razlike u zavisnosti od rada Topionice, sezonskih uslova i pravca vetra. U periodu kada Topionica nije radila dominira uticaj meteoroloških faktora i procesa formiranja sekundarnih aerosola, dok se u 2025. god., kada Topionica radi u kontinuitetu, uspostavlja jasna povezanost između SO_2 i PM frakcija, posebno izražena u zimskom periodu usled akumulacije u stabilnim atmosferskim uslovima. Analiza po pravcima vetra ukazuje da severni pravac predstavlja ključni pravac transporta industrijskih emisija, dok južni pravac karakteriše slabiji uticaj industrijskih izvora i izraženija uloga meteoroloških procesa.

Ključne reči: suspendovane čestice, kvalitet vazduha, meteorološki parametri, korelaciona analiza

Abstract

Correlation analysis of SO_2 , PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations and meteorological parameters at the Bor - City Park monitoring site reveals significant differences depending on smelter operation, seasonal conditions, and wind direction. During the period when the smelter was not operating, the system was predominantly influenced by meteorological factors and secondary aerosol formation processes, whereas in 2025, when the smelter was operating continuously, a clear relationship between SO_2 and PM fractions was established, particularly pronounced in the winter period due to accumulation under stable atmospheric conditions. Wind direction analysis indicates that the northern sector represents the main pathway for industrial emission transport, while the southern sector is characterized by weaker source influence and a stronger contribution of meteorological and secondary processes.

Keywords: suspended particulate matter, air quality, meteorological parameters, correlation analysis

1. UVOD

Korelaciona analiza predstavlja jedan od osnovnih statističkih pristupa za ispitivanje odnosa između koncentracija polutanata i meteoroloških parametara i široko se primenjuje u studijama kvaliteta vazduha u urbanim i industrijskim sredinama [1]. Ovakav pristup omogućava identifikaciju potencijalnih zajedničkih izvora zagađenja, kao i procenu uticaja meteoroloških uslova na disperziju, transport i transformaciju aerosola u atmosferi [1,2]. Brojna istraživanja su pokazala da korelacione veze između gasovitih polutanata (npr. SO_2) i suspendovanih čestica (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$) mogu ukazivati na zajedničko poreklo emisija, naročito u industrijskim regionima [3,4]. Istovremeno, meteorološki parametri, kao što su brzina vetra, temperatura i relativna vlažnost, značajno utiču na koncentracije zagađujućih materija kroz procese disperzije i procese formiranja sekundarnih aerosola [1,5]. U tom kontekstu, korelaciona analiza omogućava razlikovanje uticaja lokalnih emisija i regionalnog transporta, kao i sezonskih varijacija u ponašanju atmosferskih zagađivača, te se često koristi kao početni korak u interpretaciji kompleksnih atmosferskih sistema.

Područje Bora predstavlja jedan od najznačajnijih industrijskih centara u Republici Srbiji, sa dugogodišnjom tradicijom eksploatacije i prerade bakra, što ga svrstava među tipične primere urbanih sredina pod uticajem intenzivnih metalurških aktivnosti [6]. Brojna istraživanja su pokazala da je Topionica bakra u Boru dominantan izvor emisija sumpor-dioksida (SO_2), suspendovanih čestica (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$) i teških metala u ovom regionu, pri čemu koncentracije ovih polutanata često premašuju propisane granične vrednosti [5,6,7]. Kontinuirana merenja kvaliteta vazduha u Boru ukazuju na izraženu povezanost između nivoa zagađenja i rada Topionice, kao i na značajan uticaj meteoroloških parametara, posebno brzine i pravca vetra, na prostornu distribuciju polutanata [8-10]. Zbog blizine industrijskih postrojenja, uticaj emisija otpadnih gasova iz ovih postrojenja je izražen u starom gradskom jezgru, što dodatno usložnjava razdvajanje lokalnih i regionalnih izvora zagađenja [6,10,11]. Bor se zbog toga često navodi kao područje sa izraženim problemom zagađenja vazduha, gde dolazi do kompleksne interakcije između industrijskih emisija i meteoroloških uslova [10,11]. U takvoj situaciji, korelaciona analiza predstavlja koristan alat za razumevanje odnosa između polutanata i meteoroloških faktora, kao i za identifikaciju dominantnih mehanizama koji utiču na kvalitet vazduha u ovom području.

2. MATERIJAL I METODE

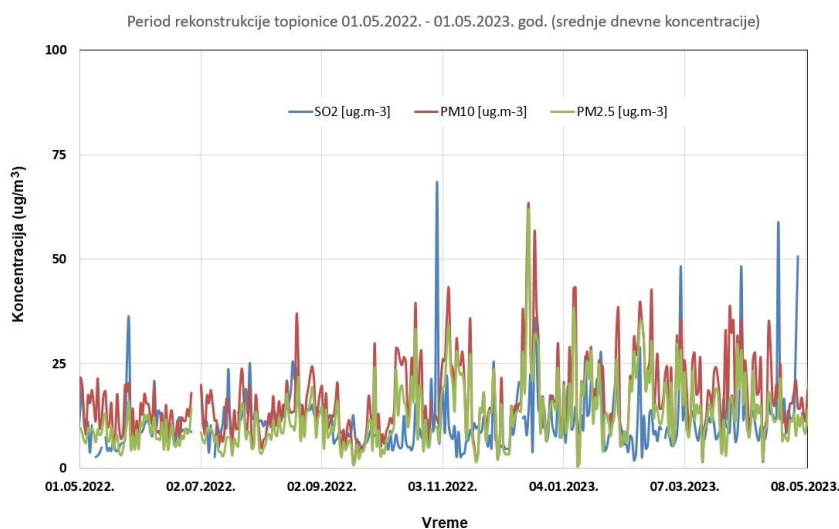
Korelaciona analiza sprovedena je za dva vremenska perioda: period kada Topionica nije bila u radu (maj 2022. - maj 2023. god.) i period kontinuiranog rada Topionice (2025. godina). Za analizu su korišćene srednje dnevne vrednos-

ti koncentracija sumpor-dioksida (SO_2), suspendovanih čestica PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$, kao i meteoroloških parametara, dobijene merenjima na mernom mestu Bor - Gradski park. Koncentracije polutanata određivane su pomoću automatskih analizatora u skladu sa referentnim metodama za kontinuirano merenje kvaliteta vazduha, dok su meteorološki parametri registrovani standardnim meteorološkim senzorima u okviru automatske merne stanice, čime je obezbeđena uporedivost podataka i omogućena procena uticaja industrijskih emisija i meteoroloških faktora na međusobne odnose posmatranih parametara.

3. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

3.1. Korelacije između polutanata i meteoroloških parametara u periodu maj 2022 – maj 2023.god. (period kada je topionica bakra u boru bila u rekonstrukciji) (n = 363)

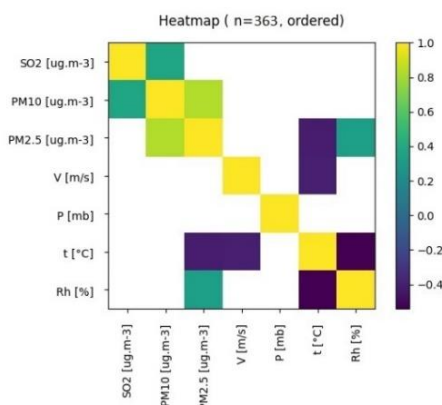
U periodu od 01. maja 2022. do 01. maja 2023. godine, Topionica bakra u Boru nije radila zbog rekonstrukcije i proširenja kapaciteta za preradu koncentrata bakra. Na slici 1 prikazane su srednje dnevne koncentracije SO_2 , PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ izmerene u navedenom periodu na mernom mestu Bor - Gradski park.



Sl. 1. Srednje dnevne koncentracije SO_2 , PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ izmerene u periodu rekonstrukcije Topionice bakra u Boru na mernom mestu Bor - Gradski park

Za period kada Topionica nije radila, analizirane su korelacije između koncentracija polutanata SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ i meteoroloških parametara na mernom mestu Bor - Gradski park, kako bi se utvrdio uticaj meteo parametara na

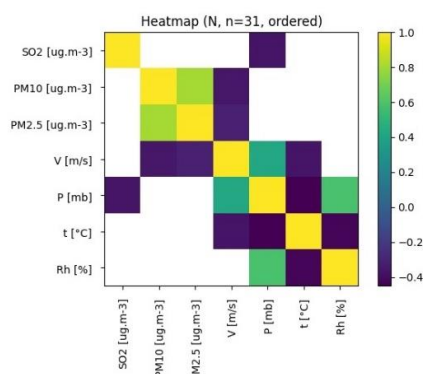
promene koncentracija navedenih polutanata. Pirsonov koeficijent korelacije izračunat je za srednje dnevne vrednosti navedenih parametara za ceo period posmatranja ($n = 363$). Tokom celog perioda posmatranja ustanovljena je jaka pozitivna korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r = 0.87$, $p < 0.001$), što ukazuje na zajedničko poreklo suspendovanih čestica i stabilan uticaj dominantnog izvora ovih čestica. Uočena je i umerena pozitivna korelacija između SO_2 i PM_{10} ($r = 0.45$, $p < 0.001$), kao i između SO_2 i $PM_{2.5}$ ($r = 0.43$, $p < 0.001$), što ukazuje na delimično zajedničko poreklo ovih polutanata. Pozitivna korelacija između $PM_{2.5}$ i relativne vlažnosti ($r = 0.41$, $p < 0.01$) ukazuje na prisustvo procesa formiranja sekundarnih aerosola, što je izraženije u finoj frakciji suspendovanih čestica. Istovremeno, izražena negativna korelacija između temperature i relativne vlažnosti ($r = -0.70$, $p < 0.001$) odražava tipičan sezonski meteorološki obrazac. Negativna korelacija između brzine vetra i PM_{10} ($r = -0.33$, $p < 0.01$) ukazuje na značaj disperzionih procesa, pri čemu sa porastom brzine vetra dolazi do smanjenja koncentracija suspendovanih čestica frakcije PM_{10} . Na slici 2 prikazana je filtrirana korelaciona matrica (heatmap) sa vrednostima $|r| \geq 0.3$ za ceo period posmatranja.



Sl. 2. Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) između SO_2 , PM_{10} , $PM_{2.5}$ i meteoroloških parametara ($n=363$)

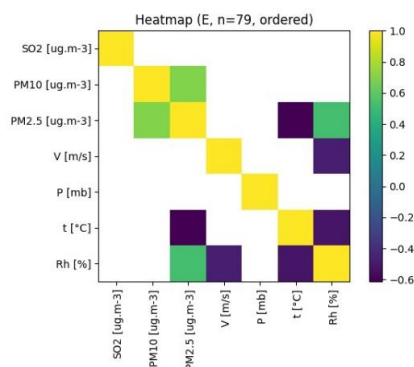
Za potrebe analize koeficijenti korelacije između posmatranih polutanata i meteoroloških parametara određeni su za svaki od četiri dominantna pravca vetra, pri čemu južni pravac nije razmatran zbog nedovoljnog broja podataka ($n = 5$) i ograničene reprezentativnosti. U danima kada je dominantni pravac vetra bio sa severa prisutna je jaka pozitivna korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r = 0.83$, $p < 0.001$), što ukazuje na zajedničko poreklo suspendovanih čestica. Negativna korelacija između brzine vetra i PM_{10} ($r = -0.33$, $p < 0.01$) potvrđuje značaj disperzije. Izražena negativna korelacija između temperature i relativne vlažnosti ($r = -0.79$, $p < 0.001$) odražava tipične meteorološke uslove. Na slici 3

prikazana je filtrirana korelaciona matrica (heatmap) sa vrednostima $|r| \geq 0.3$ za dane kada je dominantni pravac vetra bio severni.



Sl. 3. Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za severni pravac vetra ($n = 31$)

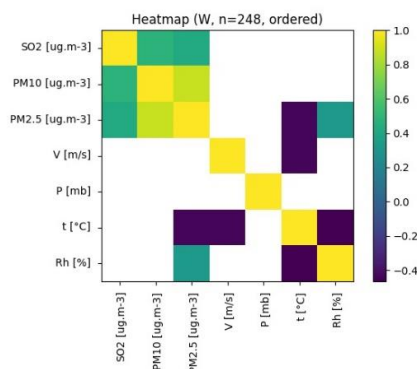
U danima kada je preovlađivao istočni pravac vetra uočena je jaka pozitivna korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r = 0.69$, $p < 0.001$), što ukazuje na zajedničko poreklo suspendovanih čestica. Pozitivna korelacija između $PM_{2.5}$ i relativne vlažnosti ($r = 0.39$, $p < 0.01$) ukazuje na doprinos procesa formiranja sekundarnih aerosola. Takođe, izražena negativna korelacija između temperature i $PM_{2.5}$ ($r = -0.54$, $p < 0.001$) ukazuje na akumulaciju zagađenja u hladnijim uslovima. Na slici 4 prikazana je filtrirana korelaciona matrica (heatmap) sa vrednostima $|r| \geq 0.3$ za dane kada je dominantni pravac vetra bio istočni.



Sl. 4. Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za istočni pravac vetra ($n = 79$)

U danima kada je preovlađivao zapadni pravac vetra izražena je veoma jaka korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r = 0.85$, $p < 0.001$), što ukazuje na stabilan i dominantan izvor suspendovanih čestica. Uočena je pozitivna korelacija između SO_2 i PM_{10} ($r = 0.45$, $p < 0.001$), što ukazuje na zajedničko poreklo. Pozitivna korelacija između $PM_{2.5}$ i relativne vlažnosti ($r = 0.42$, $p < 0.01$)

ukazuje na prisustvo procesa formiranja sekundarnih aerosola. Negativna korelacija između temperature i relativne vlažnosti ($r = -0.40$, $p < 0.001$) dodatno potvrđuje stabilne meteorološke uslove koji pogoduju akumulaciji zagađenja. Na slici 5 prikazana je filtrirana korelaciona matrica (heatmap) sa vrednostima $|r| \geq 0.3$ za dane kada je dominantni pravac vetra bio zapadni.



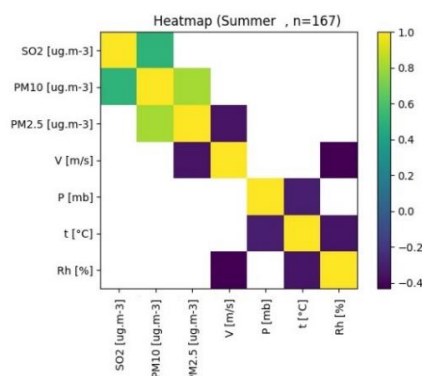
Sl. 5. Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za zapadni pravac vetra ($n = 248$)

Analiza koeficijenata korelacije po dominantnim pravcima vetra pokazuje da se u danima kada je dominantan severni pravac vetra ($n = 31$) uočava kombinovani uticaj emisija i disperzionih uslova. U danima sa dominantnim zapadnim pravcem vetra ($n = 248$) postoji jasna povezanost između SO_2 i PM frakcija, dok u danima kada dominira istočni pravac vetra ($n = 79$) postoji izraženiji uticaj sekundarnih procesa formiranja i transformacije aerosola tokom transporta. Južni pravac vetra nije uključen u korelacionu analizu zbog nedovoljnog broja dana/uzoraka ($n = 5$).

Za analizu koeficijenata korelacije u letnjem periodu uzeti su u obzir podaci od 01.05.2022. do 14.10.2022. god., dok su za analizu koeficijenata korelacije u zimskom periodu uzeti u obzir podaci od 15.10.2022. do 14.04.2023. god. Zbog nekompletnosti podataka, analiza zimskog perioda skraćena je na period do 14.04.2023. god. Zato je broj analiziranih dana manji od $n=363$.

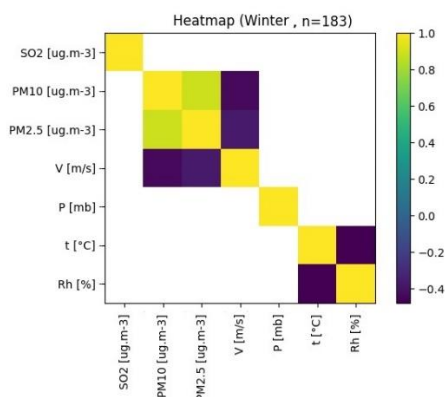
Analiza koeficijenata korelacije u letnjem periodu (01.05.2022. - 14.10.2022. god.) pokazuje jaku pozitivnu korelaciju između PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ ($r \approx 0.83$, $p < 0.001$), što ukazuje na njihovo zajedničko poreklo. U ovom periodu uočena je i **umerena pozitivna korelacija između SO_2 i PM_{10}** ($r = 0.48$, $p < 0.01$), što ukazuje na prisutan, ali relativno slabiji uticaj industrijskih emisija usled intenzivnije disperzije. Izražena negativna korelacija između $\text{PM}_{2.5}$ i brzine vetra ($r \approx -0.35$, $p < 0.01$) ukazuje na značaj disperzionih procesa, pri čemu povećanje brzine vetra dovodi do smanjenja koncentracija $\text{PM}_{2.5}$. Takođe, negativna korelacija između **temperature i relativne vlažnosti** ($r \approx -0.45$, $p < 0.001$) odražava tipičan sezonski meteorološki obrazac karakterističan za

topliji deo godine. Na slici 6 prikazana je filtrirana korelaciona matrica (heatmap) sa vrednostima $|r| \geq 0.3$ za letnji period.



Sl. 6. Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za letnji period ($n = 167$), 01.05.2022. - 14.10.2022. god.

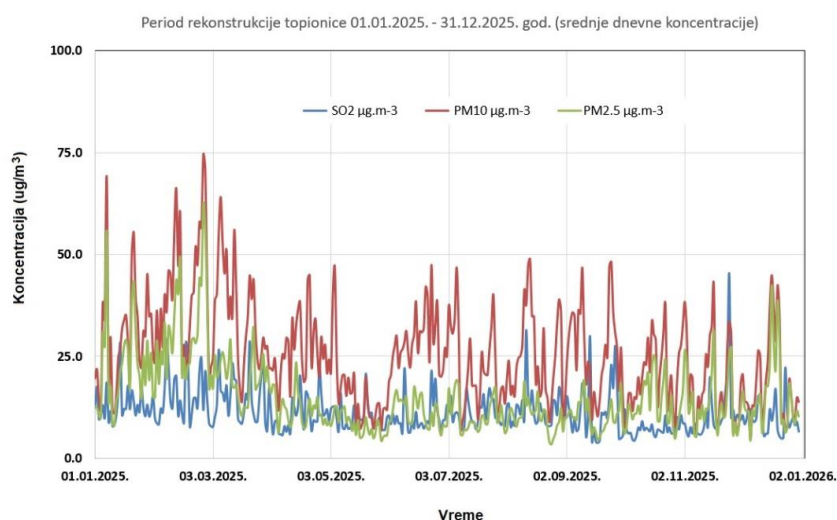
U zimskom periodu (15.10.2022. - 14.04.2023. god.) uočena je veoma jaka korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r = 0.89$, $p < 0.001$), što ukazuje na zajedničko poreklo. U ovom periodu jasno je izražena korelacija između **SO_2 i PM frakcija** ($r = 0.45$, $p < 0.001$), što potvrđuje dominantan uticaj industrijskih emisija u uslovima smanjene disperzije i pojačane akumulacije zagađujućih materija. Negativna korelacija između **brzine vetra i PM_{10}** ($r = -0.38$, $p < 0.01$) potvrđuje značaj disperzije, dok je njen efekat ograničen usled stabilne atmosfere. Izražena negativna korelacija između **temperature i relativne vlažnosti** ($r = -0.52$, $p < 0.001$) ukazuje na sezonske meteorološke uslove. Na slici 7 prikazana je filtrirana korelaciona matrica (heatmap) sa vrednostima $|r| \geq 0.3$ za zimski period.



Sl. 7. Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za zimski period ($n = 183$), 15.10.2022. - 14.04.2023. god.

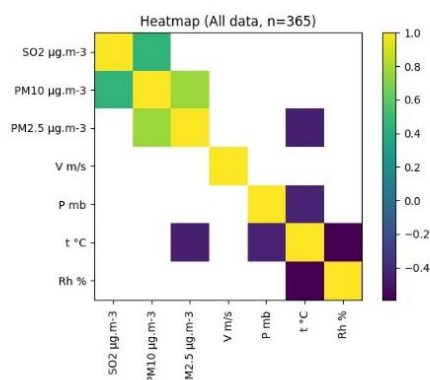
3.2. Korelacije između polutanata i meteoroloških parametara u 2025. god. (period kada je Topionica bakra u Boru bila u radu) (n = 365)

U toku 2025. god. Topionica bakra u Boru bila je u radu. U cilju poređenja zavisnosti polutanata od meteoroloških parametara kada je Topionica bakra u Boru u radu, analizirane su srednje dnevne vrednosti koncentracija SO_2 , PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ i meteoroloških parametara izmerene na mernom mestu Bor - Gradski park u 2025. god. Na slici 8. prikazane su srednje dnevne koncentracije SO_2 , PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ u tom periodu na mernom mestu Bor - Gradski park.



