BAKAR 51 (2026) 1 COPPER

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]

[1]Institut 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}, $PM_{2.5}$) 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}, $PM_{2.5}$) 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

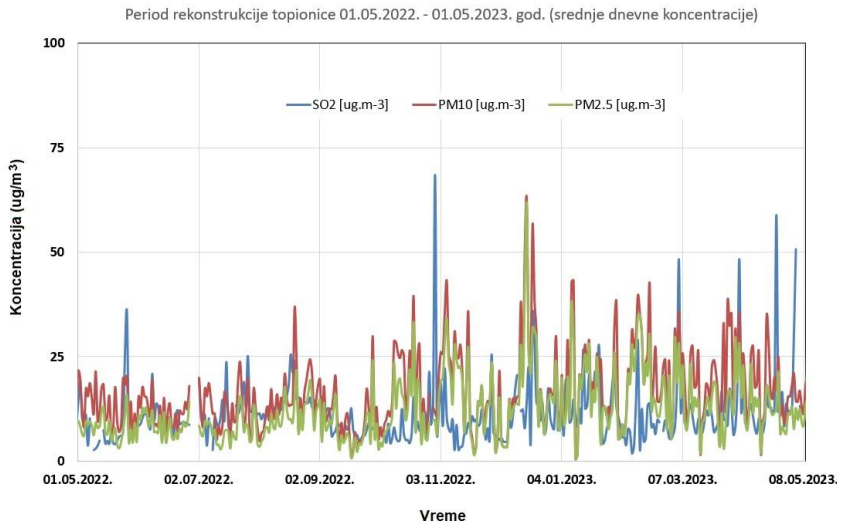
Korelaciona analiza sprovedena je za dva vremenska perioda: period kada Topionica nije bila u radu (maj 2022. - maj 2023. god.) i period kontinuiranog rada Topionice (2025. godina). Za analizu su korišćene srednje dnevne vrednos-

ti koncentracija sumpor-dioksida (SO_2), suspendovanih čestica PM_{10} i $PM_{2.5}$, 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)

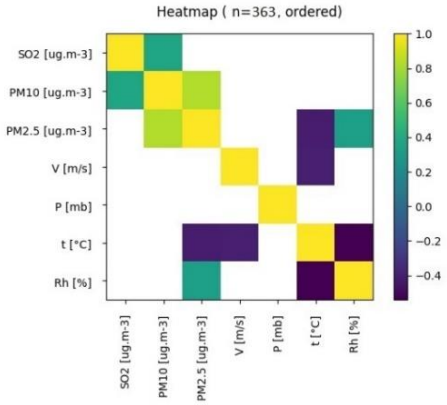
U periodu od 01. maja 2022. do 01. maja 2023. godine, Topionica bakra u Boru nije radila zbog rekonstrukcije i proširenja kapaciteta za preradu koncentrata bakra. Na slici 1 prikazane su srednje dnevne koncentracije SO_2, PM_{10} i $PM_{2.5}$ izmerene u navedenom periodu na mernom mestu Bor - Gradski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



Sl. 1. *Srednje dnevne koncentracije SO_2, PM_{10} i $PM_{2.5}$ 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}, $PM_{2.5}$ i meteoroloških parametara na mernom mestu Bor - Gradski park, kako bi se utvrdio uticaj meteo parametara na

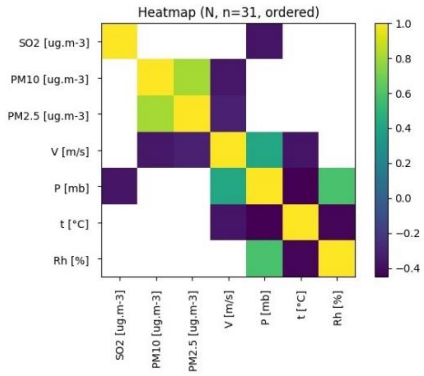
promene koncentracija navedenih polutanata. Pirsonov koeficijent korelacije izračunat je za srednje dnevne vrednosti navedenih parametara za ceo period posmatranja (n = 363). Tokom celog perioda posmatranja ustanovljena je jaka pozitivna korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r = 0.87$, $p < 0.001$), 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)*