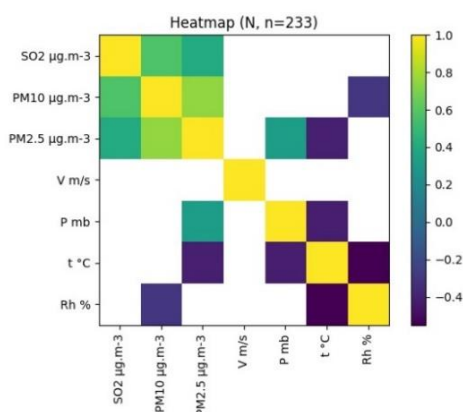
Sl. 8. Srednje dnevne koncentracije SO_2 , PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ izmerene u 2025. god. na m.m. Bor - Gradski park

U posmatranom periodu dominantna je jaka pozitivna korelacija između PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ ($r = 0.84$, $p < 0.001$), što ukazuje na zajedničko poreklo suspendovanih čestica. Uočena je i umerena pozitivna korelacija između SO_2 i PM_{10} ($r = 0.56$, $p < 0.001$), kao i između SO_2 i $\text{PM}_{2.5}$ ($r = 0.48$, $p < 0.001$), što potvrđuje značajan uticaj industrijskih emisija. Izražena negativna korelacija između temperature i relativne vlažnosti ($r = -0.61$, $p < 0.001$) odražava tipičan sezonski meteorološki obrazac. Negativna korelacija između brzine vetra i $\text{PM}_{2.5}$ ($r = -0.32$, $p < 0.01$) ukazuje na značaj disperzionih procesa, pri čemu povećanje brzine vetra doprinosi smanjenju koncentracija $\text{PM}_{2.5}$ u vazduhu. Na slici 9. prikazana je filtrirana korelaciona matrica, sa vrednostima $|r| \geq 0.3$, za celu 2025. god.



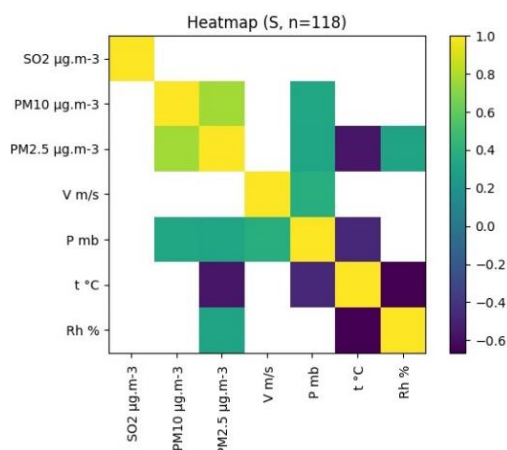
Sl. 9. Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za m.m. Bor - Gradski park u 2025. god.
($n = 365$)

U danima kada je dominantni pravac vetra bio severni, prisutna je jaka pozitivna korelacija između PM₁₀ i PM_{2.5} ($r = 0.86$, $p < 0.001$), što ukazuje na zajedničko poreklo suspendovanih čestica. Izražena je pozitivna korelacija između SO₂ i PM₁₀ ($r = 0.62$, $p < 0.001$), kao i između SO₂ i PM_{2.5} ($r = 0.52$, $p < 0.001$), što takode ukazuje na zajedničko poreklo ovih polutanata. Pozitivna korelacija između PM_{2.5} i vazdušnog pritiska ($r = 0.41$, $p < 0.01$) ukazuje na akumulaciju zagađujućih materija u stabilnim atmosferskim uslovima. Izražena negativna korelacija između temperature i relativne vlažnosti ($r = -0.67$, $p < 0.001$) odražava tipične meteorološke uslove. Na slici 10 prikazana je filtrirana korelaciona matrica (heatmap) sa vrednostima $|r| \geq 0.3$ za dane kada je dominantni pravac vetra bio severni.



Sl. 10. Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za severni pravac vetra ($n = 233$)

U danima kada je dominantni pravac vetra bio južni, prisutna je jaka pozitivna korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r = 0.82$, $p < 0.001$), što ukazuje na zajedničko poreklo suspendovanih čestica. Korelacije između SO_2 i PM frakcija nisu izražene, što ukazuje na slabiji uticaj industrijskih emisija. Pozitivna korelacija između $PM_{2.5}$ i relativne vlažnosti ($r = 0.44$, $p < 0.01$) ukazuje na doprinos usled procesa formiranja sekundarnih aerosola. Pozitivna korelacija između PM frakcija i vazdušnog pritiska ($r \approx 0.40$, $p < 0.01$) ukazuje na akumulaciju zagađujućih materija u stabilnim atmosferskim uslovima. Izražena negativna korelacija između temperature i relativne vlažnosti ($r = -0.65$, $p < 0.001$) odražava tipične meteorološke uslove. Na slici 11 prikazana je filtrirana korelaciona matrica (heatmap) sa vrednostima $|r| \geq 0.3$ za dane kada je dominantni pravac vetra bio južni. Istočni ($n = 9$) i zapadni pravac ($n = 5$) nisu uključeni u korelacionu analizu zbog nedovoljnog broja dana.

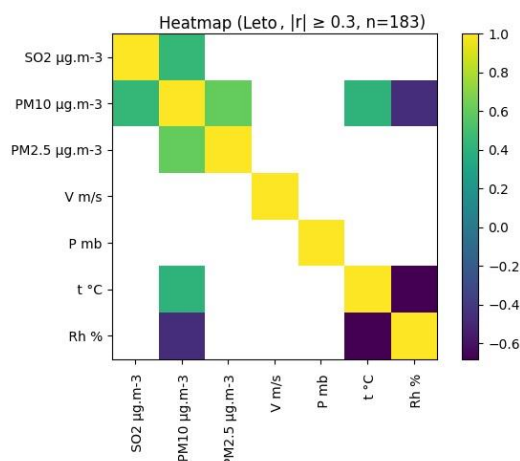


Sl. 11. Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za južni pravac vetra ($n = 118$)

Rezultati korelacione analize rezultata merenja na m.m. Bor - Gradski park u 2025. god. ukazuju da je u posmatranom području dominantan mehanizam formiranja i distribucije aerosola uslovljen interakcijom između pravca vetra i sezonskih meteoroloških uslova, pri čemu severni pravac i zimski period favorizuju akumulaciju i izražen uticaj industrijskih emisija, dok letnji period i južni pravac karakteriše disperzija i procesi formiranja sekundarnih aerosola.

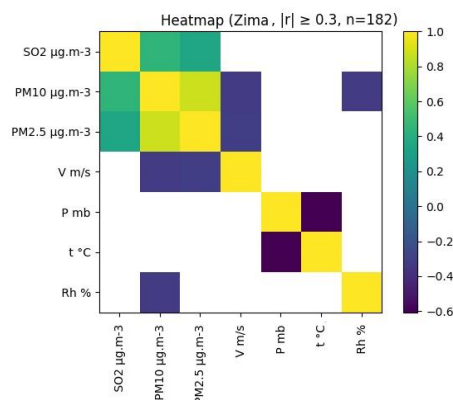
U letnjem periodu (15.04.2025. - 14.10.2025. god.) uočena je umerena pozitivna korelacija između SO_2 i PM_{10} ($r \approx 0.50$, $p < 0.01$), što ukazuje na prisutan uticaj industrijskih emisija. Jaka korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r \approx 0.72$, $p < 0.001$) potvrđuje zajedničko poreklo ovih frakcija suspendovanih čestica.

Negativna korelacija između PM_{10} i relativne vlažnosti ($r \approx -0.35$, $p < 0.01$) i pozitivna korelacija PM_{10} sa temperaturom ($r \approx 0.45$, $p < 0.01$) ukazuju na značajan uticaj meteoroloških uslova na koncentracije PM_{10} na ovom mernom mestu. Na slici 12 prikazana je filtrirana korelaciona matrica (heatmap) sa vrednostima $|r| \geq 0.3$ u letnjem periodu (negrejna sezona) 2025. god.



Sl. 12. Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za letnji period ($n=183$), 15.04 - 14.10.2025. god.

U zimskom periodu uočena je izražena pozitivna korelacija između SO_2 i PM_{10} ($r \approx 0.60$, $p < 0.001$), kao i između SO_2 i $PM_{2.5}$ ($r \approx 0.50$, $p < 0.001$), što ukazuje na dominantan uticaj zajedničkog izvora ovih polutanata. Veoma jaka korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r \approx 0.85$, $p < 0.001$) potvrđuje stabilan izvor suspendovanih čestica u uslovima smanjene disperzije. Negativna korelacija između brzine vetra i PM frakcija ($r \approx -0.35$, $p < 0.01$) ukazuje na ograničen, ali i dalje prisutan uticaj disperzionih procesa. Istovremeno, izražena negativna korelacija između vazdušnog pritiska i temperature ($r \approx -0.60$, $p < 0.001$) odražava tipične sezonske meteorološke uslove. Uočena je i negativna korelacija između PM_{10} i relativne vlažnosti ($r \approx -0.30$, $p < 0.05$), što ukazuje na smanjenje koncentracija PM_{10} u uslovima povećane vlažnosti. Na slici 13 prikazana je filtrirana korelaciona matrica (heatmap) sa vrednostima $|r| \geq 0.3$ u zimskom periodu (grejna sezona) 2025. god.



Sl. 13. Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za zimski period ($n=182$),
01.01.2025. - 14.4.2025. i 15.10.2025. - 31.12.2025. god.

Za razliku od letnjeg perioda, uticaj pravca vetra je manje izražen, dok se korelacione veze između SO₂ i PM frakcija pojačavaju, što ukazuje da u zimskom periodu dominira mehanizam akumulacije zagađujućih materija u stabilnim atmosferskim uslovima, uz izražen direktni uticaj industrijskih emisija. Kombinovana analiza pravca vetra i sezonske varijabilnosti pokazuje da je uticaj industrijskih emisija veoma zavisao od pravca vetra i meteoroloških uslova. Severni pravac predstavlja ključni pravac transporta industrijskih emisija, pri čemu se njihov uticaj maksimalno ispoljava tokom zimskog perioda usled smanjene disperzije i pojačane akumulacije. Nasuprot tome, južni pravac karakteriše dominantan uticaj meteoroloških uslova i sekundarnih procesa, uz slab direktni doprinos industrijskih emisija posmatranih polutanata.

3.3. Poređenje korelacija između polutanata i meteoroloških parametara u periodu rekonstrukcije Topionice bakra u Boru (maj 2022. - maj 2023. god.) i u periodu kada je Topionica bakra u Boru bila u radu (2025. god.)

U periodu kada Topionica nije radila, korelaciona struktura pokazuje slabu povezanost između SO₂ i PM frakcija, što ukazuje na izostanak dominantnog industrijskog izvora. U ovom periodu dominiraju korelacije između PM frakcija i meteoroloških parametara, pre svega negativna korelacija sa brzinom vetra i karakterističan odnos temperature i relativne vlažnosti, što ukazuje na dominantan uticaj disperzionih procesa i lokalnih/sekundarnih izvora.

Nasuprot tome, u 2025. god., kada Topionica radi, uočava se jasno uspostavljena korelacija između SO₂ i PM₁₀ ($r \approx 0.5-0.6$) i SO₂ i PM_{2.5} ($r \approx 0.4-0.5$), što predstavlja jasan pokazatelj prisustva zajedničkog izvora emisije. Istov-

remeno, jaka korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ostaje prisutna u oba perioda, ali u prisustvu rada Topionice dobija jasniju interpretaciju kao posledica kombinovanog uticaja emisija i procesa formiranja sekundarnih aerosola.

U letnjem periodu, kada Topionica nije radila, korelacije između SO_2 i PM frakcija su praktično odsutne, dok dominiraju veze između PM i meteoroloških parametara, što ukazuje na disperziju i promenljive uslove transporta bez izraženog dominantnog izvora. U letnjem periodu, kada Topionica radi, u 2025. god., iako je disperzija i dalje izražena, pojavljuje se umerena korelacija između SO_2 i PM_{10} ($r \approx 0.5$), kao i izražena zavisnost od pravca vetra. To ukazuje da u ovom periodu dominira transport emisija iz pravca izvora, ali uz značajno razblaženje usled intenzivne disperzije.

U zimskom periodu, kada Topionica nije radila, korelacije između SO_2 i **PM frakcija nisu izražene** ($r < 0.30$, $p > 0.05$), što ukazuje na odsustvo dominantnog industrijskog izvora. Nasuprot tome, uočavaju se korelacije koje ukazuju na akumulaciju čestične materije u stabilnim atmosferskim uslovima. Pozitivna korelacija između **PM frakcija** i vazdušnog pritiska ($r \approx 0.35-0.45$, $p < 0.01$), ukazuje na povećanje koncentracija suspendovanih čestica u uslovima visokog pritiska i stabilne atmosfere. Istovremeno, negativna korelacija između **temperature i relativne vlažnosti** odražava tipičan zimski meteorološki režim, dok slaba negativna korelacija između **brzine vetra i $PM_{2.5}$** ukazuje na ograničen uticaj disperzionih procesa.

U zimskom periodu, kada Topionica radi, u 2025. god., dolazi do značajnog jačanja korelacija između SO_2 i PM frakcija ($r \approx 0.5 - 0.6$), uz istovremeno prisutnu jaku korelaciju između PM_{10} i $PM_{2.5}$. Negativna korelacija sa brzinom vetra i stabilni meteorološki uslovi dodatno pogoduju akumulaciji zagađujućih materija, čime se prisustvo industrijskog zagađenja značajnije ispoljava.

Dobijeni rezultati su u skladu sa nalazima brojnih studija sprovedenih u urbanim i industrijskim sredinama, gde je pokazano da u odsustvu dominantnog izvora emisije korelacione veze između gasovitih polutanata i suspendovanih čestica slabe, dok meteorološki parametri postaju ključni faktor u kontroli koncentracija zagađujućih materija. Slični obrasci zabeleženi su u evropskim gradovima i industrijskim regionima, uključujući studije u Poljskoj i Italiji, gde negativna korelacija između brzine vetra i PM frakcija, kao i izražen odnos temperature i relativne vlažnosti, ukazuju na dominantnu ulogu disperzije i procesa formiranja sekundarnih aerosola [12,13].

Nasuprot tome, u uslovima prisustva snažnog industrijskog izvora, kao što je pokazano u studijama, u blizini metalurških i industrijskih postrojenja, dolazi do uspostavljanja jasne povezanosti između gasovitih polutanata i suspendovanih čestica, što se tumači kao posledica zajedničkog porekla emisija i njihovog naknadnog atmosferskog transformisanja [3,4,13].

Takođe, izražen sezonski kontrast između letnjeg i zimskog perioda, sa dominantnom disperzijom tokom toplog dela godine i akumulacijom u stabilnim zimskim uslovima, potvrđen je u brojnim istraživanjima, gde se zimske epizode zagađenja dovode u vezu sa slabim vetrom, temperaturnim inverzijama i povećanom relativnom vlažnošću [4,9,10,11].

Ovakva saglasnost sa rezultatima drugih studija dodatno potvrđuje da je u posmatranom području ključna interakcija između emisija i meteoroloških uslova u određivanju nivoa i ponašanja atmosferskih zagađivača.

4. ZAKLJUČAK

Rezultati korelacione analize pokazuju da se struktura odnosa između SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ i meteoroloških parametara na mernom mestu Bor - Gradski park značajno menja u zavisnosti od rada Topionice, sezonskih uslova i pravca vetra. U periodu kada Topionica nije radila (2022. - 2023. god.), korelacije između SO_2 i PM frakcija su slabe, dok dominantnu ulogu imaju meteorološki faktori, pre svega disperzija i akumulacija u stabilnim atmosferskim uslovima, uz prisutan uticaj procesa formiranja sekundarnih aerosola.

U 2025. god., kada je Topionica u radu, uspostavlja se jasna povezanost između SO_2 i PM frakcija, što ukazuje na dominantan uticaj industrijskih emisija. Ovaj uticaj je najizraženiji u zimskom periodu, kada stabilni meteorološki uslovi pogoduju akumulaciji zagađujućih materija, dok je u letnjem periodu ublažen usled intenzivnije disperzije. Analiza po pravcima vetra pokazuje da severni pravac predstavlja ključni pravac transporta industrijskih emisija, dok južni pravac karakteriše slabiji uticaj izvora i izraženija uloga meteoroloških procesa i procesa formiranja sekundarnih aerosola.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2026. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-33/2026-03/200052.

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. god.

LITERATURA

- [1] Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 3rd ed., Wiley, 2016.
- [2] Jacob, D.J. *Introduction to Atmospheric Chemistry*, Princeton University Press, 1999.
- [3] Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Plana, F., Mantilla, E., Ruiz, C.R. Monitoring of PM₁₀ and PM_{2.5} around primary particulate anthropogenic emission sources, *Atmospheric Environment*, 2001, 35, pp. 845–858. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00387-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00387-3)
- [4] Gonzales-Castanedo, J., Moreno, T., Fernandez-Camacho, R., Sanchez de la Campa, A., Alastuey, A., Querol, X., De la Rosa, J. (2014). Size distribution and chemical composition of particulate matter stack emissions in and around a copper smelter, *Atmos. Environ.*, 98, pp. 271–282.
- [5] World Health Organization. *WHO Global Air Quality Guidelines: PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, SO₂ and CO*, Geneva, 2021.
- [6] Nikolić, D., Milošević, N., Mihajlović, I., Živković, Ž., Tasić, V., Kovačević, R., Petrović, N. (2010). Multi-criteria Analysis of Air Pollution with SO₂ and PM₁₀ in Urban Area Around the Copper Smelter in Bor, Serbia. *Water Air Soil Pollut* 206, 369–383
<https://doi.org/10.1007/s11270-009-0113-x>.
- [7] Tasić, V., Kovačević, R., Maluckov, B., Apostolovski-Trujić, T., Cocić, M., Matic, B., Šteharik, M. (2017). The content of As and heavy metals in TSP and PM₁₀ near copper smelter in Bor, Serbia. *Water, Air&Soil Pollution*, 228, 230. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3393-6>
- [8] 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>
- [9] 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>
- [10] 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>

- [11] Tasić, V., Milošević, N., Kovačević, R., Petrović, N. (2010). The analysis of air pollution caused by particle matter emission from the copper smelter complex Bor (Serbia). **Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly**, **16**(3), 219–228.
<https://doi.org/10.2298/CICEQ090909011T>
- [12] Peplowska, M., Kryzia, D. (2023). Examining pollution emissions in relation to atmospheric conditions: A case study on air-quality management in Kraków. *Energy Policy Journal*, *26*(3), 117–130.
<https://doi.org/10.33223/epj/170757>
- [13] Di Vaio, P., Magli, E., Barbato, F., Caliendo, G., Cocozziello, B., Corvino, A., De Marco, A., Fiorino, F., Frecentese, F., Onorati, G., Saccone, I., Santagada, V., Soggiu, M. E., Severino, B., & Perissutti, E. (2016). Chemical Composition of PM10 at Urban Sites in Naples (Italy). *Atmosphere*, *7*(12), 163. <https://doi.org/10.3390/atmos7120163>.

UDK: 621.314.21/.316(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2601017M

NAUČNI RAD

Oblast: Elektroenergetika

Primljen: 13.01.2026.

Prerađen: 30.01.2026.

Prihvaćen: 06.02.2026.

**ISPADI DALEKOVODA U TRAFOSTANICAMA-POGON PRENOSA
NOVI SAD USLED PRESKOKA NA IZOLATORSKIM LANCIMA I
STRUJNIM MOSTOVIMA**

**OUTAGES OF TRANSMISSION LINES IN SUBSTATIONS –
TRANSMISSION OPERATIONS NOVI SAD CAUSED BY FLASHOVERS
ON INSULATOR STRINGS AND BUSBARS**

Nenad Marković¹, Davor Derdić², Strahinja Marković³

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

²Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“, Beograd, Sektor za operativno
upravljanje delom prenosnog sistema SEVER - RDC SEVER - Novi Sad,
21000 Novi Sad, Srbija

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

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

²Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-6939-6478>

³Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-7812-8781>

Izvod

U radu su analizirani uzroci ispada u prenosnim trafostanicama, sa posebnim naglaskom na preskoke na izolatorskim lancima i strujnim mostovima u postrojenjima naponskih nivoa 110 kV i 220 kV. Poseban fokus stavljen je na pojave preskoka na izolatorima kao jedan od najčešćih uzroka prekida u radu elektroenergetskih sistema. Analiza se temelji na podacima prikupljenim u periodu od 2000. do 2015. godine na trafostanicama u nadležnosti JP „Elektromreža Srbije“, pogon prenosa Novi Sad sa datim obrazloženjem do današnjeg dana. Istraživanjem je obuhvaćena vremenska distribucija ispada, kao i uticaj klimatskih faktora (vlaga, jutarnja rosa) na pogoršanje izolacionih karakteristika opreme.

Cilj istraživanja je smanjenje broja ispada ovog tipa, čime se doprinosi povećanju pouzdanosti prenosnog sistema i smanjenju trajanja beznaponskih pauza. Dobijeni rezultati mogu poslužiti kao osnova za optimizaciju izbora izolatora i definisanje daljih tehničkih mera u cilju unapređenja rada i sigurnosti elektroenergetske mreže.

Cljučne reči: ispad, preskok, trafostanica, dalekovod, izolatori, strujni mostovi

Abstract

This paper analyses the causes of outages in transmission substations, with a particular focus on flashovers occurring on insulator strings and busbars in facilities operating at voltage levels of 110 kV and 220 kV. Special attention is given to flashovers on insulators, recognised as one of

the most frequent causes of interruptions in the operation of electrical power systems. The analysis is based on data collected between 2000 and 2015 at substations managed by the public enterprise Elektromreža Srbije (EMS), Transmission Operations Novi Sad, with the provided justification of the relevance of this period up to the present day. The research examines the temporal distribution of outages and the influence of climatic factors such as humidity and morning dew on the degradation of insulation properties of the equipment.

The objective of the study is to reduce the number of outages of this type, thereby enhancing the reliability of the transmission system and reducing the duration of power interruptions. The findings can serve as a foundation for optimising insulator selection and for defining further technical measures aimed at improving the performance and safety of the electrical transmission network.

Keywords: outage, flashover, substation, transmission line, insulators, busbars

1. UVOD

Kompletan prenosni elektroenergetski sistem čini okosnicu energetskeg lanca, omogućavajući efikasan prenos električne energije od proizvođača do distributivnih centara i krajnjih korisnika. On se sastoji od dva osnovna podsistema: dalekovoda, koji predstavljaju fizičku i električnu vezu između različitih tačaka sistema i trafostanica koje služe za transformaciju električne energije sa jednog naponskog nivoa na drugi. Ova transformacija je neophodna radi smanjenja gubitaka pri prenosu energije na velikim udaljenostima, kao i za prilagođavanje napona potrebama potrošača [1]. Efikasno funkcionisanje prenosnog sistema zavisi od pravilne konfiguracije i održavanja kako dalekovoda, tako i trafostanica. Pored osnovne funkcije transformacije napona, trafostanice uključuju i opremu za zaštitu, merenje, kontrolu i automatizaciju, što doprinosi pouzdanosti i sigurnosti sistema. Dalekovodi, sa druge strane, zahtevaju posebnu pažnju u pogledu mehaničke stabilnosti, zaštite od atmosferskih uticaja, i kontrole elektromagnetnog zračenja [2].

Funkcionalnost prenosnog elektroenergetskog sistema predstavlja jedan od ključnih pokazatelja stabilnosti i efikasnosti celokupne elektroenergetske mreže. Da bi se obezbedio neprekidan i bezbedan prenos električne energije, neophodno je smanjiti učestalost ispada i tehničkih zastoja kroz redovno preventivno održavanje, implementaciju savremenih sistema zaštite i primenu naprednih metoda nadzora i kontrole. Prenosni sistemi se, u cilju poboljšanja operativnih karakteristika, mogu rekonfigurisati ili modernizovati radi otklanjanja tehničkih ograničenja, smanjenja gubitaka pri prenosu i ublažavanja posledica spoljašnjih uticaja kao što su atmosferske pojave ili mehanička opterećenja. Na taj način obezbeđuje se veći stepen energetske stabilnosti i efikasnije funkcionisanje prenosne mreže u celini [3,4].

U nastavku rada je data posebna pažnja istraživanju uticaja vrste i broja izolatorskih članaka u izolatorskom lancu na pojavu ispada dalekovoda u određenom vremenskom periodu, sa namerom da se utvrde optimalni parametri koji dovode do smanjenja broja ispada usled preskoka na izolatorskim lancima.

Na taj način teži se povećanju pouzdanosti prenosnog sistema i smanjenju beznaponskih pauza izazvanih ovim vrstama poremećaja u radu elektroenergetskog sistema.

2. POUZDANOST, STABILNOST I UPRAVLJANJE PRENOSNIM ELEKTROENERGETSKIM SISTEMOM

U elektroenergetskom sistemu sva proizvedena električna energija se troši putem distributivnog sistema, koji se definiše kao poslednja faza u procesu isporuke električne energije i ima zadatak da obezbedi napajanje pojedinačnih potrošača. Obzirom na to da je električna energija postala osnovni resurs savremenog društva, pouzdanost i kontinuitet distributivnog sistema predstavljaju jedan od najznačajnijih pokazatelja efikasnosti celokupnog elektroenergetskog sistema [5].

Kvalitet električne energije uz kontinuitet snabdevanja predstavlja pouzdanost elektroenergetskog sistema, koja je obrnuto proporcionalna trajanju prekida u isporuci električne energije. Ona zavisi od očekivanih ili neočekivanih kvarova u sistemu, brzine reagovanja zaštitnih sistema, preventivnog održavanja i motivisanosti tehničkog osoblja. Detaljno proučavanje distributivnog sistema ima poseban značaj, jer njegova pouzdanost direktno utiče na ugled elektroprivrednog preduzeća, kvalitet usluge, zadovoljstva potrošača i ukupne prihode [6].

Preduslov za siguran, bezbedan i pouzdan rad elektroenergetskog sistema svakako predstavlja redovno održavanje, revitalizacija kao i rekonstrukcija postojećih kapaciteta. Sve ove akcije nastaju kao posledice redovne i detaljne analize rada elektroenergetskog sistema koja je osnov za uspešno funkcionisanje celokupnog sistema.

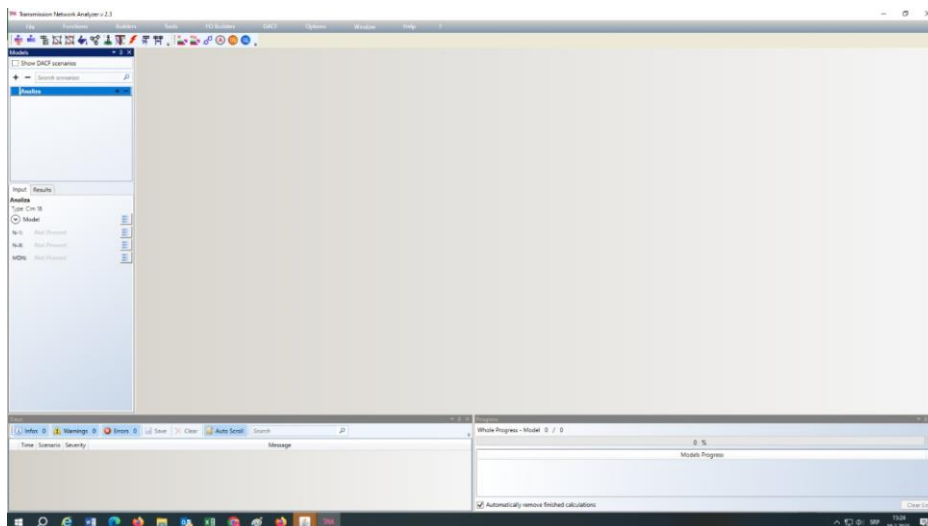
U okviru JP „Elektromreža Srbije“, pogon prenosa Novi Sad, oformljeni su stručno obučeni sektori za analizu i upravljanje koji u saradnji sa sektorima za održavanje planiraju otklanjanje nastalih, a takođe i potencijalnih kvarova u elektroenergetskoj mreži. Na sl. 1 je prikazano postrojenje trafostanice Novi Sad 3 naponskog nivoa 400kV/220kV/110kV.



Sl. 1. *Postrojenje trafostanice Novi Sad 3 naponskog nivoa 400kV/220kV/110kV*

Pouzdanost elektroenergetskog sistema predstavlja sposobnost sistema da omogući neprekidno napajanje potrošača električnom energijom koja se nalazi u okviru propisanih standarda i u željenom iznosu.

Analiza pogonskih stanja u elektroenergetskom sistemu se obavlja da bi se dobili podaci o ponašanju pojedinih elemenata elektroenergetskog sistema u zavisnosti od vrste pogonskog stanja. U pogonska stanja spadaju i kvarovi unutar elektroenergetskog sistema, i veoma je bitno imati uvid u ponašanje pojedinih elemenata u toku kvara. Kao alat za analizu dela elektroenergetskog sistema dispečeri centara upravljanja koriste različite programe za simulaciju neželjenih situacija uzimajući podatke tokova energije i parametara mreže u realnom vremenu. Nakon dobijenih rezultata analize vrše se akcije kako bi unapred osigurali (naravno ako je to moguće) siguran rad sistema. Jedan od bitnijih alata je sigurno TNA (Transmission Network Analyzer), sl. 2, koji se svakodnevno koristi za analizu, planiranje i nadzor prenosne mreže u elektroenergetskom sistemu.



Sl. 2. Program za analizu elektroenergetskog sistema (TNA)

3. ISPADI U TRAFOSTANICAMA USLED PRESKOKA NA IZOLATORSKIM LANCIMA I STRUJNIM MOSTOVIMA

Ispadi trafostanica ne moraju neposredno dovesti do prekida u napajanju krajnjih potrošača, naročito u sistemima gde postoji redundantna veza između više objekata. U savremenim elektroenergetskim mrežama, većina trafostanica funkcioniše u zatvorenoj (upetljanoj) mreži, što omogućava automatsko preusmeravanje opterećenja na susedne stanice u slučaju ispada. Ipak, ovakvi događaji mogu uzrokovati privremena preopterećenja na ostalim delovima sistema, što povećava rizik od kaskadnih kvarova, naročito ukoliko stanje traje duži vremenski period [7].

Zbog toga je od suštinske važnosti da vreme ispada bude minimalno, kako bi se izbegla sekundarna oštećenja opreme i obezbedila stabilnost mreže. Efikasno upravljanje ovakvim situacijama zahteva primenu automatizovanih sistema zaštite, brzu dijagnostiku uzroka ispada, kao i analizu podataka radi pravovremenog otkrivanja ponavljajućih problema. Posebna pažnja posvećuje se preventivnom održavanju i redovnoj kontroli ključnih elemenata kao što su izolatori, sabirnice, prekidači i zaštitni releji [8].

Izolatori služe za odvajanje delova pod naponom (provodnika) od uzemljenih delova (stubovi), kao i za nošenje i pričvršćivanje provodnika. Nalaze se na stubovima, sabirnicama, izvodima strujnih i naponskih mernih

transformatora, i na svim mestima gde provodnik može doći u kontakt sa delovima postrojenja koji u normalnom pogonskom stanju nisu pod naponom. Preskoci na izolatorskim lancima javljaju se usled promene fizičkog i hemijskog svojstva materijala od kojeg se izrađuju izolatori. Prilikom preskoka izolator gubi dielektrično svojstvo i postaje provodnik, i tada dolazi do nenormalnih pogonskih stanja i eventualnog ispada određenog elementa u postrojenju.

Na sl. 3 prikazan je izolator nakon preskoka, a na sl. 4 prikazan je ispravan izolator, koji zadržava svoja izolaciona svojstva i obezbeđuje pouzdan rad prenosnog elektroenergetskog sistema bez opasnosti od preskoka ili nestanka napona.



Sl. 3. Izolator nakon preskoka



Sl. 4. Ispravan izolator

Strujni mostovi služe za povezivanje provodnika između dva zatezna izolatorska lanca. Budući da povezuju provodnike, u normalnom pogonskom stanju su pod naponom, i povremeno se dešava preskok sa strujnog mosta na element koji u normalnom pogonskom stanju nije pod naponom.

Preskok na strujnim mostovima izaziva struje kvara koje dovode do reagovanja zaštite i ispada postrojenja. Strujni mostovi predstavljaju najslabiji kontakt između dva provodnika, i ukoliko kontakt između njih nije dobar, može doći do pregrevanja na mestu kontakta, što predstavlja opasnost za taj vod. Pregrevanje je veće što je veća snaga koju vod prenosi, sl. 5. Na sl. 6 je data zatezna stezaljka koja se koristi za pričvršćivanje provodnika ili kablova kao prikaz gde može doći do slabljenja kontakta na strujnim mostovima.



Sl. 5. Strujni mostovi na sabirnicama 220 kV



Sl. 6. Zatezna stezaljka

4. ANALIZA ISPADA U PRENOSNIM TRAFOSTANICAMA

Ispadi u 110 kV i 220 kV poljima usled preskoka na izolatorskim lancima retko se javljaju i usled nečistoće na samim lancima, što se rešava povremenim čišćenjem izolatora.

Strujni mostovi, kao najslabija tačka kontakta dva provodnika, često su razlog ispada. Kontakti strujnih mostova ponekad predstavljaju tačku povećanog grejanja što dovodi do opasnog pogonskog stanja na provodniku.

Analiza ispada u trafostanicama je izvršena za prenosne trafostanice na području Vojvodine koje su u nadležnosti JP „Elektromreža Srbije“, pogon prenosa Novi Sad. Analizom su obuhvaćene sledeće trafostanice: TS Zrenjanin 2, TS Sremska Mitrovica 2, TS Novi Sad 3, TS Srbobran i TS Subotica 3, što je dato u tabeli 1. Analizirani su ispadi polja u postrojenjima 110 kV i 220 kV. Podaci su prikupljeni tokom perioda od 16 godina, od 2000. do 2015. godine.

Tabela 1. Prikaz preskoka na izolatorske lance u TS za period od 16 godina

Red. br.	TS	Kvar u		Kvar na		
		110 kV	220 kV	izolatorskom lancu	strujnom mostu	nepoznat
1.	Zrenjanin 2	19	-	16	-	3
2.	S. Mitrovica 2	10	6	13	-	3
3.	Novi Sad 3	12	13	14	5	6
4.	Srbobran	1	1	1	1	1
5.	Subotica 3	1	-	-	-	-
Ukupno:		43	20	44	6	13

Ispadi polja 110 kV i 220 kV po godini pogona

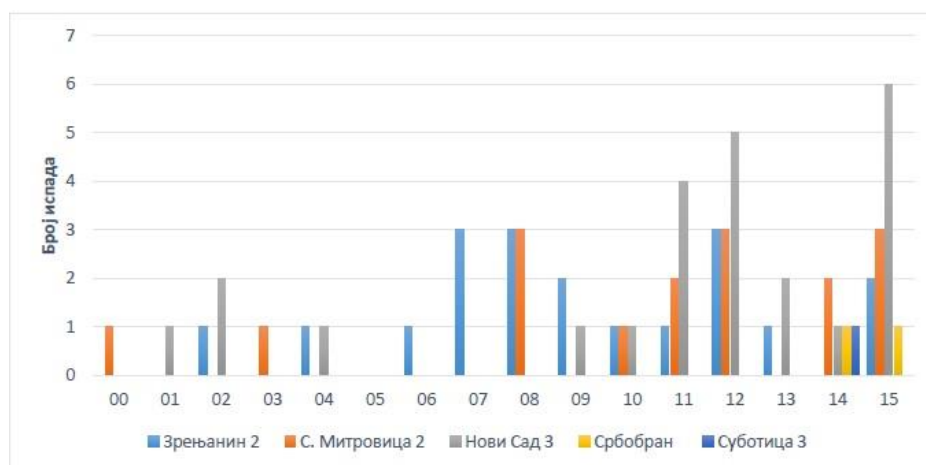
U tabeli 2 je dat broj ispada polja 110 kV i 220 kV na trafostanicama u zavisnosti od godine pogona.

Tabela 2. Broj ispada polja 110 kV i 220 kV na TS u zavisnosti od godine pogona

Red. br.	TS	Broj ispada po godini (2000-2015)																Ukupno
		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	
1.	Zrenjanin 2	-	-	1	-	1	-	1	3	3	2	1	1	3	1	-	2	19
2.	S. Mitrovica 2	1	-	-	1	-	-	-	-	3		1	2	3	-	2	3	16
3.	Novi Sad 3	-	2	2	-	1	-	-	-	-	1	1	4	5	2	1	6	25
4.	Srbobran	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	2
5.	Subotica 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Ukupno:		1	2	3	1	2	0	1	3	6	3	3	7	11	3	5	12	63

Prema podacima iz tabele 2, vidi se da broj ispada u poljima 110 kV i 220 kV raste tokom vremena, što je i očekivano obzirom na starenje opreme. Porastom broja ispada poslednjih godina javila se potreba za preduzimanjem mera koje bi smanjile ispadе u poljima.

Dijagramskim prikazom podataka iz tabele 2, jasno je prikazan porast ispada polja 110 kV i 220 kV, sl. 7.



Sl. 7. Dijagram broja ispada polja 110 kV i 220 kV na TS u zavisnosti od godine pogona

Ispadi polja 110 kV i 220 kV po mesecu u toku godine

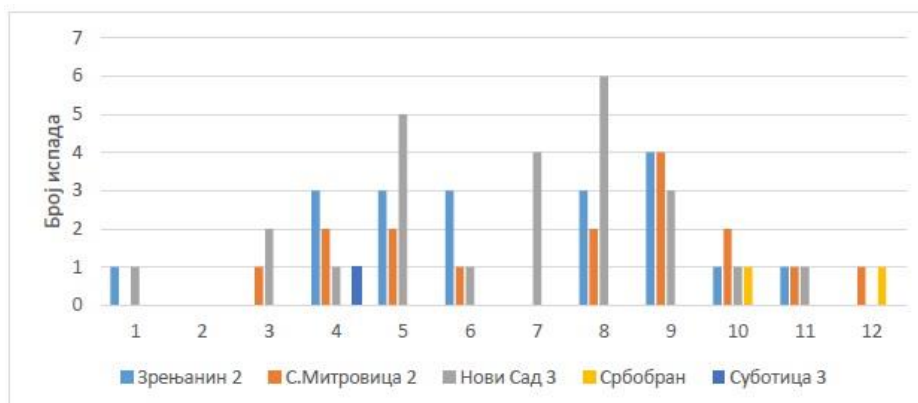
U tabeli 3 je dat broj ispada polja 110 kV i 220 kV na trafostanicama po mesecu u toku godine.

Tabela 3. Broj ispada polja 110 kV i 220 kV na TS po mesecu u toku godine

Red. br.	TS	Broj ispada po mesecu												Ukupno
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1.	Zrenjanin 2	1	-	-	3	3	3	-	3	4	1	1	-	19
2.	S. Mitrovica 2	-	-	1	2	2	1	-	2	4	2	1	1	16
3.	Novi Sad 3	1	-	2	1	5	1	4	6	3	1	1	-	25
4.	Srbobran	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	2
5.	Subotica 3	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Ukupno:		2	0	3	7	10	5	4	11	11	5	3	2	63

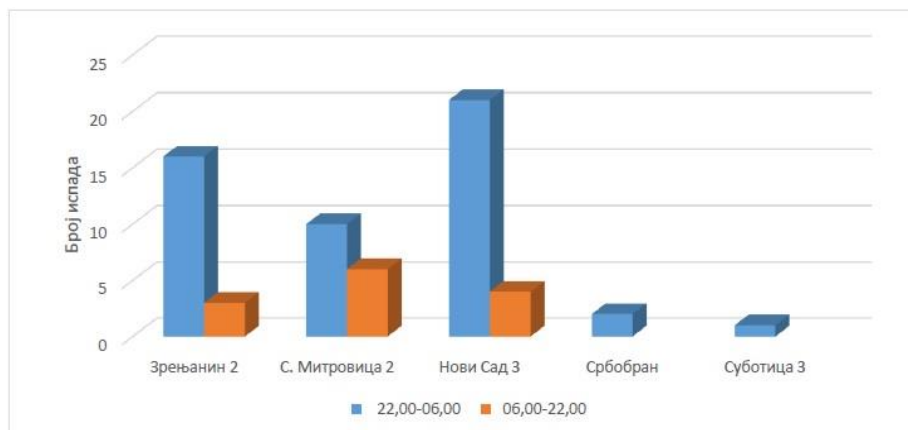
Detaljnou analizom ispada polja u trafostanicama po mesecu u toku godine, dolazi se do rezultata da se najveći broj ispada događa u toku prolećnog i letnjeg perioda godine. Prethodnom analizom se može utvrditi koje vremenske prilike povoljno ili nepovoljno utiču na nastanak kvarova. Naime, ptice su čest uzrok pojave kvara, što objašnjava povećan broj ispada tokom toplijeg dela godine.

Na sl. 8 je dijagramski prikazan broj ispada polja 110 kV i 220 kV na trafostanicama po mesecu u toku godine.

**Sl. 8.** Dijagram broja ispada polja 110 kV i 220 kV na TS po mesecu u toku godine

Ispadi polja 110 kV i 220 kV po času u toku dana

Analiza ispada trafostanica po času u toku dana se može koristiti za detaljnije utvrđivanje razloga ispada, kao i za statističku obradu pouzdanosti određenih polja i dalekovoda, sl. 9.



Sl. 9. Učešće pojedinih časova u ispadima polja 110 kV i 220 kV na TS

Daljom analizom je uočen vremenski obrazac u pojavljivanju kvarova u trafostanicama, što može ukazivati na uticaj spoljnih atmosferskih uslova na pouzdanost opreme. Analizom raspodele kvarova po vremenskim intervalima, vidi se da se najveći broj kvarova javlja u periodu od 22.00 do 06.00 časova, sl. 9. Ovaj obrazac sugerise da određeni atmosferski uslovi, kao što su pad temperature i povećana vlažnost tokom noći, mogu doprineti nastanku preskoka. Odatle se može pretpostaviti da su preskoci delimično izazvani i pojavom jutarnje rose, koja povećava površinsku provodljivost izolatora i drugih izolacionih delova.

5. REŠENJE PROBLEMA ISPADA NA 110 KV I 220 KV DALEKOVODIMA I PREDUZIMANJE MERA ZA KOORDINACIJU IZOLACIJE

U svim kritičnim poljima izvršena je zamena izolatora na fazama '0', '4', '8'. Izvršeno je dielektrično ispitivanje izolatorskih lanaca EN, EZ i DZ u svim fazama. U svim kritičnim dalekovodnim poljima izvršena je i zamena strujnih mostova u sve tri faze.

Takođe, postoji tendencija zamene porcelanskih izolatora staklenim, koji imaju bolje karakteristike i lakši su za pregled. Usled preskoka na porcelanskim izolatorima, on ostaje čitav, ali gubi svoja prvobitna dielektrična svojstva, dok se stakleni pri proboju raspadne i postaje i vidno oštećen.

Na dalekovodnim poljima 142/3, 143 i 192 na TS Zrenjanin 2 izvršena je zamena porcelanskih izolatora K-3 1*6, sl. 10, staklenim U-120BS 1*8, sl. 11.



Sl. 10. Porcelanski izolator



Sl. 11. Stakleni izolator

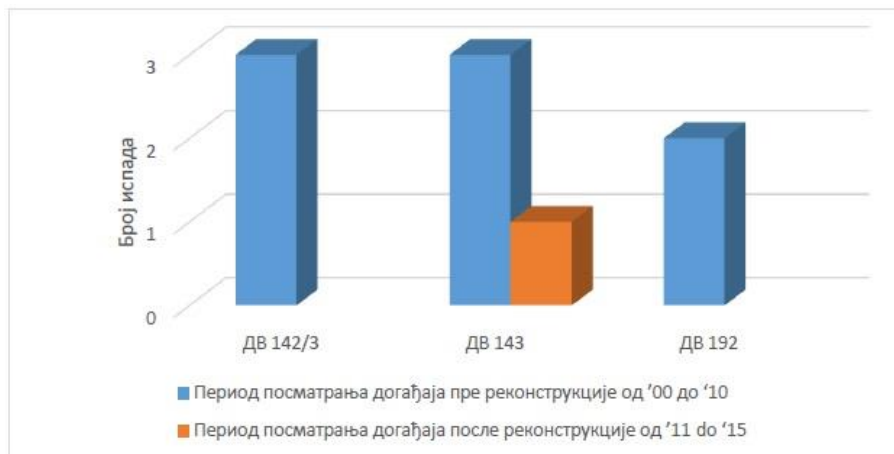
Broj izolatorskih članaka povećan je sa 6 porcelanskih, na 8 staklenih [9,10]. Posle zamene izolatora na navedenim poljima, dobijeni su očekivani rezultati u pogledu broja ispada na datim dalekovodnim poljima, tabela 4.