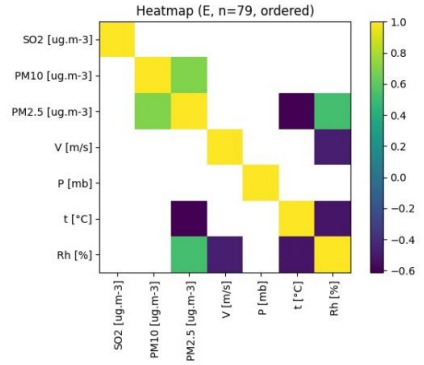
Za potrebe analize koeficijenti korelacije između posmatranih polutanata i meteoroloških parametara određeni su za svaki od četiri dominantna pravca vetra, pri čemu južni pravac nije razmatran zbog nedovoljnog broja podataka (n = 5) i ograničene reprezentativnosti. U danima kada je dominantni pravac 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 ($n = 31$)*

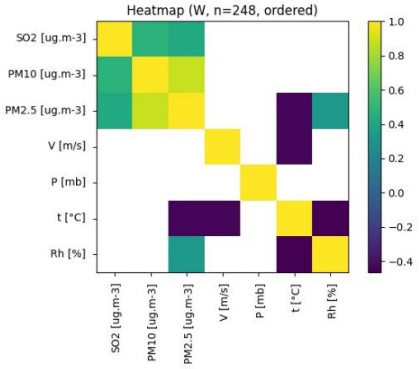
U danima kada je preovlađivao istočni pravac vetra uočena je jaka pozitivna korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r = 0.69$, $p < 0.001$), što ukazuje na zajedničko poreklo suspendovanih čestica. Pozitivna korelacija između $PM_{2.5}$ i relativne vlažnosti ($r = 0.39$, $p < 0.01$) ukazuje na doprinos 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.



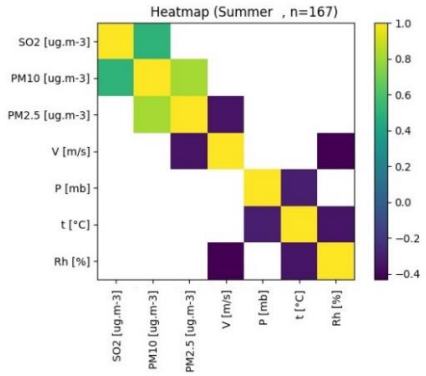
Sl. 5. *Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za zapadni pravac vetra ($n = 248$)*

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.

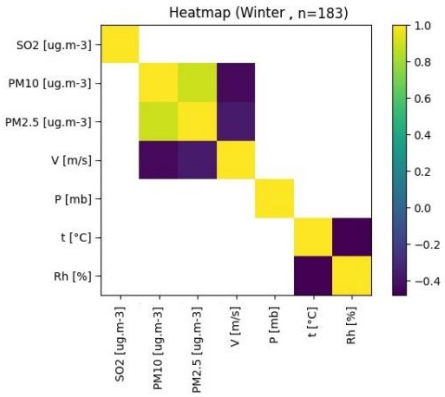
Analiza koeficijenata korelacije u letnjem periodu (01.05.2022. - 14.10.2022. god.) pokazuje jaku pozitivnu korelaciju između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r \approx 0.83$, $p < 0.001$), što ukazuje na njihovo zajedničko poreklo. U ovom periodu uočena je i **umerena pozitivna korelacija između SO_2 i PM_{10}**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