Tabela 4. Ispadi pre i posle rekonstrukcije DV polja u TS Zrenjanin 2

Polje broj	Period posmatranja događaja		Ukupno ispada
	Pre rekonstrukcije od '00 do '10	Posle rekonstrukcije od '11 do '15	
DV 142/3	3	-	3
DV 143	3	1	4
DV 192	2	-	2
Ukupno:	8	1	9

Nakon rekonstrukcije koja je podrazumevala zamenu porcelanskih izolatora od 6 članaka, za staklene od 8, vidi se da se vidno smanjio broj ispada u navedenim dalekovodnim poljima u TS Zrenjanin 2. To znači da za 110 kV postrojenje nije bila dobro izabrana koordinacija izolacije izolatorskih lanaca tih postrojenja.

Na sl. 12 je dijagramski prikazan ispad DV polja 110 kV pre i posle rekonstrukcije u TS Zrenjanin 2.



Sl. 12. *Ispadi DV polja 110 kV pre i posle rekonstrukcije u TS Zrenjanin 2*

Takođe, u navedenim DV poljima zamenjeni su strujni mostovi, čime je znatno smanjena i mogućnost preskoka na strujnim mostovima. Dubina strujnih mostova je sa dotadašnjih 120 cm povećana na 160 cm. Na poprečnoj vezi u fazi '0' između zateznog izolatorskog lanca i prekidača umetnut je izolatorski lanac sa izolatorima K-3 1*7. Umesto „U“ stremena ugrađena je zastavica na visećim izolatorskim lancima na izlaznom portalu i portalu između sabirnica. Sve te preduzete mere dovele su do smanjenja broja ispada u DV polju.

Na osnovu prethodne analize se može zaključiti da se rešenja za smanjenje verovatnoće ispada u 110 kV i 220 kV poljima ogledaju u sledećem:

- na svim visećim izolatorskim lancima K-3 gde ima 6 izolatora, povećati za 1;
- na svim visećim izolatorskim lancima K-3 gde ima 6 izolatora, ugraditi neki drugi tip izolatora, npr. staklene izolatore tipa U120-BS 1*8 kom;
- proveriti kontakte na strujnim mostovima i zameniti ih po potrebi;
- izmeriti prelazne otpornosti kontakata strujnih mostova i zameniti ih ako vrednosti ne odgovaraju zahtevanim.

Na kraju ove analize je potrebno istaći da dodatna ispitivanja nisu sprovedena do današnjeg dana, jer nije bilo promene u tipu korišćenih izolatora, a broj ispada u posmatranim dalekovodnim poljima se značajno smanjio. Pored toga, na svim novim i revitalizovanim dalekovodima primenjuju se stakleni izolatori, dok se porcelanski postepeno povlače iz upotrebe.

6. ZAKLJUČAK

Analiza ispada dalekovoda u trafostanicama koja je izvršena u pogonu prenosa Novi Sad, sa posebnim osvrtom na preskoke na izolatorskim lancima i

strujnim mostovima, pokazala je da ovi kvarovi ne samo da utiču na pouzdanost lokalnog napajanja, već mogu izazvati i lančana preopterećenja u okolnim delovima elektroenergetske mreže. Iako većina trafostanica funkcioniše u upetljanoj vezi koja obezbeđuje određeni stepen sigurnosti, produžena trajanja ispada mogu uzrokovati aktiviranje zaštitnih uređaja i dodatno narušiti stabilnost sistema.

Prilikom ispitivanja je uočen vremenski obrazac povećanog broja kvarova tokom noćnih sati, što može ukazivati na uticaj atmosferskih uslova, poput jutarnje rose, na pojavu preskoka. Takođe, evidentan je pozitivan trend smanjenja broja kvarova u dalekovodnim poljima u kojima su zamenjeni tipovi izolatora, pri čemu se sve više primenjuju stakleni izolatori, dok se porcelanski postepeno povlače iz upotrebe.

Detaljna analiza uzroka kvarova predstavlja ključni korak ka unapređenju pouzdanosti elektroenergetskog sistema. Takve analize omogućavaju identifikaciju kritičnih tačaka, donošenje pravovremenih tehničkih mera i izbor optimalne opreme, čime se smanjuje rizik od ponovnog javljanja kvarova. One se mogu primenjivati na pojedinačne elemente postrojenja, ali i na celokupan sistem, sa ciljem povećanja energetske efikasnosti i sigurnosti napajanja.

U savremenim sistemima, integracija novih tehnologija, naprednih materijala i softverskih alata za praćenje, dijagnostiku i upravljanje kvarovima postaje nezaobilazna. Samo uz sveobuhvatan pristup koji kombinuje prevenciju, analitiku i modernizaciju, moguće je ostvariti visok nivo operativne pouzdanosti i dugoročnu stabilnost elektroenergetskog sistema.

LITERATURA

- [1] J. Jovanović, *Proizvodnja i prenos električne energije*, Zavod za udžbenike, Beograd, 2005.
- [2] T. Gonen, *Electrical power transmission system engineering: Analysis and design* (3rd ed.), CRC Press, 2014.
- [3] J.J. Grainger, W.D. Stevenson, Jr., *Power system analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [4] D. Jovanović, *Proizvodnja i prenos električne energije*, VTŠNS, Novi Sad, 2013.
- [5] Lj. Milanković, *Proizvodnja i prenos električne energije*, Naučna knjiga, Beograd, 1966.
- [6] P. Kafle, M. Bhandari, L.B. Rana, *Reliability Analysis Techniques in Distribution System: A Comprehensive Review*, *International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM)*, Vol. 12, No. 2, 2022.

-
- [7] E. Lakervi, E.J. Holmes, Electricity Distribution Network Design, IET, 1995.
 - [8] J.D. McDonald, (Ed.), Electric power substations engineering (3rd ed.), CRC Press, 2012.
 - [9] <https://electro.tomathouse.com>
 - [10] R. Radetić, Priručnik za obuku rukovaoca TS-RP, Elektromreža Srbije, 2012.

UDK: 622:620.97(045)=163.41
DOI: 10.5937/bakar2601031S
NAUČNI RAD
Oblast: Energetika

Primljen: 26.01.2026.
Prerađen: 24.04.2026.
Prihvaćen: 07.05.2026.

**METODOLOGIJA OPTIMIZACIJE ENERGETSKE TRANZICIJE
RUDNIKA PRIMENOM INŽENJERSKOG EKSPERIMENTA**
**METHODOLOGY FOR OPTIMIZING THE ENERGY TRANSITION OF
MINES USING ENGINEERING EXPERIMENT**

Željko Simić¹

¹Elektrane Stanari, Termoelektrana Stanari, Republika Srpska, BiH

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

Izvod

Ovaj rad predstavlja metodološki pristup optimizaciji energetske tranzicije na degradiranim rudarskim površinama primenom teorije inženjerskog eksperimenta. Fokus istraživanja je na prenameni brownfield lokacija u fotonaponske sisteme uz primenu modifikovanog modela višestruke regresije za kvantifikaciju uticaja investicija i efikasnosti institucija na potrošnju obnovljive energije. Poseban akcenat stavljen je na meriteljsku preciznost prema standardu ISO/IEC 17025, analizu merne nesigurnosti u uslovima visoke zaprašenosti rudnika, te uvođenje tehnologija za skladištenje energije poput vanadijumskih redox-flow baterija (VRFB). Rezultati ukazuju na to da sinergija tehničke standardizacije, ekološke obnove kroz sekvstraciju ugljenika i regulatorne podrške direktno minimizuje ESG rizike, čineći brownfield lokacije ekonomski i tehnički opravdanim rešenjem u odnosu na greenfield projekte.

Ključne reči: inženjerski eksperiment, energetska tranzicija, degradirana rudarska zemljišta, fotonaponski sistemi, ISO/IEC 17025

Abstract

This paper presents a methodological approach to optimizing the energy transition on degraded mining surfaces by applying the theory of engineering experiments. The research focuses on repurposing brownfield sites into photovoltaic systems, utilizing a modified multiple regression model to quantify the impact of investment types and institutional effectiveness on renewable energy consumption. Special emphasis is placed on metrological precision according to the ISO/IEC 17025 standard, measurement uncertainty analysis in high-dust mining environments, and the implementation of energy storage technologies such as Vanadium Redox Flow Batteries (VRFB). The results indicate that the synergy of technical standardization, ecological restoration through carbon sequestration, and regulatory support directly minimizes ESG risks, making brownfield locations a more economically and technically viable solution compared to greenfield projects.

Keywords: engineering experiment, energy transition, degraded mining lands, photovoltaic systems, ISO/IEC 17025

UVOD

Ovaj rad koristi metodologiju inženjerskog eksperimenta kako bi optimizovao proces tranzicije, tretirajući degradirane površine kao dinamičke sisteme sa kontrolisanim ulaznim parametrima. Globalni proces dekarbonizacije podrazumeva intenzivno smanjenje kapaciteta zasnovanih na uglju, što zahteva razvoj novih modela za prenamenu postojećih energetske resursa. Gledano iz inženjerske perspektive, to podrazumeva gašenje praktično jedne proizvodne jedinice svakog dana u naredne dve decenije. Ovako intenzivan tempo tranzicije zahteva hitno pronalaženje novih modela za prenamenu resursa, što ovaj rad čini direktno primenjivim u rešavanju globalnog energetskeg debalansa.

Ovaj metodološki okvir ne nudi samo teorijsku analizu, već služi kao inženjerska platforma za smanjenje merne nesigurnosti u ekstremnim rudarskim uslovima. Implementacijom standardizovanih protokola i naprednih sistema za skladištenje, rad postavlja temelje za transformaciju degradiranih lokacija u predvidljive i stabilne energetske čvorove moderne mreže. Ovo istraživanje ne posmatra energetske tranzicije samo kao tehničko pitanje instalacije panela, već kao višekriterijumsku optimizaciju. U tom modelu, tehnički parametri definišu izlaznu funkciju proizvodnje energije (ES), dok socio-ekonomski (IHDI, GEF) i ekološki (ϵ) faktori predstavljaju granične uslove koji definišu održivost projekta na specifičnoj lokaciji rudnika.

U ovom radu optimizacija energetske tranzicije na degradiranim rudarskim površinama definiše se kao inženjerski problem maksimizacije godišnje proizvodnje električne energije (ES) iz fotonaponskog sistema, uz istovremenu minimizaciju gubitaka usled zaprljanosti panela (λ_p) i merne nesigurnosti (u). Posmatrani sistem tretira se kao skup međusobno povezanih tehničkih i meriteljskih parametara, gde ulazne veličine (intenzitet sunčevog zračenja H_t , raspoloživa površina S , efikasnost sistema η , te gubici λ_p i λ_c) određuju izlaznu funkciju proizvodnje energije. U tom smislu, optimizacija se formalno može prikazati kao višekriterijumski problem:

$$\max ES = f(H_t, S, \eta, \lambda_p, \lambda_c)$$

$$\min \epsilon = f(u, \lambda_p)$$

gde su:

- ES – ukupna godišnja proizvodnja električne energije,
- H_t – intenzitet sunčevog zračenja,
- S – raspoloživa površina za instalaciju,
- η – ukupna efikasnost sistema,
- λ_p – gubici usled zaprljanosti panela,
- λ_c – tehnički gubici sistema,
- u – standardna merna nesigurnost,
- ϵ – ukupna relativna greška sistema.

Svi navedeni parametri su merljivi ili procenjivi u realnim uslovima rudarskog okruženja, pri čemu su ograničenja definisana karakteristikama lokacije, tehničkim standardima i regulatornim okvirom.

TEORIJSKE OSNOVE INŽENJERSKOG EKSPERIMENTA U ENERGETICI

Analiza tehničke izvodljivosti na specifičnim podlogama

U okviru ovog istraživanja, inženjerski eksperiment podrazumeva kontrolisano variranje ključnih parametara sistema, pre svega stepena zaprljanosti fotonaponskih panela (λ_p) i nivoa merne nesigurnosti (u), uz praćenje njihove refleksije na ukupnu proizvodnju električne energije (ES). Eksperiment se zasniva na kombinaciji terenskih uslova karakterističnih za rudarsko okruženje i matematičkog modeliranja energetske proizvodnje. Uvođenje fotonaponskih sistema u energetske sisteme koji su tradicionalno bili zasnovani na uglju zahteva strogo pridržavanje međunarodnih normi. Analiza pokazuje da je industrija solarnih panela danas jedna od najnaprednijih u pogledu standardizacije testiranja i validacije proizvodnje. Prilikom planiranja inženjerskog eksperimenta, ključni ulazni parametri za postavljanje fotonaponskih sistema na degradiranim zemljištima su nagib terena i izgradiva površina. Prema tehničkim preporukama organizacije ICMA [1], za optimalnu održivost lokacije neophodno je da nagib bude manji od 10%, kako bi projekat bio tehnički i ekonomski opravdan.

Matematički model

U cilju kvantifikacije uticaja različitih tipova investicija i kvaliteta institucionalnog okvira na proces energetske tranzicije, u radu se primenjuje modifikovani empirijski model višestruke regresije. Ovaj model omogućava analizu direktnih i interakcionih efekata ključnih ekonomskih i ekoloških parametara na potrošnju obnovljive energije. Matematička formulacija operativnog modela, prema metodologiji koju su postavili Yahya i Rafiq [2], definisana je sledećom jednačinom:

$$REC_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 BFI_{it} + \alpha_2 GFI_{it} + \alpha_3 GEF_{it} + \alpha_4 BFIGEF_{it} + \alpha_5 GFIGEF_{it} + \alpha_6 TROP_{it} + \alpha_7 CO_{2it} + \alpha_8 GDP_{it} + \varepsilon_{it}$$

gde su:

- α_0 : Slobodan član (intersept) – predstavlja procenjenu potrošnju obnovljive energije u slučaju kada bi sve ostale varijable u modelu imale vrednost nula;
- $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_8$: Koeficijenti parcijalne regresije – oni kvantifikuju jačinu i smer uticaja svake pojedinačne varijable na REC;

- REC (Renewable Energy Consumption) – predstavlja potrošnju obnovljive energije, a u inženjerskom smislu, ovaj parametar direktno korelira sa energetsom raznolikošću sistema.
- Za kvantifikaciju udela različitih resursa u ukupnoj proizvodnji uvodi se inovativna mera, Faktor energetske raznolikosti (EDF – Energy Diversity Factor), definisan izrazom:

$$EDF = \left(\sum_{i=0}^n E_i^{\frac{1}{2}} \right)^2$$

Gde su:

- EDF: Faktor energetske raznolikosti koji meri stepen diverzifikacije energetskog miksa,
- E_i - frakcija (udeo) pojedinačnog energetskog izvora i u ukupnoj potrošnji energije, pri čemu važi da je: $\sum E_i = 1$,
- n - Ukupan broj različitih energetskih izvora koji se analiziraju u sistemu.
- BFI (Brownfield Investment) – predstavlja investicije u brownfield lokacije (prenamena postojećih industrijskih/rudarskih površina);
- GFI (Greenfield Investment) – predstavlja investicije u greenfield lokacije (izgradnja na novim, neiskorišćenim površinama);
- GEF (Government Effectiveness) – predstavlja indeks efikasnosti vlade (regulatorni kvalitet). U predloženom modelu, GEF se posmatra kao institucionalni okvir koji omogućava realizaciju investicija. Ovaj parametar je usko korelisan sa Indeksom ljudskog razvoja prilagođenim nejednakosti (IHDI), jer efikasna administracija direktno smanjuje gubitke u ljudskom razvoju usled nejednakosti. IHDI služi kao kontrolni mehanizam za validaciju varijable GEF i izračunava se kao:

$$IHDI = \sqrt[3]{(1 - A_{health})(1 - A_{education})(1 - A_{income}) \cdot \sqrt[3]{LEI \cdot EI \cdot GNI}}$$

Gde su:

- A_{health} , $A_{education}$, A_{income} - Koeficijenti nejednakosti (procentualni gubitak indeksa) u oblastima zdravstva, obrazovanja i dohotka,
- LEI (Life Expectancy Index) - Indeks očekivanog životnog veka,
- EI - Indeks obrazovanja (kombinacija prosečnih i očekivanih godina školovanja),
- GNI (Gross National Income index) - Indeks bruto nacionalnog dohotka.
- BFIGEF – predstavlja interakciju brownfield investicija sa efikasnošću vlade;

- GFIGEF – predstavlja interakciju greenfield investicija sa efikasnošću vlade;
- TROP (Trade Openness) – predstavlja trgovinsku otvorenost tržišta;
- CO₂ – predstavlja emisiju ugljen-dioksida (indikator zagađenja);
- GDP – predstavlja bruto domaći proizvod po glavi stanovnika. U modelu se ovaj parametar normalizuje kroz Globalni nacionalni dohodak (GNI) primenom logaritamske skale:

$$GNI = \frac{\ln(GNI_{pc}) - \ln(100)}{\ln(75000) - \ln(100)}$$

Gde je:

- GNI_{pc} - Bruto nacionalni dohodak po glavi stanovnika u dolarima (PPP),
- 100 i 75.000 - Minimalne i maksimalne referentne vrednosti koje propisuje UNDP za potrebe standardizacije indeksa.

Integracija IHDI parametara u analizu varijable GEF omogućava modelu da prepozna kako institucionalna efikasnost (GEF) transformiše ekonomske ulaze (GDP, BFI) u održivu energetska tranziciju, minimizujući pritom ESG rizike. Cilj inženjerskog eksperimenta je da kroz optimizaciju procesa na rudniku utičemo na rast koeficijenata α_1 i α_4 čime dokazujemo da su brownfield lokacije efikasniji put ka tranziciji nego neiskorišćena zelena polja (greenfield). Iz aspekta teorije eksperimenta, ova jednačina predstavlja funkciju cilja. Cilj inženjera je da kroz optimizaciju faktora BFI (investicije) i saradnju sa regulatorom (GEF), maksimizuje izlaz REC, uz minimizaciju slučajne greške ε . Poseban značaj u ovom modelu imaju interakcioni članovi BFIGEF i GFIGEF, koji matematički dešifruju sinergiju između tehno-ekonomskih ulaganja i institucionalne podrške. Sa stanovišta inženjerskog eksperimenta, ovi parametri ukazuju na to da energetska tranzicija degradiranih zemljišta nije samo tehničko pitanje instalacije kapaciteta, već proces čija efikasnost direktno zavisi od regulatornog okruženja.

Statističke osnove inženjerskog eksperimenta i obrada mernih podataka

Za statističku obradu eksperimentalnih podataka korišćene su osnovne mere deskriptivne statistike, u skladu sa klasičnom metodologijom eksperimentalnog naučnog rada [3]. U skladu sa teorijom dizajna i analize eksperimenata, analiza složenih tehničkih sistema zasniva se na identifikaciji ključnih izlaznih karakteristika i faktora koji na njih utiču, pri čemu se statističkim metodama kvantifikuju jačina pojedinačnih uticaja i njihove međusobne interakcije, čime se omogućava efikasna optimizacija sistema uz minimalan broj eksperimental-

nih ispitivanja [4]. Ove metode predstavljaju temelj teorije inženjerskog eksperimenta i posebno su značajne u analizi tehničkih i eksploatacionih parametara prilikom planiranja energetske tranzicije na degradiranim rudarskim površinama. Aritmetička sredina primenjena je kao reprezentativna vrijednost rezultata merenja relevantnih parametara, kao što su nagib terena, raspoloživa izgrađiva površina, prostorna homogenost lokacije i tehničke karakteristike fotonaponskih modula, a izračunata je prema izrazu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

gde je:

- $\bar{x}$ - Aritmetička sredina uzorka, koja predstavlja najverovatniju vrednost merene veličine,
- x_i - Pojedinačna izmerena vrednost u i -tom merenju,
- n - Ukupan broj izvršenih merenja.

Radi ocene rasipanja rezultata i pouzdanosti dobijenih podataka izračunate su varijansa i standardna devijacija uzorka, pri čemu je standardna devijacija određena izrazom:

$$s = \sqrt{\frac{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}{n - 1}}$$

Varijansa je korišćena kao mera disperzije rezultata i kao osnova za procenu homogenosti mernih podataka, što je od posebnog značaja prilikom evaluacije pogodnosti degradiranih rudarskih površina za ugradnju fotonaponskih elektrana, gde izražena heterogenost terena može imati direktan uticaj na tehničku i ekonomsku izvodljivost projekta. Standardna greška aritmetičke sredine, koja služi za procenu pouzdanosti srednje vrednosti i smanjenje uticaja slučajnih grešaka, izračunata je prema izrazu:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Gdje su:

- $s_{\bar{x}}$ - Standardna greška aritmetičke sredine (merna nesigurnost tipa A),
- s - Standardna devijacija uzorka,
- n - Broj ponovljenih merenja u eksperimentu.

Ovim je omogućena procena pouzdanosti srednje vrednosti i smanjenje uticaja slučajnih grešaka merenja. Radi preciznije komparacije rezultata dobijenih u različitim uslovima eksploatacije (npr. uticaj različitih stepena zaprašenos-

ti senzora), primenjuje se Welch-ov t-test, koji je robustan na nejednakost varijansi unutar uzoraka:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Gde su:

- $\bar{x}_1$ i $\bar{x}_2$ - Aritmetičke sredine prvog i drugog uzorka,
- s_1^2 i s_2^2 - Varijanse prvog i drugog uzorka,
- n_1 i n_2 - Broj merenja (veličine) prvog i drugog uzorka.

Ova statistička procedura omogućava inženjeru da sa visokim stepenom pouzdanosti potvrdi efikasnost predloženih mera optimizacije. Na osnovu statistički obrađenih srednjih vrednosti ulaznih parametara, u inženjerskom eksperimentu vrši se kvantifikacija energetskog potencijala degradiranih rudarskih površina za potrebe izgradnje fotonaponskih elektrana. Proizvodnja električne energije iz fotonaponskog sistema izražena je relacijom [5]:

$$E_A = H_t \cdot S \cdot \eta_r \cdot \eta_{inv} \cdot [1 - \beta_p (T_c - 25)] \cdot (1 - \lambda_p) \cdot (1 - \lambda_c)$$

Gde su:

- E_A - Ukupna generisana električna energija (kWh/h)
- H_t - Intenzitet ukupnog sunčevog zračenja na nagnutu površinu panela (kW/m^2),
- S - Ukupna izgrađiva površina fotonaponskih modula (m^2),
- η_r - Nominalna efikasnost fotonaponskog panela pri standardnim testnim uslovima (STC),
- η_{inv} - Efikasnost invertora (stepen korisnosti pretvaranja jednosmerne u naizmeničnu struju),
- β_p - Temperaturni koeficijent snage panela ($\text{\%/}^\circ\text{C}$ ili $1/^\circ\text{C}$),
- T_c - Radna temperatura fotonaponske ćelije ($^\circ\text{C}$),
- 25 - Referentna temperatura ćelije prema STC ($^\circ\text{C}$),
- λ_p - Gubici usled zaprljanosti panela (eng. *soiling losses*), što je ključni faktor u rudarskom okruženju,
- λ_c - Gubici u kablovima i ostalim komponentama sistema (eng. *cabling/mismatch losses*).

Na osnovu izračunate satne energije, ukupna godišnja proizvodnja električne energije (E_s) određuje se izrazom:

$$E_S = \sum_{t=1}^{8760} E_{A(t)}$$

Gde su:

- E_S - Ukupna godišnja proizvodnja električne energije (kWh ili MWh),
- $E_{A(t)}$ - Proizvodnja električne energije u konkretnom satu t (kWh), proračunata prema prethodno navedenoj jednačini za E_A ,
- t - Vremenski interval (sat) u godini,
- 8760 - Ukupan broj sati u neprestupnoj godini.

Primena ovog modela omogućava da se rezultati statističke obrade mernih podataka direktno integrišu u proces optimizacije tehničke izvodljivosti fotonaponskih sistema na degradiranim rudarskim površinama, čime teorija inženjerskog eksperimenta dobija svoju praktičnu ulogu u procesu energetske tranzicije. Posmatrano iz tog ugla, primena navedenih statističkih metoda obezbeđuje da rezultati inženjerskog eksperimenta ne predstavljaju samo deskriptivnu tehničku procenu, već kvantitativno utemeljenu osnovu za donošenje odluka o prenameni degradiranih rudarskih površina u funkcionalne energetske objekte zasnovane na obnovljivim izvorima energije.

MATEMATIČKO MODELIRANJE ENERGETSKE TRANZICIJE

Specifičnost merenja i energetska metrologija u rudarskom okruženju

U inženjerskom eksperimentu, kvalitet dobijenih rezultata direktno zavisi od preciznosti ulaznih podataka. Prilikom postavljanja fotonaponskih (PV) sistema na degradiranim rudarskim površinama, meriteljski sistem se suočava sa specifičnim izazovima koji nisu prisutni kod standardnih solarnih elektrana:

- Uticaj ambijentalnih faktora na merne senzore - na lokacijama poput rudnika, visoka koncentracija suspendovanih čestica (prašine) i vibracije od teške mehanizacije direktno utiču na rad piranometara (senzora sunčevog zračenja),
- Sistemske greške - zaprašenost senzora može dovesti do sistematske greške merenja od 5% do 10%, što u matematičkom modelu, koje je naveden u poglavlju 2 značajno povećava član slučajne greške (ϵ),
- Održavanje sledivosti - sa aspekta metrologije, neophodno je uspostaviti stroge procedure redovnog održavanja i čišćenja senzora kako bi se očuvala sledivost merenja prema nacionalnim etalonima.

Statistička organizacija rezultata i analiza merne nesigurnosti

Svaki rezultat merenja u inženjerstvu je nepotpun bez iskaza o njegovoj mernoj nesigurnosti. U teškim uslovima rada, gde su faktori okruženja promenljivi, puko očitavanje trenutnih vrednosti nije dovoljno, već se primenjuje statistička obrada ponovljenih merenja. Prema stručnoj literaturi koja tretira statističku organizaciju merenja [6], ako su svi elementi uzorka ravnopravni, rezultat merenja se dobija kao aritmetička sredina uzorka:

$$x_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

gde x_s predstavlja najverovatniju vrednost merene veličine, kao što je intenzitet solarnog zračenja na degradiranoj površini. Međutim, za procenu kvaliteta samog eksperimenta i stabilnosti mernog mesta u rudniku, ključno je odrediti mernu nesigurnost (MN) tipa A. Ona se određuje isključivo metodom statističke obrade rezultata ponovljenih merenja i numerički je jednaka standardnom odstupanju srednje vrednosti:

$$u_A = S_x A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_s)^2}{n(n-1)}}$$

Gde je:

- $u_A(S_x A)$: Standardna merna nesigurnost tipa A - predstavlja procenu rasipanja rezultata oko srednje vrednosti usled slučajnih uticaja,
- n : broj ponovljenih merenja - ukupna količina nezavisnih očitavanja piranometra u posmatranom intervalu,
- x_i : pojedinačni rezultat merenja - konkretna vrednost zračenja (npr. u W/m^2) očitana u i -tom merenju,
- x_s : aritmetička sredina uzorka – prosečna vrednost svih n merenja koja služi kao referentna tačka za proračun odstupanja,
- $(x_i - x_s)$: kvadrat odstupanja – matematički način da se osigura da i pozitivna i negativna odstupanja od proseka podjednako doprinose ukupnoj nesigurnosti.

Ovaj matematički iskaz direktno utiče na ekonomsku isplativost projekta. Ako posmatramo sistem snage 20 MW (Utility Scale), čak i mala merna nesigurnost od $u = 2\%$ u proceni solarnog resursa može rezultirati odstupanjem od nekoliko stotina MWh na godišnjem nivou. Upravo zbog toga, za inženjera energetike ova statistika predstavlja direktan faktor rizika koji utiče na:

1. Validaciju modela: određuje da li naša regresiona jednačina (REC) precizno odgovara stvarnom energetsom potencijalu,

-
2. Povrat investicije: merna nesigurnost se direktno prevodi u finansijsku nesigurnost, što je posebno kritično kod brownfield investicija gde su marže optimizacije uže.

Stoga, primena standarda ISO/IEC 17025 i metodologije izražavanja merne nesigurnosti prema Đekiću i saradnicima [6] u terenskim uslovima rudnika nije samo administrativno pitanje, već tehnička neophodnost. Kalibracija opreme osigurava da podaci prikupljeni tokom eksperimenta ispunjavaju uslove Centralne granične teoreme i Gausove raspodele, čime postaju pouzdana osnova za donošenje strateških odluka o energetske tranziciji.

INŽENJERSKI IZAZOVI I MERENJA

Kao što ističe izveštaj agencije IRENA [7], uspostavljanje najsavremenijih objekata za postavljanje i evaluaciju kompetencija, veština i znanja za obnovljivu energiju treba smatrati suštinskim za uspešno uvođenje ovih tehnologija, čime se direktno povezuje stručnost kadra sa pouzdanošću sistema [7]. Prema izveštaju Mirova [8], proces evaluacije investicija u energetske tranzicije mora uključiti sistematsku analizu doprinosa Ciljevima održivog razvoja UN-a, pri čemu se insistira na tome da identifikovanje i minimiziranje ESG rizika povezanih sa investicijama predstavlja podjednako važan deo procena [8]. Standardizacija procesa na tzv. oštećenim lokacijama (eng. distressed sites) podrazumeva preuzimanje dugoročnih obaveza održavanja.

Princip [9] ističe da integracija solarnih sistema na zatvorenim odlagalištima efektivno produžava fazu post-operativne brige o zemljištu kroz redovno održavanje zaštitnog sloja (eng. cap maintenance) i sigurnosne infrastrukture. Pored operativnih izazova, tranzicija ka održivim izvorima energije zahteva i strateški pristup upravljanju resursima. Saleh i Hassan [10], ističu da su tehnološke inovacije revolucionisale obnovljive izvore energije čineći ih efikasnijim i skalabilnijim, ali su istovremeno nametnule potrebu za intenzivnijom upotrebom specifičnih mineralnih sirovina u poređenju sa konvencionalnim postrojenjima. Još se mora dodati da tehnička kompleksnost izazova u oblasti obnovljivih izvora energije zahteva multidisciplinarni pristup koji prevazilazi isključivo tehničke okvire i uključuje društvene i ekološke dimenzije novih tehnologija [11].

Ovakav pristup sugerise da inženjer u eksperimentu ne sme posmatrati mernu opremu izolovano, već kao deo šireg socio-tehničkog sistema u kojem lokalni uslovi direktno diktiraju preciznost rezultata. Sakellariou i Mulvaney [11] još navode da više od polovine firmi u solarnom sektoru prijavljuje ozbiljne poteškoće pri zapošljavanju kvalifikovanih inženjera, što ukazuje na značajan jaz između potreba industrije i trenutne ponude specijalizovanog kadra. Ovaj globalni podatak potvrđuje da je edukacija i verifikacija kompetencija osoblja kritična tačka za stabilnost svakog istraživačkog procesa, što je osnova za identifikaciju nekonformnosti u ovom radu.

Ubrzana tranzicija ka obnovljivim izvorima energije u Evropi, iako vođena ambicioznim klimatskim ciljevima, suočava se sa ozbiljnim izazovima u pogledu stabilnosti elektroenergetskog sistema usled nedovoljnih investicija u tehnologije skladištenja energije. Visoka penetracija neupravljivih izvora dovodi do paradoksa u kojem se zelena energija često odbacuje (eng. curtailment) zbog niske potražnje, nedostatka interkonekcija ili neadekvatnih kapaciteta za balansiranje mreže [12]. Ovi rizici naglašavaju da inženjerski eksperiment ne sme biti fokusiran samo na nominalnu snagu panela, već na meriteljsku preciznost sistema koji omogućava predvidljivost proizvodnje, čime se direktno smanjuje rizik od nestabilnosti mreže i potencijalnih energetske ispada (eng. blackouts). U tom smislu, matematički opis scenarija energetske tranzicije pruža okvir za razumevanje dinamike rasta kapaciteta obnovljivih izvora. Prema metodologiji koju predlažu Akaev i Davydova [13,14], nominalna globalna potražnja za energijom (E_w) direktno je uslovljena populacionim trendovima i stabilizacijom potrošnje, što se definiše relacijom:

$$E_w(t) = e_w \cdot N_w(t)$$

Gde su:

- $E_w(t)$ - Globalna potražnja za primarnom energijom u vremenu t ,
- e_w - Specifična potrošnja energije po glavi stanovnika (konstanta preuzeta iz literature),
- $N_w(t)$ - Prognozirani broj svetske populacije u godini t .

Za modeliranje prodora solarne energije kao specifičnog resursa, primenjuje se modifikovana logistička funkcija oblika:

$$E_r(t) = E_{r1} \cdot \left[1 + \frac{E_{r2}}{1 + r_{ES} \cdot \exp[-\sigma_{ES}(t - T_0)]} \right]$$

Definicija parametara i metodološki okvir:

- $E_r(t)$ - Predviđeni ukupni kapacitet resursa u posmatranoj godini t ,
- E_{r1} - Bazni (početni) kapacitet resursa u referentnoj godini,
- E_{r2} - Relativni potencijal rasta (faktor zasićenja) u odnosu na baznu vrednost,
- r_{ES} - Parametar koji definiše početne uslove difuzije tehnologije,
- σ_{ES} - Stopa tehnološkog prodora koja određuje nagib S-krive,
- T_0 - Vreme maksimalnog rasta (tačka infleksije).

Parametri r_{ES} i σ_{ES} identifikovani su metodom najmanjih kvadrata (LSM) na osnovu empirijskih podataka o instaliranim kapacitetima u periodu 2010–2025. godine. Dok je struktura modela preuzeta iz literature [13,14], konkretne

vrednosti koeficijenata su rezultat originalne obrade podataka prilagođene specifičnostima tržišta obnovljivih izvora energije, čime je omogućena integracija lokalnih faktora u globalni trend.

U okviru inženjerskog eksperimenta, ključni korak ka validnosti rezultata je identifikacija kritičnih tačaka u kojima laboratorijska praksa odstupa od strogih zahteva standarda ISO/IEC 17025. Primenom metodologije analize jaza (Gap Analysis), prepoznate su ključne nekonformnosti koje mogu ugroziti preciznost merenja u rudniku. Tabela 1 sistematizuje ove nedostatke, oslanjajući se na iskustva iz akademskog sektora [15], te nudi konkretne inženjerske preporuke za standardizaciju procesa.

Matematički modeli prodora tehnologija i energetske efikasnosti

Za razumevanje dinamike tranzicije neophodno je primeniti modele koji kvantifikuju brzinu prodora izvora i nivo efikasnosti. Nova paradigma energetike u 21. veku nalaže stabilizaciju potrošnje prema relaciji: $E_w = 1,8 \cdot N_w$ pri čemu se predviđa da će se globalna potražnja kretati u direktnoj proporciji sa populacijom, uz pretpostavku postizanja 1.8 tone po glavi stanovnika godišnje [13,14]. Ključna varijabla u ovom procesu je stopa energetske efikasnosti (k_{ee}), koja prati logistički zakon rasta:

$$k_{ee} = \frac{k_{ee0}(1 + C)}{1 + C \cdot \exp[-d(t - T_{ee0})]}$$

Definicija parametara:

- k_{ee} - Projektovana stopa energetske efikasnosti u godini t ,
- k_{ee0} - Početna vrednost stope energetske efikasnosti u referentnoj godini,
- C - Koeficijent zasićenja koji određuje maksimalni potencijal unapređenja energetske efikasnosti,
- d - Stopa intenziteta rasta-brzina kojom se usvajaju tehnologije energetske efikasnosti,
- t - Posmatrana godina u simulacionom periodu,
- T_{ee0} - Referentna (bazna) godina od koje se prati rast efikasnosti.

Ova funkcija modelira prelazak sa ekstenzivnog na intenzivni razvoj, dok se rast kapaciteta specifičnog resursa (E_r) opisuje funkcijom:

$$E_r(t) = E_{r1} + \frac{E_{r2}}{1 + r_{ES} \cdot \exp - \sigma_{ES}(t - T_o)}$$

gde su parametri identifikovani metodom najmanjih kvadrata na osnovu retrospektivnih podataka i ambicioznih scenarija razvoja. Preciznost identifikacije ovih parametara direktno zavisi od kvaliteta podataka. Pored praćenja rasta pojedinačnih kapaciteta, nivo uspešnosti energetske tranzicije

kvantifikuje se putem Faktora energetske raznolikosti (EDF), koji prema već navedenoj jednačini: $EDF = \left(\sum_{i=0}^n E_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}$ precizno meri prelazak sa monolitnog sistema na bazi uglja ka hibridnom modelu sa više izvora. Ako su merenja opterećena nekonformnostima, poput onih sistematizovanih u Tabeli 1, matematički model gubi prediktivnu moć, što na kraju ugrožava dostizanje ciljeva dekarbonizacije definisanih Pariškim sporazumom.

Tabela 1. Analiza jaza - trenutna laboratorijska praksa i zahtevi standarda ISO/IEC 17025 [15]

ISO 17025 Zahtev	Detektovana nekonformnost (Jaz)	Inženjerska preporuka za otklanjanje
5.2.1 Osoblje (Osposobljenost)	Upotreba tehničkog osoblja i studenata bez specifične obuke za solarne merne sisteme.	Uspostavljanje programa kontinuirane obuke i verifikacija kompetencija za rad sa specifičnom PV opremom.
5.4.5 Validacija metoda	Korišćenje nestandardnih metoda merenja na rudarskom terenu bez SOP-ova (Standardnih operativnih procedura).	Validacija internih metoda za merenje degradacije panela u uslovima prašine; izrada pisanih SOP-ova za svaki test.
5.5.3 Oprema (Upravljanje)	Nedostatak zapisa o servisiranju i kalibraciji; rizik od neovlašćenog rukovanja opremom.	Uvođenje digitalnih kontrolnih kartona; definisanje hijerarhije pristupa i obavezna eksterna kalibracija senzora.
4.2.2 Sistem upravljanja	Nepostojanje definisane Politike kvaliteta i Poslovnika o kvalitetu laboratorije.	Izrada dokumentovanog sistema upravljanja kvalitetom koji integriše tehničke i upravljačke procese.
4.2.6 Odgovornost menadžmenta	Nedefinisane uloge; preklapanje dužnosti tehničkog i upravljačkog sektora.	Imenovanje menadžera kvaliteta sa jasnim ovlašćenjima za nadzor nad eksperimentalnim radom.

Uspostavljanje jasnih uloga i odgovornosti unutar laboratorijskog menadžmenta (ISO 17025, klauzula 4.2.6), kako predlažu Cebekhulu i Mugova [15], predstavlja mikronivo institucionalne efikasnosti koji direktno korelira sa varijablom GEF (Government Effectiveness) u našem matematičkom modelu: bez precizno uređenog unutrašnjeg sistema upravljanja kvalitetom, čak i najpovoljnije eksterne investicije gube na svojoj efektivnosti usled nepouzdanosti mernih podataka.

STANDARDIZACIJA I KVALITET

Savremeni metodološki pristupi u evaluaciji energetske projekata, poput onih koje primenjuje Mirova [8], insistiraju na posmatranju čitavog životnog ciklusa, od ekstrakcije sirovina do faze kraja životnog veka. U kontekstu tranzicije na degradiranim rudarskim površinama, inženjerski eksperiment se više ne može fokusirati isključivo na trenutnu efikasnost FNE panela. Neophodno je uvesti koncept sistemske ekološke restauracije, koji predstavlja pomak sa čisto inženjerske sanacije ka holističkom pristupu koji minimizuje rezidualne ESG rizike i osigurava dugoročnu stabilnost ekosistema [16]. Uvođenje održivosti kao vodećeg principa energetskog razvoja zahteva da se sektor energetike, koji zbog oslanjanja na neobnovljive izvore predstavlja realnu pretnju stabilnosti privrednih tokova, u što većoj meri oslanja na obnovljive izvore energije (OIE). Korišćenje energije sunčevog zračenja smatra se jednim od najefikasnijih puteva jer se njime značajno ne remeti prirodna ravnoteža toka materije i energije [17]. Međutim, tehnička realizacija ovog potencijala direktno zavisi od primene rigoroznih standarda koji garantuju kvalitet, trajnost i bezbednost opreme. Kako dalje navode Vukićević i saradnici [17], standardizacija u oblasti sunčeve energije na prostorima Zapadnog Balkana obuhvata ključne aspekte koji su direktno primenjivi na optimizaciju energetskih sistema na degradiranim površinama, oslanjajući se na harmonizovane međunarodne norme:

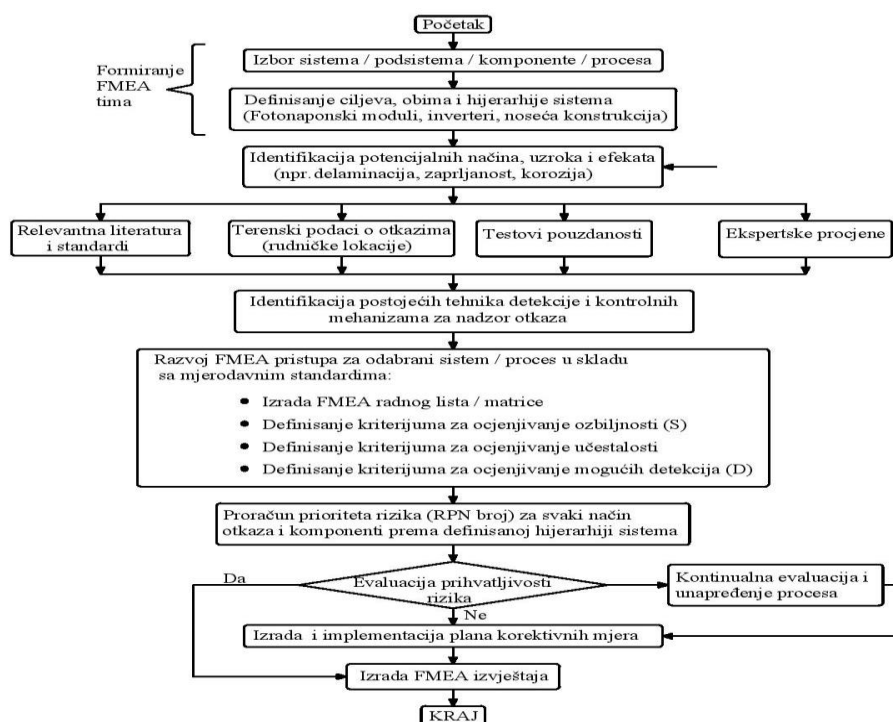
- Terminologija: Primena unificiranih tehničkih izraza i definicija prema standardu EN ISO 9488 predstavlja nulti korak u inženjerskom eksperimentu. Bez precizno definisanih pojmova, koji su kroz nacionalne institute (poput BAS, SRPS ili MEST) integrisani u lokalno zakonodavstvo, nemoguće je uspostaviti jedinstven okvir za razumevanje merne nesigurnosti i interpretaciju rezultata dobijenih sa različitih lokacija u regionu.
- Karakteristike prijemnika: Standardi serije ISO 22975 i EN 12975-1 definišu stroge opšte zahteve za trajnost, pouzdanost i mehaničku čvrstoću komponenti. Ovi parametri su kritični pri projektovanju fotonaponskih sistema koji se izlažu specifičnim, često agresivnim uslovima eksploatacije na post-rudarskim površinama, gde su faktori poput vetra, vibracija i hemijskog sastava tla izraženiji nego na standardnim lokacijama.
- Metode ispitivanja: Standardi poput EN ISO 9806 i EN 12977 propisuju rigorozne protokole za validaciju zahteva fabrički proizvedenih sistema.