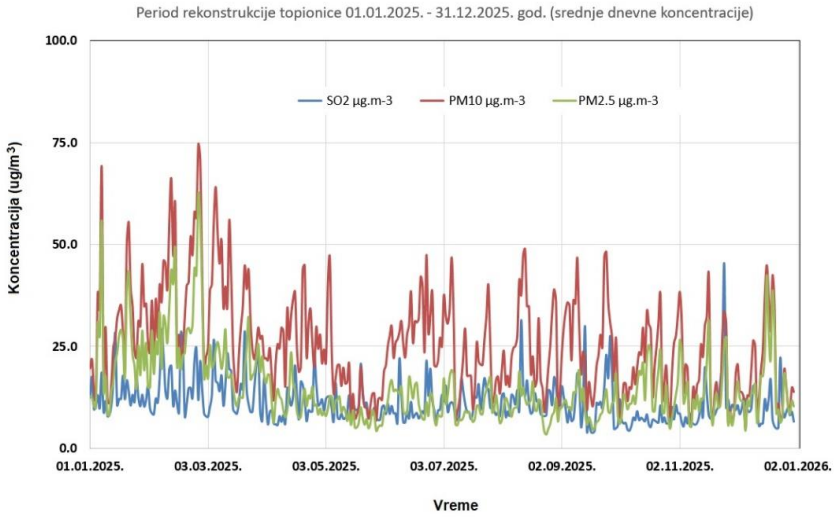
U zimskom periodu (15.10.2022. - 14.04.2023. god.) uočena je veoma jaka korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r = 0.89$, $p < 0.001$), što ukazuje na zajedničko poreklo. U ovom periodu jasno je izražena korelacija između **SO_2 i PM frakcija** ($r = 0.45$, $p < 0.001$), što potvrđuje dominantan uticaj 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.*

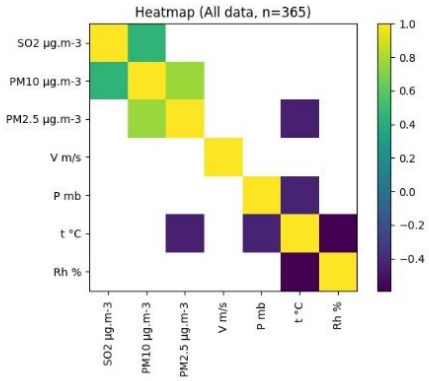
3.2. Korelacije između polutanata i meteoroloških parametara u 2025. god. (period kada je Topionica bakra u Boru bila u radu) (n = 365)

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 $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ u tom periodu na mernom mestu Bor - Gradski park.



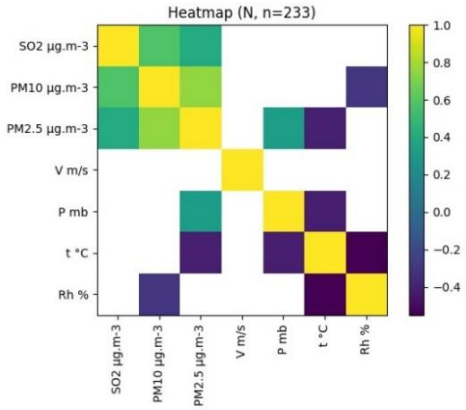
Sl. 8. *Srednje dnevne koncentracije SO_2, PM_{10} i $PM_{2.5}$ izmerene u 2025. god. na m.m. Bor - Gradski park*

U posmatranom periodu dominantna je jaka pozitivna korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r = 0.84$, $p < 0.001$), 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 $PM_{2.5}$ ($r = 0.48$, $p < 0.001$), 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 $PM_{2.5}$ ($r = –0.32$, $p < 0.01$) ukazuje na značaj disperzionih procesa, pri čemu povećanje brzine vetra doprinosi smanjenju koncentracija $PM_{2.5}$ u vazduhu. Na slici 9. prikazana je filtrirana korelaciona matrica, sa vrednostima $|r| \geq 0.3$, za celu 2025. god.