U kontekstu istraživanja degradiranih površina na prostoru BiH i Srbije, ovi standardi čine osnovu za sistematsko otklanjanje nekonformnosti koje su

tipične za post-rudarske pejzaže u regionu. Ukoliko oprema za upravljanje i senzori ne ispunjavaju stroge zahteve za preciznost i trajnost (prema EN 12977-5), rezultati inženjerskog eksperimenta gube na validnosti, bez obzira na geografsku lokaciju.

Analiza rizika i bezbednosni aspekti standardizacije fotonaponskih sistema

Uspostavljanje standardizovanih procedura (poput onih koje pominje IRENA [7]), ključno je za rešavanje specifičnih rizika na rudničkim lokacijama, kao što su požari na instalacijama ili geotehnička nestabilnost. Sa stanovišta zaštite životne sredine, standardizacija obezbeđuje prevenciju akcidenata koji bi mogli kontaminirati tlo, kroz strogo definisane drenažne sisteme koji sprečavaju da voda korišćena za eventualno gašenje požara na fotonaponskim modulima ispere štetne materije u dublje, rekultivisane slojeve zemljišta. Za sistematsko upravljanje tehničkim i ekološkim rizicima na degradiranim lokacijama, neophodno je primeniti strukturiranu metodologiju poput FMEA analize (eng. Failure Mode and Effects Analysis).



Sl. 1. Metodološki okvir FMEA analize prilagođen fotonaponskim sistemima na rudničkim lokacijama [18]

Dijagram (slika 1) prikazuje strukturirani proces upravljanja rizikom koji počinje formiranjem ekspertskeg tima i identifikacijom specifičnih uzroka otkaza poput delaminacije i zaprljanosti panela prašinom sa rudarskih površina. Ključna tačka procesa je proračun RPN broja (Risk Priority Number) i evaluacija prihvatljivosti rizika, nakon čega se, po potrebi, vrši implementacija korektivnih mera kako bi se osigurala dugoročna stabilnost energetskog postrojenja. Primena ovog modela u inženjerskom eksperimentu omogućava rangiranje rizika putem RPN broja koji se dobija matematičkom evaluacijom tri ključna faktora prema relaciji:

$$RPN = S \times O \times D$$

Definicija parametara i metodologija evaluacije:

- *S* (Severity – Ozbiljnost) - Procena težine posledice otkaza na rad fotonaponskog sistema (skala 1–10),
- *O* (Occurrence – Učestalost) - Verovatnoća pojavljivanja određenog uzroka otkaza tokom životnog veka postrojenja (skala 1–10),
- *D* (Detection – Detekcija) - Mogućnost da se otkaz ili njegov uzrok otkrije pre nego što nastupi zastoj u proizvodnji (skala 1–10).

Poreklo podataka i metodologija proračuna:

Vrednosti parametara *S*, *O* i *D* definisane su primenom hibridnog modela evaluacije. Ozbiljnost (*S*) i mogućnost detekcije (*D*) procenjene su na osnovu inženjerskih specifikacija opreme i literaturnih preporuka za fotonaponske sisteme u industrijskim uslovima. S druge strane, učestalost (*O*) je direktno korelirana sa eksperimentalnim rezultatima ovog rada, koristeći terenske podatke o dinamici zaprljanosti panela (λ_p) na konkretnoj lokaciji. Ovakav pristup omogućava da se teoretski okviri rizika kalibrišu prema realnim uslovima eksploatacije na degradiranim rudarskim površinama.

Prema istraživanjima Patila i saradnika [18], najkritičniji načini otkaza kod fotonaponskih panela uključuju delaminaciju i zaprljanost (eng. soiling), što je od posebnog značaja za post-rudarske pejzaže Balkana zbog visoke koncentracije prašine. Savremeni pristup nalaže da se analiza ne oslanja isključivo na literaturne podatke koji predstavljaju zastarele tehnologije, već na hibridne setove koji uključuju terenske podatke o otkazima i ekspertske evaluacije.

Geotehnički izazovi i tehnike dekompanktacije

Jedan od najvećih inženjerskih izazova pri prenameni rudnika u solarne parkove jeste sabijanje tla (eng. soil compaction) uzrokovano decenijskom upotrebom teške mehanizacije [19]. Sabijeno tlo ne samo da ugrožava stabilnost temelja za solarne panele, već onemogućava proces prirodne revegetacije. Kao eksperimentalno rešenje uvode se:

- Tehnike ripanja - Mehaničko razbijanje zbijenih slojeva radi poboljšanja drenaže.
- Fitoremedijacija: Primena specifičnih biljnih vrsta koje apsorbiraju rezidualne zagađivače iz zemljišta dok istovremeno stabilizuju podlogu ispod fotonaponskih konstrukcija.

Cirkularni model: Re-mining i ekonomska održivost

Proces napuštanja proizvodnje energije iz uglja pretvara rudnike u tzv. zarobljenu imovinu. Međutim, primena modela re-mining-a omogućava da ovi lokaliteti ponovo postanu produktivni. Dwiharto i saradnici [16] ističu da se rudarski otpad, poput kvarcnog peska (silica), može rafinisati u visokokvalitetne sirovine za proizvodnju solarnih panela i baterija. Tabela 2. prikazuje sinergiju između tehničkih zahvata i ekoloških benefita prema novom modelu:

Tabela 2. Inovativne strategije upravljanja post-rudarskim prostorom [16]

Inženjerska strategija	Opis procesa	Doprinos energetske tranziciji
Silica Re-mining	Prerada silicijum-dioksida iz jalovine.	Proizvodnja komponenti za FNE i baterijske sisteme.
Sistemska restauracija	Manipulacija biofizičkim faktorima zemljišta.	Stvaranje samoodrživih ekosistema (High Positive Impact).
LCA Evaluacija	Analiza otiska od ekstrakcije do reciklaže.	Minimizacija ESG rizika i „end-of-life“ otpada.
Land Reshaping	Tehnička stabilizacija odlagališta.	Sigurna integracija „Utility Scale“ solarnih parkova.
Valorizacija silikata	Korišćenje kvarcnog peska (materijala sloja) za CFBC.	Smanjenje troškova nabavke sirovina i valorizacija rudarskog otpada u energetske resurs.

Koncept re-mining-a i rafinacije silikata, koje je naveo Dwiharto sa saradnicima [16], nalazi svoju direktnu primenu u tehnološkom procesu TE Stanari. Obzirom na to da TE Stanari koristi savremeni CFBC, za njegov rad je neophodan materijal sloja koji se primarno sastoji od kvarcnog peska visoke čistoće.

U kontekstu inženjerskog eksperimenta, ovo otvara dvostruku mogućnost za optimizaciju:

1. Sinergija resursa: Kvarcni pesak ekstrahovan re-mining-om sa rudarskih odlagališta Stanara može se istovremeno koristiti kao materijal sloja za potrebe TE, ali i kao rafinisana sirovina za lokalnu proizvodnju ili reparaciju komponenti solarnih panela.
2. Smanjenje ekološkog otiska: Ovakav integrisani pristup omogućava da se nusproizvodi jedne tehnologije (rudarstvo/TE) direktno transformišu

u ulazne parametre za drugu (zelena energija/FNE), čime se dramatično smanjuje količina otpada i troškovi transporta sirovina.

Ovaj pristup direktno podržava preporuke Svetske banke [20] o neophodnosti sveobuhvatnih planova remedijacije. Umesto da rudnik ostane ekološki teret, on kroz inženjerski eksperiment postaje baza za novu industrijsku granu – prerađu mineralnog otpada za potrebe globalne zelene politike.

EVALUACIJA EKOLOŠKIH, DRUŠTVENIH I UPRAVLJAČKIH ASPEKATA (ESG)

Evaluacija energetske tranzicije na degradiranim rudarskim površinama zasniva se na integraciji tehničkih, ekoloških i upravljačkih faktora, pri čemu se naglasak stavlja na merljivost i primenjivost rezultata u realnim uslovima.

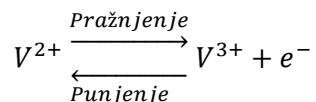
Tehnička infrastruktura i merni sistemi

Za potrebe inženjerskog eksperimenta i monitoringa sistema primenjuju se savremeni merni sistemi zasnovani na DAQ platformama za prikupljanje podataka u realnom vremenu, dok se termovizijska ispitivanja stanja fotonaponskih modula vrše upotrebom bespilotnih letelica. Za procenu energetskog prinosa i optimizaciju sistema koriste se standardni softverski alati (PVSyst, MATLAB, SPSS, Minitab), čime se obezbeđuje pouzdana analiza performansi i verifikacija modela.

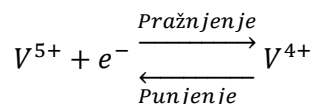
Tehnologije za obezbeđivanje fleksibilnosti mreže u post-ugljevnom periodu

Integracija fotonaponskih sistema u elektroenergetsku mrežu zahteva obezbeđivanje fleksibilnosti zbog varijabilnosti sunčevog zračenja. U tom kontekstu, sistemi za skladištenje energije (BESS) omogućavaju balansiranje proizvodnje i potrošnje i rad sistema u optimalnim režimima [21]. Poseban značaj imaju vanadijumske redox-flow baterije (VRFB), koje omogućavaju nezavisno dimenzionisanje snage i kapaciteta skladištenja. Elektrohemijski proces punjenja i pražnjenja opisan je reakcijama:

- Reakcija na anodi:



- Reakcija na katodi:



Napon otvorenog kola iznosi približno $E_{ocv} = 1.2 \text{ V}$. Prednost ove

tehnologije ogleda se u mogućnosti dugotrajnog skladištenja energije, što je posebno pogodno za primenu na degradiranim rudarskim lokacijama. Efikasnost sistema zavisi od upravljačkih algoritama, koji omogućavaju pouzdanu procenu stanja napunjenosti i operativnu stabilnost sistema.

Ekološka obnova i sekvestracija ugljenika

Ekološka rekultivacija degradiranih površina doprinosi povećanju neto primarne produktivnosti (NPP) i sekvestraciji ugljenika [22]. Efikasnost korišćenja svetlosti (ε), kao ključni parametar ovog procesa, modeluje se relacijom:

$$\varepsilon(x,t) = T_{\varepsilon 1}(x,t) \cdot T_{\varepsilon 2}(x,t) \cdot W_{\varepsilon}(x,t) \cdot \varepsilon_{max}$$

Definicija parametara:

- $\varepsilon(x,t)$ - Stvarna efikasnost korišćenja svetlosti na lokaciji x u vremenu t ,
- ε_{max} - Maksimalna teoretska efikasnost iskorišćenja svetlosti u idealnim uslovima (obično se uzima vrednost iz literature, npr. 0,389gC/MJ),
- $T_{\varepsilon 1}(x,t)$ i $T_{\varepsilon 2}(x,t)$ - Temperaturni stresni koeficijenti koji modeluju ograničenja rasta usled ekstremno niskih ili visokih temperatura,
- $W_{\varepsilon}(x,t)$ - Koeficijent vodnog stresa koji reflektuje uticaj vlažnosti vazduha i dostupnosti vode na fotosintezu.

U ovom radu, parametar ε_{max} je preuzet kao referentna vrednost iz relevantne literature za tip vegetacije predviđen projektom rekultivacije (npr. trava ili mešovita šuma). Koeficijenti $T_{\varepsilon 1}$, $T_{\varepsilon 2}$ i W_{ε} izračunavaju se na bazi meteoroloških podataka (temperatura vazduha i vlažnost) prikupljenih tokom inženjerskog eksperimenta na lokaciji rudnika. Ovakva metodologija omogućava da se teoretski potencijal sekvestracije ugljenika kalibriše prema realnim mikroklimatskim uslovima degradirane rudarske površine. U kontekstu ovog rada, ovakav pristup osigurava da kombinacija solarne energije i biološke obnove maksimizuje ekološki potencijal zemljišta pod različitim klimatskim uslovima.

DISKUSIJA REZULTATA OPTIMIZACIONOG MODELA

Simulacioni rezultati primenjenog optimizacionog modela ukazuju na to da tehnički parametri sistema, posebno gubici usled zaprljanosti panela (λp) i mer-na nesigurnost (u), imaju direktan i kvantifikovan uticaj na ukupnu proizvodnju električne energije (ES). Smanjenje ovih parametara kroz adekvatno održavanje i unapređenje mernih procedura predstavlja ključni uslov za povećanje energetske efikasnosti sistema na degradiranim rudarskim površinama. Analiza

pokazuje da, iako brownfield lokacije zahtevaju veća početna ulaganja u odnosu na greenfield projekte, prvenstveno zbog složenosti pripreme terena i geotehničkih ograničenja, njihova optimizacija kroz definisani model omogućava efikasnije korišćenje raspoložive površine (S) i postojećih infrastrukturnih resursa. U tom kontekstu, institucionalni faktori, predstavljeni kroz parametar efikasnosti regulatornog okvira (GEF), imaju značajnu ulogu u smanjenju investicionog rizika i omogućavanju realizacije projekata. U skladu sa postavljenim modelom, može se zaključiti da optimizacija energetske tranzicije na degradiranim rudarskim površinama nije isključivo tehnički problem, već rezultat međudelovanja tehničkih parametara sistema i eksternih ograničenja definisanih lokacijskim i regulatornim uslovima.

U ovom delu, rezultati optimizacije se analiziraju kroz prizmu projektovanih scenarija zasnovanih na inženjerskom eksperimentu. S obzirom na to da su parametri dobijeni u kontrolisanim uslovima, Tabela 3 prikazuje očekivana poboljšanja pod pretpostavkom pune implementacije Standardnih operativnih procedura (SOP) i meriteljskih protokola.

Tabela 3. Projektovane performanse sistema u optimalnom scenariju (pod pretpostavkama SOP-a)

Parametar optimizacije	Simbol	Inicijalno stanje	Nakon optimizacije	Poboljšanje (%)
Merna nesigurnost (Tip A)	u	8,2%	1,4%	+ 82,9%
Gubici usled zaprljanosti	λ_p	12,5%	4,2%	+ 66,4%
Godišnja proizvodnja	E_S	18,42 GWh	20,15 GWh*	+ 9,39%
Faktor rizika (RPN)	RPN	144	48	- 66,6%

Interpretacija rezultata i povezivanje funkcija cilja

Vrednosti prikazane u Tabeli 3 predstavljaju simulacione/projektovane rezultate dobijene primenom definisanog optimizacionog modela i pretpostavljenih uslova pune implementacije SOP procedura i ISO/IEC 17025 zahteva. Diskusija rezultata ukazuje na to da se tehnička funkcija cilja (E_S) mora posmatrati kao ulazni podatak za regresioni model (REC). Povezanost ove dve funkcije u procesu optimizacije nije direktna u smislu zamene kapaciteta (npr. TE sa FNE), već metodološka. Inženjerska optimizacija merne nesigurnosti (u) direktno hrani regresioni model kvalitetnijim podacima. U tom smislu, procene koeficijenta α_1 i α_4 u modelu REC postaju statistički stabilnije jer se smanjuje slučajna greška (ε). To znači da, pod pretpostavkom definisanom u SOP-u, stroga kontrola meriteljstva prema ISO 17025 standardu pretvara brownfield lo-

* Vrednost dobijena simulacijom modela pod pretpostavkom eliminacije sistematskih meriteljskih grešaka.

kaciju iz nepouzdanog energetskeg resursa u predvidljiv element energetskeg miksa. Iako fotonaponski sistemi na degradiranim površinama objektivno ne mogu u potpunosti kompenzovati snagu baznih postrojenja (poput TE snage 300 MW), njihova optimizacija kroz ovaj model doprinosi energetskej diversifikaciji (EDF faktor) i smanjenju ESG rizika, što je ključni zahtev moderne energetske tranzicije.

ZAKLJUČAK

Rezultati istraživanja potvrđuju da se energetska tranzicija na degradiranim rudarskim površinama ne može posmatrati izolovano, već kao složen inženjerski problem čija uspešnost zavisi od integracije dve funkcije cilja. Prva funkcija, tehničko-meriteljska (E_S), kroz inženjerski eksperiment i strogu primenu standarda ISO/IEC 17025, osigurava predvidljivost proizvodnje energije. Kvantifikacijom uticaja zaprljanosti (λ_p) i redukcijom merne nesigurnosti (u), degradirane površine prestaju biti rizične lokacije i postaju tehnički pouzdani energetske sistemi. Projekcije modela ukazuju na mogućnost povećanja efikasnosti proizvodnje za 9,39% uz značajno smanjenje faktora rizika (RPN). Druga funkcija, regresiono-ekonomska (REC), koristi optimizovane podatke iz prve funkcije kako bi kvantifikovala nivo energetske tranzicije. Povezanost ove dve funkcije u procesu optimizacije je hijerarhijska: tehnička preciznost na terenu (prva funkcija) direktno smanjuje slučajnu grešku (ε) u regresionom modelu (druga funkcija). Time se dokazuje da sinergija meriteljske sledivosti i institucionalne podrške (GEF) čini brownfield investicije (BFI) ekonomski superiornijim u odnosu na greenfield projekte.

Uvođenje standardizovanih SOP-ova i naprednih tehnologija skladištenja (VRFB) postavlja merljivu osnovu za stabilnost elektroenergetskog sistema u post-ugljevnom periodu. Iako fotonaponski sistemi na specifičnim lokacijama poput rudnika Stanari predstavljaju samo deo energetskeg miksa, primenjeni metodološki okvir ukazuje da energetska tranzicija oštećenih zemljišta, uz adekvatnu optimizaciju, može predstavljati efikasan put ka dekarbonizaciji i ispunjenju ESG ciljeva.

LITERATURA

- [1] ICMA (2025). Solar@Scale: Siting Solar on Brownfields and Underutilized Lands. Webinar Proceedings, International City/County Management Association, March 19, 2025, 9-10
- [2] Yahya, F., & Rafiq, M., (2019). Brownfield, greenfield, and renewable energy consumption: Moderating role of effective governance. SAGE, Energy & Environment, 30(5), 1-19
- [3] Borojević, S., (1978). Metodologija eksperimentalnog naučnog rada, drugo izdanje, Radnički Univerzitet Radivoj Ćirpanov, Novi Sad, 68-70
- [4] Rushing, H., Karl, A., & Wisnowski, J. (2013). Design and analysis of experiments by Douglas Montgomery: A supplement for using JMP, Cary, NC: SAS Institute Inc. 1-5
- [5] Song, J., Choi, Y., Yoon, S., (2015). Analysis of photovoltaic potential at abandoned mine promotion districts in Korea, Geosystem Engineering, Vol. 18, No.3, Pukyong National University, 168-172
- [6] Đekić, S., Kovačević A., Brajović, D., Osmokrović, P., (2016). Merenje dielektričnih osobina: statistička organizacija i izražavanje merne nesigurnosti, monografija, Zavod za fiziku, tehničkih fakulteta, Univerziteta Bograd, 249-250
- [7] IRENA, International Renewable Energy Agency, (2013). International Standardisation in the Field of Renewable Energy, Innovation and Technology Centre, Bonn. 35-36
- [8] Mirova, (2024). Energy Transition Infrastructure, Impact Report 2024, Mirova Research Center, NATIXIS Investment Managers, Cs St Paul de Tartas, 20-23
- [9] Princic, K., (2025). Harnessing the Sun to Empower Communities Repurposing Landfills and Brownfields for Solar Development, CEP Renewables, Chagrin Falls, 18-25
- [10] Saleh, H. M., Hassan, A. I., (2024). The challenges of sustainable energy transition: A focus on renewable energy, Review Article, Applied Chemical Engineering (2024) Volume 7 Issue 2, Radioisotope Department, Nuclear Research Center, Cairo, 1-24
- [11] Sakellariou, N. & Mulvaney, D., (2013). Engineers and the Renewable Energy Transition: Challenges and Opportunities, Journal Of Professional Issues In Engineering Education & Practice © ASCE / January 2013, University Of California, LIB., 12-18

- [12] Fotis, G., Maris, T. I., Mladenov, V., (2025). Risks, Obstacles and Challenges of the Electrical Energy Transition in Europe: Greece as a Case Study, *Sustainability* 2025, 17, 5325., MDPI, Basel, 1-3
- [13] Akaev, A. A. & Davydova, O. I., (2021). Mathematical Description of Energy Transition Scenarios Based on the Latest Technologies and Trends, *Energies* 2021, 14, 8360, MDPI, Basel, 9-12
- [14] Akaev, A. A. & Davydova, O. I., (2021). A Mathematical Description of Selected Energy Transition Scenarios in the 21st Century, Intended to Realize the Main Goals of the Paris Climate Agreement, *Energies* 2021, 14, 2558, MDPI, Basel, 3-13
- [15] Cebekhulu, B. M. B. & Mugova, C., (2017). Quality Control in a University Laboratory: Evaluating the Gap between ISO/IEC-17025 Requirements and the Thin Section Laboratory's Processes, *Proceedings of the 2017 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM) Bristol, UK, July 24-25, 2017*, 614-625
- [16] Dwiharto, A., Djumarno, D., Riyanto, S., & Permana, D., (2025). Sustainable Post-mining Management is a Practical Solution in Ecology Restoration and Green Energy Innovation, *The Mercu Buana Ecobiz Energy International Conference: Sustainability and ESG Reporting in the Energy Sector*, Faculty of Economic and Business Management, Universitas Mercu Buana, Jakarta, Indonesia, 103-112
- [17] Vukićević, A., Topalović, I., Petković, M., Mirković Đorđević, M., (2018). Standardizacija u oblasti obnovljivih izvora energije, 31. Međunarodni kongres o procesnoj industriji – Procesing 18, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 83-93.
- [18] Patil, R. B., Khalkar, A., Al-Dahidi, S., Pimpalkar, R. S., Bhandari, S., Pecht, M., (2024). Reliability and Risk Assessment of Solar Photovoltaic Panels Using a Failure Mode and Effects Analysis Approach: A Case Study. *Sustainability* 2024, 16, 4183, MDPI, Basel, 7-14
- [19] Saputra, R., Hanum, W. N., & Gunawan, V. A., (2025). Post-Mining Land Use Regulations and Practices in the United States of America: Lesson for Indonesia. *Journal of Law, Environmental and Justice*, 3(1), 104-133.
- [20] The World Bank, (2023). *Scaling Up to Phase Down: Financing Energy Transitions in the Power Sector*, International Bank for Reconstruction and Development, Washington 27-31

-
- [21] Lawder, M. T., Suthar, B., Northrop, P. W. C., De, S., Hoff, C.M., Leiermann O., (2014). Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications, BESS and BMS for Grid-Scale Applications, 0018-9219 2014, IEEE, 8-9
 - [22] Liao, Q., Liu, X., Xiao, M., (2022). Ecological Restoration and Carbon Sequestration Regulation of Mining Areas—A Case Study of Huangshi City, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 4175, MDPI, Basel, 3-6

UDK: 658.15:001.(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2601055B

NAUČNI RAD

Oblast: Mikroekonomija

Primljen: 10.08.2026.

Prerađen: 14.09.2026.

Prihvaćen: 18.09.2026.

**FINANSIJSKE PERFORMANSE I POSLOVNA EFIKASNOST: STUDIJA
SLUČAJA NAUČNOISTRAŽIVAČKOG INSTITUTA (2020–2025)**

**FINANCIAL PERFORMANCE AND BUSINESS EFFICIENCY: A CASE
STUDY OF A SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE (2020–2025)**

Dejan Bugarin^{1a}, Marija Jonović^{1b}, Vanja Trifunović^{1c}, Divna Pacić^{1d}

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

^{1a} E-mail: dejan.bugarin@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9103-4614>

^{1b} E-mail: marija.jonovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-8418-2523>

^{1c} E-mail: vanja.trifunovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4839-8751>

^{1d} E-mail: divna.pacic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-2930-670X>

Izvod

Izvršena je procena finansijskih i operativnih performansi Instituta (imajući u vidu zaštitu podataka, u radu neće biti pomenuto ime instituta) u periodu 2020–2025, sa fokusom na rast imovine, strukturu kapitala, profitabilnost, likvidnost i dinamiku radne snage. Ukupna imovina i kapital beležili su kontinuiran rast, dok su obaveze značajno smanjene, što je unapredilo solventnost i umanjilo finansijski rizik. Pokazatelji likvidnosti ostali su na visokom nivou, dostižući maksimum 2023. godine, dok su pokazatelji profitabilnosti (ROA, ROE i profitna marža) nakon 2022. godine značajno opali, ukazujući na smanjenu efikasnost korišćenja sredstava. Ulaganja u ljudske resurse potvrđena su povećanjem broja zaposlenih i rashoda za zarade, što je doprinelo rastu operativnih troškova. Rezultati ukazuju na povećanu otpornost organizacije, ali i opadanje profitabilnosti, naglašavajući potrebu za strateškim upravljanjem troškovima i imovinom.

Ključne reči: finansijske performanse, obrt imovine, likvidnost, profitabilnost, struktura kapitala, dinamika radne snage

Abstract

An assessment of the Institute's financial and operational performance (with the Institute's name omitted for data protection purposes) was conducted for the 2020–2025 period, focusing on asset growth, capital structure, profitability, liquidity, and workforce dynamics. Total assets and capital showed continuous growth, while liabilities were significantly reduced, thereby improving solvency and lowering financial risk. Liquidity indicators remained high, peaking in 2023, whereas profitability indicators (ROA, ROE, and profit margin) declined significantly after 2022, signaling reduced efficiency in asset utilization. Investments in human resources were evidenced by an increase in the number of employees and payroll expenses, contributing to a rise in operating costs. The results indicate increased organizational resilience alongside declining profitability, highlighting the need for strategic cost and asset management.

Keywords: financial performance, asset turnover, liquidity, profitability, capital structure, workforce dynamics

1. UVOD

Analiza finansijskih izveštaja predstavlja ključni instrument za procenu operativne efikasnosti, likvidnosti i ukupne ekonomske stabilnosti organizacije [1-4]. Tokom poslednjih godina, promenljivi makroekonomski uslovi zahtevali su od instituta da dinamično usklađuje rast imovine, upravljanje dugovima i ulaganja u ljudski kapital. Ovaj rad pruža sveobuhvatnu analizu finansijskog razvoja naučnoistraživačkog instituta u periodu od 2020. do 2025. godine. Analizom pokazatelja kao što su tekući koeficijent likvidnosti, brzi koeficijent likvidnosti, prinos na ukupnu imovinu (ROA) i prinos na kapital (ROE), istraživanje ima za cilj identifikaciju osnovnih trendova koji utiču na poslovne performanse. Pored toga, analizirani su raspored radne snage i troškovi zarada kako bi se procenio njihov uticaj na ukupnu efikasnost poslovanja.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

Ovo istraživanje koristi kvantitativnu deskriptivnu metodologiju zasnovanu na istorijskim finansijskim podacima preuzetim od Agencije za privredne registre Republike Srbije (APR) za šestogodišnji period (2020–2025). Obuhvaćeni parametri uključuju podatke iz APR-a (ukupna imovina, ukupni kapital, ukupne obaveze), pokazatelje efikasnosti (obrt imovine), pokazatelje profitabilnosti (ROA %, ROE %, profitna marža %), pokazatelje likvidnosti (brzi koeficijent likvidnosti i tekući koeficijent likvidnosti), kao i operativne pokazatelje (broj zaposlenih i rashodi za zarade i naknade zarada).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Tokom posmatranog perioda od 2020. do 2025. godine (Tabela 1), Institut koji se bavi tehničko-tehnološkim naukama ostvario je stabilan rast imovine, pri čemu je ukupna imovina povećana sa 1,35 milijardi RSD na 1,94 milijardi RSD, potvrđujući kontinuirano proširenje resursne baze i investicionih kapaciteta. Kapital je ostao relativno stabilan uz blagi rast, što ukazuje na oprezno upravljanje kapitalom i oslanjanje na zadržanu dobit umesto na eksterno finansiranje. Obaveze su značajno smanjene sa 198.569.000 RSD u 2020. godini na svega 397.000 RSD u 2025. godini, što ukazuje na snažnu strategiju razduživanja i gotovo potpuno eliminisanje izloženosti dugovima.

Pokazatelji profitabilnosti, uključujući ROA i ROE, pokazali su izraženu volatilnost. Nakon zadovoljavajućih rezultata ostvarenih tokom perioda 2020–2022, oba pokazatelja značajno su opala u periodu 2023–2025, pri čemu je ROA dostigao 0,21%, a ROE 0,27% u 2025. godini. To ukazuje na smanjenu efikasnost korišćenja imovine i prinosa na kapital uprkos rastu imovine. Pokazatelji likvidnosti ostali su na visokom nivou, konstantno iznad vrednosti

2,0 i sa maksimumom ostvarenim 2023. godine, što potvrđuje snažnu kratkoročnu solventnost i sposobnost Instituta da izmiruje svoje obaveze.

Profitna marža je varirala i dostigla najvišu vrednost od 4,25% u 2022. godini, da bi se do 2025. smanjila na 0,31%, ukazujući na izazove u kontroli troškova i generisanju prihoda. Pokazatelji ljudskog kapitala takođe su se pozitivno razvijali. Broj zaposlenih povećan je sa 192 na 212, dok su rashodi za zarade porasli sa 408.160.000 RSD na 567.852.000 RSD, što potvrđuje kontinuirana ulaganja u razvoj radne snage, ali istovremeno doprinosi rastu operativnih troškova.

Posmatrano u celini, Institut se može okarakterisati kao finansijski stabilna institucija koja se suočava sa izazovima u pogledu efikasnosti poslovanja, balansirajući između rasta i solventnosti sa jedne strane i troškovnih pritisaka karakterističnih za naučnoistraživačke i industrijske organizacije sa druge strane. Kako navodi Holloway (2024) [5], „industrijsko-akademski hibridi održavaju dugoročnu stabilnost putem poslovanja zasnovanog na znanju, a ne kroz kratkoročnu orijentaciju ka profitu“, što na odgovarajući način opisuje razvojni put Instituta.

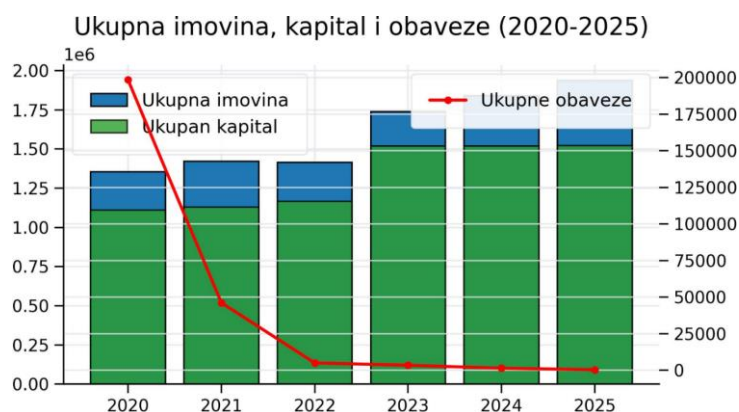
U tabeli 1 su prikazani finansijski i operativni pokazatelji Instituta.

Tabela 1. *Finansijski i operativni pokazatelji Instituta (2020–2025). Novčane vrednosti iskazane su u hiljadama RSD. Izvor: podaci APR za period 2020–2025 [6] i proračuni autora*

Godina	Ukupna imovina	Ukupan kapital	Ukupne obaveze	Obrt imovine	ROA %	ROE %	Pokazatelj ubrzane likvidnosti	Pokazatelj tekuće likvidnosti	Profitna marža %	Broj zaposlenih	Rashodi za zarade
2020	1.353.626	1.110.706	198.569	1,2	1,35	1,65	1,69	4,68	2,40	192	408.160
2021	1.420.914	1.130.532	46.168	1,0	1,45	1,83	2,53	3,98	2,97	208	316.300
2022	1.416.033	1.165.582	5.030	1,3	2,52	3,06	3,12	3,98	4,25	209	358.833
2023	1.736.904	1.519.426	3.443	1,7	0,21	0,24	4,31	7,07	0,36	200	416.052
2024	1.840.994	1.519.446	1.429	2,0	0,23	0,28	3,10	4,48	0,33	207	496.938
2025	1.937.440	1.522.728	397	0,68	0,21	0,27	2,60	3,50	0,31	212	567.852

3.1. Finansijska struktura i solventnost

Ukupna imovina i obaveze Instituta u analiziranom periodu 2020–2025 prikazane su na slici 1.

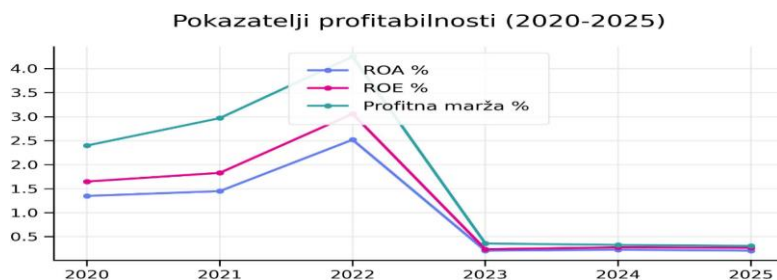


Sl. 1. Ukupna imovina i obaveze Instituta (2020–2025). Izvor: podaci APR [6] i proračun autora

Analiza bilansnih podataka pokazuje značajno jačanje kapitalne strukture Instituta. Ukupna imovina kontinuirano je rasla. Istovremeno, ukupne obaveze su drastično smanjene. Ovakvo agresivno smanjenje zaduženosti rezultiralo je rastom kapitala, što ukazuje na gotovo potpuno odsustvo dugova u posljednjim godinama analiziranog perioda.

3.2. Trendovi ROA, ROE i profitne marže

Pokazatelji profitabilnosti u analiziranom periodu su dati na slici 2.

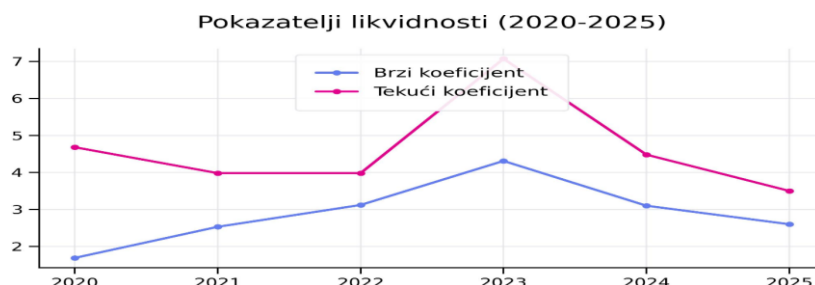


Sl. 2. Pokazatelji profitabilnosti (2020–2025). Izvor: podaci APR [6] i proračun autora

ROA, ROE i profitna marža na slici 2 pokazuju da je rast imovine doprineo jačanju dugoročne **finansijske prilagodljivosti**, istovremeno stvarajući mogućnosti za buduća unapređenja efikasnosti i upravljanja resursima.

3.3. Likvidnost i efikasnost

Pokazatelji likvidnosti u analiziranom periodu dati su na slici 3.

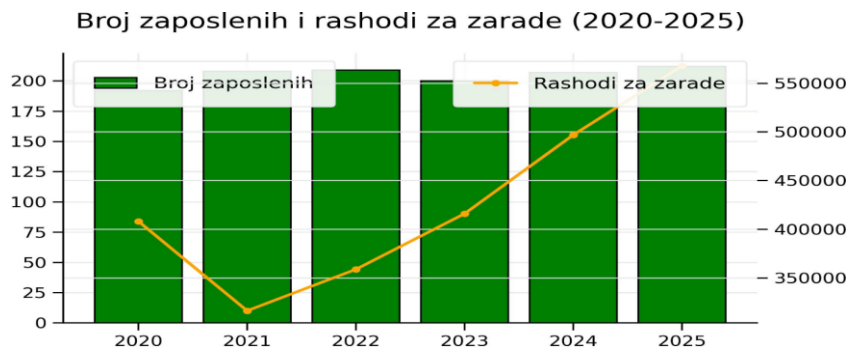


Sl. 3. Pokazatelji likvidnosti (2020–2025). Izvor: podaci APR [6] i proračun autora.

Pokazatelji likvidnosti i obrt imovine predstavljaju standardne instrumente menadžerskih finansija za procenu efikasnosti poslovanja [2]. Institut je tokom celog posmatranog perioda održavao visoku likvidnost, sa tekućim koeficijentom likvidnosti koji je dostigao maksimum od 7,07 u 2023. godini, pre normalizacije na 3,50 u 2025. godini, dok je brzi koeficijent likvidnosti pratio sličnu, povoljnu putanju. Obrt imovine je pokazao promenljivo kretanje, sa maksimumom od 2,0 u 2024. godini i stabilizacijom na 0,68 u 2025. godini.

3.4. Profitabilnost i trendovi radne snage

Broj zaposlenih i rashodi za zarade u analiziranom periodu prikazani su na slici 4.



Sl. 4. Zaposleni i rashodi za zarade u 000 RSD (2020–2025). Izvor: podaci APR [6] i proračun autora.

Broj zaposlenih ostao je relativno stabilan, u rasponu od 192 do 212 zaposlenih, dok su rashodi za zarade kontinuirano rasli, ukazujući na povećanje troškova zaposlenih u odnosu na ostvarene neto rezultate.

4. ZAKLJUČAK

Finansijski i operativni razvoj Instituta u periodu 2020–2025 odražava paradoks istovremenog jačanja solventnosti i opadanja profitabilnosti. Kontinuirani rast imovine i gotovo potpuno eliminisanje dugova potvrđuju otpornu kapitalnu strukturu, pozicionirajući Institut kao finansijski stabilnu organizaciju sa minimalnom izloženošću eksternim rizicima. Pokazatelji likvidnosti ostali su konstantno iznad optimalnih vrednosti, potvrđujući snažnu kratkoročnu stabilnost.

Međutim, pokazatelji profitabilnosti (ROA, ROE i profitna marža) značajno su opali nakon 2022. godine, ukazujući na neefikasnost u korišćenju imovine i kontroli troškova uprkos rastu raspoloživih resursa. Efikasna kontrola troškova i upravljanje rashodima za zarade predstavljaju ključne faktore za održavanje profitabilnosti u javnim institucijama.

Dobijeni rezultati ukazuju da je Institut ostvario dugoročnu prilagodljivost zahvaljujući opreznom upravljanju kapitalom i ulaganjima u ljudske resurse, ali da njegova buduća održivost zavisi od strateške optimizacije efikasnosti korišćenja imovine i kontrole troškova. Uspostavljanje ravnoteže između rasta i profitabilnosti biće od suštinskog značaja za očuvanje konkurentnosti u naučnoistraživačkim i industrijskim aktivnostima.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada Nacionalnog naučnoistraživačkog instituta u 2026. godini, broj 451-03-33/2026-03/200052.

LITERATURA

- [1] Brigham, E. F., Houston, J. F. (2021). Fundamentals of Financial Management. 16. izd. Cengage Learning.
- [2] Gitman, L. J., Zutter, C. J. (2019). Principles of Managerial Finance. 15. izd. Pearson.
- [3] Penman, S.H. (2013). Financial Statement Analysis and Security Valuation. 5. izd. McGraw-Hill Education.
- [4] Wild, J. J., Shaw, K. C. (2020). Financial Accounting Information for Decisions. 9. izd. McGraw-Hill Education.
- [5] Holloway, J. (2024). Industrial-Academic Hybrids: The Evolution of Applied Research Institutions. Journal of Innovation and Technology Policy, 12(1), 55–72.
- [6] <http://www.apr.gov.rs/pretrage>, pristupljeno 5.8.2026.

UDK: 624.042.7:699.841(045)=163.41
DOI: 10.5937/bakar2601061M
NAUČNI RAD
Oblast: Gradjevinstvo

Primljen: 16.09.2026.
Prerađen: 21.09.2026.
Prihvaćen: 22.09.2026.

PREGLED RAZLIČITIH METODA ANALIZE SEIZMIČKOG PONAŠANJA GRAĐEVINSKIH KONSTRUKCIJA

REVIEW OF DIFFERENT METHODS FOR ANALYZING THE SEISMIC BEHAVIOR OF BUILDING STRUCTURES

Nevena Marković^{1a}, Sandra Guševac^{1b}, Jelena Đorđević^{1c},
Jelena Stefanović^{1d}

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

^{1a}Email: nevena.markovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-1278-8805>

^{1b}Email: sandra.filipovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6776-9899>

^{1c}Email: jelena.djordjevic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5406-0074>

^{1d}Email: jelena.stankovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6418-1814>

Izvod

Seizmička analiza predstavlja važan segment projektovanja građevinskih konstrukcija u cilju obezbeđenja njihove sigurnosti i odgovarajućeg ponašanja pri dejstvu zemljotresa. U radu je prikazan pregled metoda seizmičke analize u skladu sa zahtevima standarda EN 1998 (Evrokod 8). Razmatrane su četiri osnovne metode: linearna statička analiza primenom metode bočnih sila, linearna dinamička analiza primenom modalne analize i spektra odgovora, nelinearna statička (pushover) analiza i nelinearna dinamička analiza u vremenskom domenu. Za svaku metodu analizirani su osnovni principi proračuna, karakteristike, prednosti i ograničenja, kao i uslovi i mogućnosti primene u zavisnosti od složenosti, regularnosti i dinamičkih karakteristika konstrukcije. Na osnovu razmatranih karakteristika ukazano je na značaj pravilnog izbora metode seizmičke analize u skladu sa zahtevima standarda i specifičnostima posmatrane konstrukcije.

Ključne reči: seizmička analiza, građevinske konstrukcije, Evrokod 8, metoda bočnih sila, modalna analiza, pushover analiza, nelinearna dinamička analiza

Abstract

Seismic analysis represents an important aspect of the design of building structures, aimed at ensuring their safety and adequate performance under earthquake loading. This paper presents an overview of seismic analysis methods in accordance with the requirements of EN 1998 (Eurocode 8). Four main methods are considered: linear static analysis using the equivalent lateral force procedure, linear dynamic analysis based on modal response spectrum analysis, nonlinear static (pushover) analysis, and nonlinear dynamic time-history analysis. For each method, the basic principles of analysis, main characteristics, advantages and limitations, as well as the conditions and possibilities of application depending on the complexity, regularity and dynamic characteristics of the structure, are discussed. Based on the considered characteristics, the im-

portance of selecting an appropriate seismic analysis method in accordance with the requirements of the standard and the specific characteristics of the structure is highlighted.

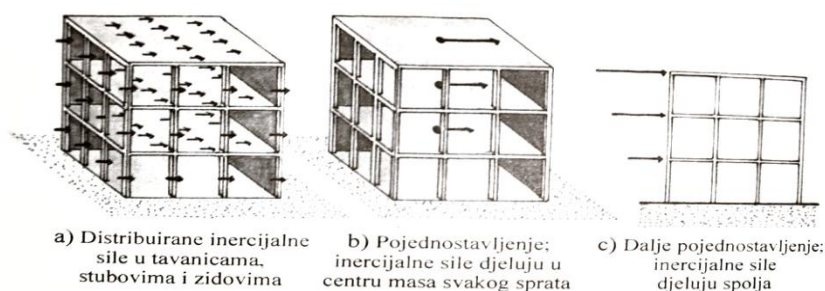
Keywords: seismic analysis, building structures, Eurocode 8, equivalent lateral force procedure, modal analysis, pushover analysis, nonlinear dynamic analysis

1. UVOD

Postupak seizmičke analize zasniva se na definisanju odgovarajućeg matematičkog modela konstrukcije, definisanju relevantnog seizmičkog dejstva i proračunu unutrašnjih sila, pomeranja i drugih merodavnih uticaja u konstruktivnim elementima [1,2].