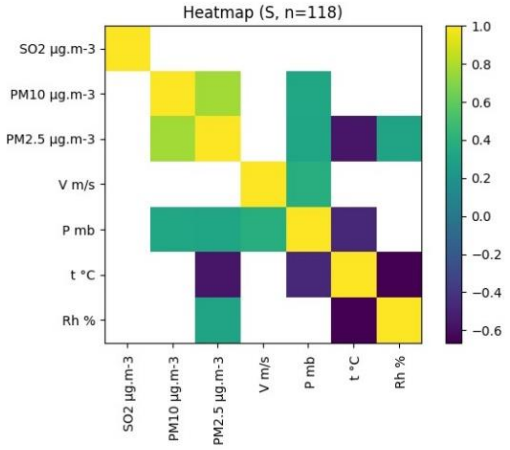
Sl. 9. *Korelaciona matrica (|r| ≥ 0.3) za m.m. Bor - Gradski park u 2025. god. (n = 365)*

U danima kada je dominantni pravac vetra bio severni, prisutna je jaka pozitivna korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r = 0.86$, $p < 0.001$), što ukazuje na zajedničko poreklo suspendovanih čestica. Izražena je pozitivna korelacija između SO_2 i PM_{10} ($r = 0.62$, $p < 0.001$), kao i između SO_2 i $PM_{2.5}$ ($r = 0.52$, $p < 0.001$), što takođe 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| ≥ 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.

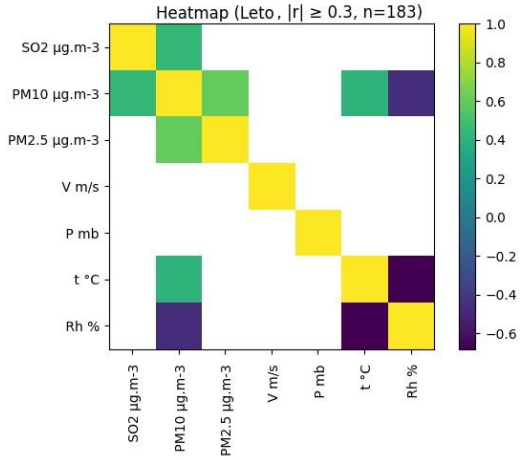


Sl. 11. *Korelaciona matrica ($|r| \geq 0.3$) za južni pravac vetra ($n = 118$)*

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.

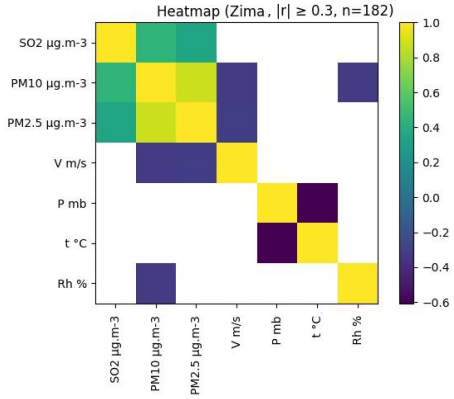
U letnjem periodu (15.04.2025. - 14.10.2025. god.) uočena je umerena pozitivna korelacija između SO_2 i PM_{10} ($r \approx 0.50$, $p < 0.01$), što ukazuje na prisutan uticaj industrijskih emisija. Jaka korelacija između PM_{10} i $PM_{2.5}$ ($r \approx 0.72$, $p < 0.001$) potvrđuje zajedničko poreklo 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| ≥ 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 SO_2 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 zavisan 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 SO_2 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 SO_2 i PM_{10} ($r \approx 0.5–0.6$) i SO_2 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 čestična 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}, $PM_{2.5}$ 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 PM2.5 around primary particulate anthropogenic emission sources, Atmospheric Environment, 2001, 35, pp. 845–858. 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: PM2.5, 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., Matić, B., Šteharnik, 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] Pepłowska, 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.