Seizmička opterećenja predstavljaju jedan od najsloženijih vidova dinamičkog opterećenja kojem građevinske konstrukcije mogu biti izložene. Za razliku od statičkih opterećenja, zemljotres izaziva ubrzanja tla koja, usled mase konstrukcije, dovode do pojave inercijalnih sila. Njihovo dejstvo može izazvati značajne deformacije i oštećenja, a u nepovoljnim slučajevima i gubitak stabilnosti konstrukcije. Savremeni pristup projektovanju stoga ne podrazumeva potpuno sprečavanje oštećenja, već kontrolisano ponašanje konstrukcije kroz odgovarajuću duktilnost i disipaciju energije [2].

Seizmička analiza građevinskih konstrukcija definisana je zahtevima standarda EN 1998 (Evrokod 8), a izbor odgovarajućeg postupka analize zavisi od karakteristika konstrukcije, njene regularnosti, konstruktivnog sistema i potrebnog nivoa detaljnosti analize. Odgovor konstrukcije na seizmičko dejstvo zavisi od brojnih faktora, među kojima su materijal, geometrija, krutost i raspored konstruktivnih elemenata, kao i način prijema horizontalnih dejstava [2]. Tokom zemljotresa, konstrukcije su izložene horizontalnim i vertikalnim ubrzanjima tla, koja izazivaju složena unutrašnja naprezanja i deformacije. Razumevanje odziva konstrukcije na ovakva opterećenja je ključno za obezbeđivanje njihove stabilnosti, sigurnosti i trajnosti.



Sl. 1. Pojednostavljenje delovanja seizmičkih horizontalnih inercijalnih sila [3]

U zavisnosti od karakteristika konstrukcije i zahtevanog nivoa analize, mogu se primeniti linearni ili nelinearni, kao i statički ili dinamički postupci.

Linearne metode predstavljaju jednostavniji pristup koji se često primenjuje u inženjerskoj praksi, dok nelinearne metode omogućavaju detaljniju procenu ponašanja konstrukcije u neelastičnoj oblasti, uključujući razvoj plastičnih mehanizama i promenu krutosti konstruktivnih elemenata [1].

2. KLASIFIKACIJA METODA SEIZMIČKE ANALIZE

U savremenom inženjerstvu razvijene su različite metode za analizu seizmičkog ponašanja građevinskih konstrukcija. Metode seizmičke analize mogu se klasifikovati prema načinu primene opterećenja na statičke i dinamičke, kao i prema načinu modeliranja ponašanja konstrukcije na linearne i nelinearne.

Najprihvaćenija podela metoda seizmičke analize jeste podela koja je data odredbom standarda EC8-1, 4.3.3 [1]:

- I. Linearna statička analiza-*metoda bočnih sila/ekvivalentna statička analiza*
- II. Linearna dinamička analiza-*modalna analiza sa sprekrima odgovora*
- III. Nelinearna statička analiza-*pushover analiza*
- IV. Nelinearna dinamička analiza-*nonlinear time-history analysis*

Svaka od navedenih metoda ima prednosti i ograničenja, a njihov izbor zavisi od složenosti i tipa konstrukcije, raspoloživih dostupnih podataka, kao i cilja analize.

3. LINEARNE METODE SEIZMIČKE ANALIZE

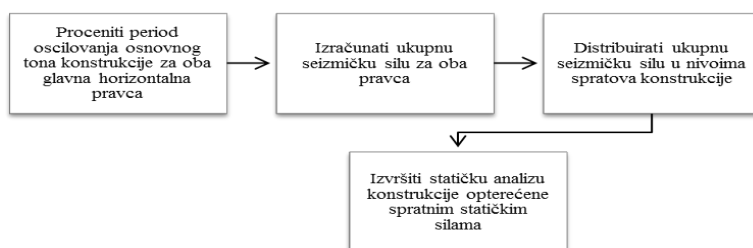
Linearna statička metoda bočnih sila i linearna dinamička modalna analiza sa spektrima odgovora predstavljaju standardne postupke za seizmičku analizu građevinskih konstrukcija [4]. Metoda bočnih sila koristi osnovni ton oscilovanja, dok modalna analiza obuhvata više tonova i time omogućava detaljnije sagledavanje dinamičkog ponašanja konstrukcije. Za razliku od modalne analize, metoda bočnih sila daje rezultate sa jasno definisanim predznakom uticaja [1].

Primena linearnih metoda ne znači da se očekuje potpuno elastično ponašanje konstrukcije. Nelinearno ponašanje se indirektno uzima u obzir primenom faktora ponašanja q u projektnom spektru. Na taj način se složenost nelinearne analize zamenjuje pojednostavljenim linearnim proračunom, koji je pogodan za uobičajeno projektovanje konstrukcija [1,2].

Linearne metode mogu se primeniti na ravanskim modelima za dva horizontalna pravca ukoliko su ispunjeni odgovarajući uslovi regularnosti i krutosti konstrukcije. U suprotnom, primena prostornih modela omogućava potpunije sagledavanje prostornog ponašanja konstrukcije i efekata torzije, koji mogu biti nedovoljno obuhvaćeni ravanskim modelima [1].

3.1. Linearna statička metoda-metoda bočne sile

Kao što i sam naziv kaže, ova metoda seizmičke inercijalne horizontalne sile, dinamičkog karaktera, zamenjuje ekvivalentnim statičkim horizontalnim silama. Glavni preduslov za ovu metodu jeste da konstrukcije dominantno osciluje u prvom tonu oscilovanja u oba glavna pravca. Međutim, kod konstrukcija kod kojih uticaj imaju i viši tonovi oscilovanja statičkim silama se ne mogu tačno predstaviti dinamičke sile [1].



Sl. 2. Algoritam proračuna linearnom statičkom metodom

U EC8-1, 4.3.3.2.2(3) nalaze se empirijske formule za proračunavanje prvog tona oscilovanja konstrukcije [1,5,6]:

$$T_1 = 0,075 H^{\frac{1}{4}} - \text{zgrade sa AB prostornom ravanskom konstrukcijom [5].}$$

$$T_1 = 0,05 H^{\frac{1}{4}} - \text{za svaki drugi konstruktivni sistem [5].}$$

Seizmička sila u osnovi se dobija na osnovu sledeće jednačine koja je data u EC8-1, 4.3.3.2.2(1) [1,5,6]:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \quad (1)$$

gde je: $S_d(T_1)$ -ordinata projektnog spektra ubrzanja, m -ukupna masa zgrade, λ -korekcionni faktor.

Ukupna seizmička sila, koja se raspoređuje po visini u nivoima spratova konstrukcije, određuje se prema izrazu koji je dat u EC8-1, 4.3.3.2.3(2) [1,5,6]:

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum_j s_j \cdot m_j} \quad (2)$$

gde je F_i -horizontalna sila koja deluje na spratu, F_b -ukupna seizmička sila, s_i, s_j -pomeranje masa m_i i m_j u osnovnom obliku oscilovanja, m_i i m_j -spratne mase.

3.2. Linearna dinamička analiza-modalna analiza sa spektrima odgovora

Modalna analiza sa spektrom odgovora predstavlja opštu metodu linearne dinamičke analize i može se primeniti i na konstrukcije koje ne ispunjavaju uslove za primenu metode bočnih sila. Kod zgrada koje su regularne u osnovi, ali neregularne po visini, mogu se koristiti ravanski modeli, dok se za konstrukcije neregularne i u osnovi i po visini zahtevaju prostorni modeli [1].

U okviru modalne analize se prvenstveno određuju sopstvene vibracije, a zatim se za svaki ton dobijaju sopstvene kružne frekvencije ω_i , sopstveni oblici oscilovanja $\mathbf{Y}$, faktori participacije Γ_i i efektivna modalna masa M_i^{ef} , dok se spratne seizmičke sile se mogu izračunati uz pomoć matrice masa [1]:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{K}\mathbf{U}_i = \mathbf{M}\omega_i^2 \mathbf{U}_i = \mathbf{M}\mathbf{S}_d(T_i) \Gamma_i \mathbf{Y} \quad (3)$$

Modalna analiza ima jednu specifičnost koja je veoma pogodna za proračun. Naime, u proračunu se ne moraju uzimati u obzir svi tonovi oscilovanja, već samo oni koji imaju uticaj na globalni odgovor sistema [1]. U EC8-1, 4.3.3.3.1(3) jasno je definisano da pri izboru broja tonova koji se uzimaju u proračun mora da se zadovolji sledeće [1]:

- U modalnu analizu potrebno je uključiti dovoljan broj tonova tako da zbir njihovih efektivnih modalnih masa obuhvati više od 90% ukupne mase konstrukcije [6];
- Takođe, u proračun je potrebno uključiti sve tonove čiji doprinos efektivnoj modalnoj masi iznosi najmanje 5% ukupne mase konstrukcije [6].

Pritom, kod prostornog modela, obavezna je provera za svaki relevantni pravac [1,5,6].

U slučaju da se prethodna dva zahteva ne mogu zadovoljiti, minimalan broj tonova koji se uzima u obzir u prostornoj analizi prema EC8 treba da ispuni sledeća dva uslova [1,5,6]:

- $k = 3 \cdot \sqrt{n}$;
- $T_k \leq 0,20s$

gde je k-broj tonova koji se uzimaju u obzir, n-broj spratova iznad temelja ili iznad vrha krutog podruma, T_k -period oscilovanja za ton k.

4. NELINEARNE METODE SEIZMIČKE ANALIZE

Nelinearna analiza predstavlja napredni postupak kojim se realno modelira ponašanje konstrukcije u neelastičnoj oblasti, uzimajući u obzir plastifikaciju, degradaciju krutosti i progresivno oštećenje elemenata [7,8].

Osnovni izvor nelinearnosti u konstrukcijama su materijalna i geometrijska nelinearnost [9]. Materijalna nelinearnost potiče od nelinearnog odnosa napona i

deformacija, uz pojavu plastifikacije i oštećenja materijala, dok geometrijska nelinearnost nastaje usled velikih pomeranja i rotacija koje utiču na unutrašnje sile i stabilnost celokupnog sistema [10]. Ovakvi efekti su najizraženiji kod konstrukcija koje su izložene dinamičkim i cikličnim opterećenjima, gde dolazi do značajnih promena krutosti tokom vremena [10].

Primena nelinearne analize omogućava detaljno praćenje razvoja oštećenja u konstrukciji, uključujući formiranje i plastičnih zglobova, pojavu pukotina i promenu unutrašnjih sila, čime se dobija realnija procena nosivosti i mehanizma loma konstrukcije [11].

U okviru nelinearnih metoda posebno se izdvajaju nelinearna statička i nelinearna dinamička analiza [7]. Nelinearna statička analiza omogućava procenu globalnog kapaciteta konstrukcije kroz odnos sila i pomeranja, dok nelinearna dinamička analiza uzima u obzir vremensku promenljivost opterećenja i omogućava detaljno praćenje odziva konstrukcije tokom trajanja dejstva [8].

Savremena istraživanja pokazuju da nelinearna analiza ima ključnu ulogu u razvoju pouzdanijih numeričkih modela i metoda projektovanja, uključujući primenu naprednih simulacija u programima zasnovanih na konačnim elementima [7]. Ovakvi pristupi omogućavaju efikasnije i preciznije analize složenijih konstrukcija, uz smanjenje rizika od neočekivanih kolapsa i povećane sigurnosti [8].

4.1. Statička nelinearna (*pushover*) analiza

Jedna od najčešće primenjivanih nelinearnih metoda jeste statička nelinearna analiza, odnosno *pushover* analiza. Ona predstavlja pojednostavljeni nelinearni postupak za procenu odgovora konstrukcije pri seizmičkom dejstvu. U odnosu na linearne metode omogućava detaljniji uvid u razvoj nelinearnog ponašanja, identifikaciju kritičnih preseka i oblasti u kojima se očekuju veće neelastične deformacije, kao i procenu globalnog ponašanja konstrukcije u neelastičnoj oblasti [1].

Pushover analiza se zasniva na postepenom povećavanju horizontalnog opterećenja nelinearnog matematičkog modela sve do dostizanja ciljanog pomeranja koje predstavlja procenjeno maksimalno pomeranje karakteristične tačke konstrukcije pri dejstvu projektovanog zemljotresa. Opterećenje se povećava inkrementalno, pri čemu se prati promena krutosti i nosivosti elemenata usled razvoja nelinearnog ponašanja. Radi obuhvatanja mogućih promena raspodele seizmičkog opterećenja po visini konstrukcije, preporučuje se analiza najmanje dve vertikalne raspodele bočnog opterećenja [1].

Rezultat analize prikazuje se krivom kapaciteta, odnosno *pushover* krivom, koja predstavlja odnos ukupne horizontalne sile i pomeranja karakteristične tačke konstrukcije. Na osnovu nje može se sagledati razvoj nelinearnog ponašanja i kapacitet konstrukcije, dok se veličine odgovora pri ciljanom pomeranju mogu uporediti sa graničnim kriterijumima radi procene ponašanja konstrukcije [1].

Metoda se može primeniti na 2D i 3D modele, pri čemu je kod trodimenzionalnih modela potrebno uzeti u obzir moguće torzione efekte i raspodelu krutosti i nosivosti u oba ortogonalna pravca [1].

4.2. Nelinearna dimanička analiza

Nelinearna dinamička analiza predstavlja jednu od najdetaljnijih, ali i najstroženijih metoda za određivanje seizmičkog odgovora konstrukcije. Zasniva se na rešavanju jednačine kretanja sistema sa više stepeni slobode, pri čemu se nelinearno ponašanje elemenata uzima u obzir kroz promenu njihove krutosti tokom vremena [1,2].

Za sprovođenje analize neophodni su odgovarajući akceleroگرامи, odnosno zapisi zemljotresa prilagođeni seizmičkim karakteristikama lokacije. Mogu se koristiti prirodni zapisi, skalirani prema projektnoj seizmičnosti, ili veštački generisani akceleroگرامи. Izabrani zapisi moraju biti kompatibilni sa projektnim spektrom odgovora [5,6].

Zbog zahtevnog modeliranja nelinearnog ponašanja i potrebe za odgovarajućim seizmičkim zapisima, nelinearna dinamička analiza se najčešće primenjuje za detaljnu procenu seizmičkog ponašanja i sigurnosti konstrukcija, naročito kod složenijih sistema i postojećih objekata [1].

5. UPOREDNA ANALIZA METODA

Uporedna analiza metoda seizmičke analize prikazana je u tabeli 1.

Tabela 1. Uporedna analiza metoda seizmičke analize

Metoda	Prednosti	Nedostaci	Primena
Linearna statička-metoda bočne sile	Brza, jednostavna, daje predznak sile	Preciznost za složene objekte niska	Jednostavne, regularne konstrukcije
Linearna dinamička-modalna analiza	Uključuje više tonova, primenljiva na sve tipove konstrukcija	Rezultati bez predznaka, ne uzima nelinearnost u obzir	Uobičajene konstrukcije srednje složenosti, neregularne konstrukcije
Nelinearna statička-pushover	Identifikacija kritičnih mesta, analiza nelinearnog ponašanja	Manje precizna od nelinearne dinamičke	Konstrukcije gde se traži nelinearni odgovor
Nelinearna dinamička	Najpreciznija, vremenski zavisna, uzima u obzir sve nelinearnosti	Složena, zahtevna za podatke i računare	Naučno-istraživačke analize, složeni ili već izgrađeni objekti

6. ZAKLJUČAK

Seizmička analiza predstavlja važan deo projektovanja građevinskih konstrukcija u cilju obezbeđenja odgovarajućeg nivoa sigurnosti i kontrolisanog ponašanja pri dejstvu zemljotresa. U radu su prikazane i međusobno upoređene četiri osnovne metode seizmičke analize definisane u okviru Evrokoda 8: linearna statička analiza primenom metode bočnih sila, linearna dinamička modalna analiza sa spektrom odgovora, nelinearna statička (*pushover*) analiza i nelinearna dinamička analiza u vremenskom domenu.

Analizom karakteristika navedenih metoda može se zaključiti da njihov izbor zavisi od složenosti, regularnosti i dinamičkih karakteristika konstrukcije, kao i od cilja i potrebnog nivoa detaljnosti analize. Linearne metode predstavljaju jednostavnije i praktičnije postupke koji su pogodni za veliki broj uobičajenih konstrukcija, pri čemu se efekti nelinearnog ponašanja indirektno uzimaju u obzir primenom faktora ponašanja q . Modalna analiza, u odnosu na metodu bočnih sila, omogućava detaljnije sagledavanje dinamičkog ponašanja konstrukcije kroz uključivanje više tonova oscilovanja.

Nelinearne metode omogućavaju realističnije sagledavanje ponašanja konstrukcije u neelastičnoj oblasti. *Pushover* analiza pruža mogućnost procene kapaciteta konstrukcije i identifikacije potencijalnih kritičnih područja, dok nelinearna dinamička analiza omogućava detaljno praćenje odziva konstrukcije u vremenu i predstavlja složeniji postupak koji zahteva odgovarajuće nelinearne modele i seizmičke zapise.

Na osnovu prikazanog pregleda može se zaključiti da ne postoji jedinstvena metoda koja je odgovarajuća za sve vrste konstrukcija. Izbor postupka analize treba izvršiti u skladu sa zahtevima standarda, karakteristikama konstrukcije, raspoloživim ulaznim podacima i potrebnim nivoom pouzdanosti rezultata. Pravilnim izborom i primenom metode moguće je adekvatnije proceniti seizmički odgovor konstrukcije i obezbediti racionalnije i sigurnije projektovanje.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2026. godini, br. 451-03-33/2026-03/200052.

LITERATURA

- [1] Janković, S. (2022). *Seizmički proračun armirano-betonskih zgrada u skladu sa Evrokodovima*. Podgorica: P FRAME Project.
- [2] Čaušević, M. (2022). *Dinamika konstrukcija – potresno inženjerstvo, aerodinamika, konstrukcijske norme*. Podgorica: FRAME Project.
- [3] Janković, S. (2014). *Osnove seizmičkog planiranja i projektovanja za inženjere arhitekture i građevine*. Beograd: AGM knjiga; Podgorica: Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore.
- [4] Lagomarsino, S., Marino, S. & Cattari, S. (2020). Linear static procedures for the seismic assessment of masonry buildings: Open issues in the new generation of European codes. *Structures*, 26, 427–440.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.003>.
- [5] European Committee for Standardization (2004). *EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization.
- [6] Institut za standardizaciju Srbije (2015). *SRPS EN 1998-1:2015. Evrokod 8: Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija – Deo 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade*. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.
- [7] Čemalović, M. (2023). *Earthquake response of bridges supported by vertical and batter piles accounting for nonlinear soil-structure interaction*. Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Structural Engineering.
- [8] Giusto, S., Cattari, S. & Lagomarsino, S. (2024). Investigating the reliability of nonlinear static procedures for the seismic assessment of existing masonry buildings. *Structural Design and Analysis for Constructions and Buildings*, 14(3), 1130.
<https://doi.org/10.3390/app14031130>
- [9] Mohammad, S., Baharuddin Abd Rahman, A., Siang Tan, C. & Huei, Y. (2020). Analytical model of nonlinear semi-rigid frames using finite elements. *Journal of Architectural Environment & Structural Engineering Research*, 3(4), 22–27.
<https://doi.org/10.30564/jaeser.v3i4.2593>
- [10] Khaniki, H. B., Ghayesh, M. H., Chin, R. & Amabili, M. (2022). A review on the nonlinear dynamics of hyperelastic structures. *Nonlinear Dynamics*, 110 (2), 963–994.

https://doi.org/10.1007/s11071-022-07700-3?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

- [11] Naqash, M. T. & Farooq, Q. U. (2018). Performance of rigid steel frames under adequate soil conditions using seismic code provisions. *Open Journal of Civil Engineering*, 8 (02), 91–101. <https://doi.org/10.4236/ojce.2018.82008>

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 Madara*. 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)

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

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

Radovi se šalju prevashodno elektronskom poštom ili u drugo 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., Dere, 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@imb-bor.co.rs

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

We are thankful for all authors on cooperation.

SADRŽAJ
CONTENS

Nevena Ristić, Viša Tasić, Tatjana Apostolovski Trujić, Bojan Radović,
Vladan Kamenović, Renata Kovačević, Milan Radivojević

**ZAGAĐENJE VAZDUHA I UTICAJ METEOROLOŠKIH PARAMETARA
U BORU (SRBIJA): KORELACIONA ANALIZA**

AIR POLLUTION AND METEOROLOGICAL INFLUENCES IN BOR (SERBIA):
A CORRELATION STUDY1

Nenad Marković, Davor Derdić, Strahinja Marković

**ISPADI DALEKOVODA U TRAFOSTANICAMA-POGON PRENOSA NOVI SAD
USLED PRESKOKA NA IZOLATORSKIM LANCIMA I STRUJNIM MOSTOVIMA**

OUTAGES OF TRANSMISSION LINES IN SUBSTATIONS – TRANSMISSION
OPERATIONS NOVI SAD CAUSED BY FLASHOVERS ON INSULATOR
STRINGS AND BUSBARS17

Željko Simić

**METODOLOGIJA OPTIMIZACIJE ENERGETSKE TRANZICIJE RUDNIKA
PRIMENOM INŽENJERSKOG EKSPERIMENTA**

METHODOLOGY FOR OPTIMIZING THE ENERGY TRANSITION OF MINES
USING ENGINEERING EXPERIMENT31

Dejan Bugarin, Marija Jonović, Vanja Trifunović, Divna Pacić

**FINANSIJSKE PERFORMANSE I POSLOVNA EFIKASNOST: STUDIJA SLUČAJA
NAUČNOISTRAŽIVAČKOG INSTITUTA (2020–2025)**

FINANCIAL PERFORMANCE AND BUSINESS EFFICIENCY:
A CASE STUDY OF A SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE (2020–2025)55

Nevena Marković, Sandra Guševac, Jelena Đorđević, Jelena Stefanović

**PREGLED RAZLIČITIH METODA ANALIZE SEIZMIČKOG PONAŠANJA
GRAĐEVINSKIH KONSTRUKCIJA**

REVIEW OF DIFFERENT METHODS FOR ANALYZING
THE SEISMIC BEHAVIOR OF BUILDING STRUCTURES61
