

Analiza zagađenja vazduha u gradovima Srbije: sezonska varijabilnost i značaj lokalne kalibracije senzorskih mreža

Uzahir Ramadani
Institut za nuklearne nauke "Vinča"
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u
Beogradu
Beograd, Srbija
uzahir@vin.bg.ac.rs
0000-0002-3702-0094

Marija Živković
Institut za nuklearne nauke "Vinča"
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
marijaz@vin.bg.ac.rs
0000-0002-3415-5145

Slobodan Radojević
Mašinski fakultet, Univerzitet u
Beogradu
Beograd, Srbija
sradojevic@mas.bg.ac.rs
0000-0003-1845-4441

Viša Tasić
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Bor, Srbija
visa.tasic@irmbor.co.rs
0000-0001-6710-6529

Dušan Radivojević
Institut za nuklearne nauke "Vinča"
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
dusanr@vin.bg.ac.rs
0000-0003-1959-3152

Ivan Lazović
Institut za nuklearne nauke "Vinča"
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
ivan.lazovic@vin.bg.ac.rs
0000-0002-3877-5157

Apstrakt- Praćenje kvaliteta vazduha ključno je za razumevanje uticaja zagađenja na ljudsko zdravlje i životnu sredinu. Nacionalna mreža za automatski monitoring kvaliteta vazduha putem automatskih mernih stanica obezbeđuje precizna i metrološki sledljiva merenja koncentracija zagađujućih materija, pružajući pouzdane podatke koji se mogu koristiti za kalibraciju i verifikaciju rezultata merenja senzorskih mreža i uređaja koji koriste jeftine senzore za praćenje kvaliteta vazduha. Ovaj rad prikazuje rezultate analize koncentracija $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 i NO_2 u odabranim urbanim sredinama u Republici Srbiji u periodu od 2019. do 2023. god. Korišćenjem deskriptivnih i komparativnih statističkih metoda, identifikovane su prostorne razlike u stepenu zagađenja i izražene sezonske promene pojedinih zagađujućih materija, što značajno utiče na interpretaciju vremenskih trendova i procenu izloženosti stanovništva aerozagađenju. Poseban akcenat stavljen je na pouzdanost i stabilnost mernih podataka, kao i na njihovu primenu u podršci metrološki relevantnim analizama. Prikazana analiza predstavlja osnovu za izgradnju sistema za monitoring kvaliteta vazduha utemeljenih na validiranim podacima, čime se omogućava uvođenje lokalno kalibrisanih, sledljivih i efikasnih mreža za monitoring kvaliteta vazduha zasnovanih na primeni jeftinih senzora.

Ključne reči— Kvalitet vazduha, prostorne varijacije, sezonske varijacije, jeftini senzori, lokalna kalibracija

I. UVOD

Dokazano je da prisustvo povećanih koncentracija zagađujućih materija, poput azot-dioksida (NO_2), sumpor-dioksida (SO_2) i suspendovanih čestica (PM) u ambijentalnom vazduhu može da ima dugoročne negativne posledice na zdravlje ljudi, kao i negativan uticaj na kvalitet tla, vode i celokupni biodiverzitet. Procenjeno je da milioni ljudi godišnje prerano umire usled posledica udisanja zagađenog vazduha, posebno u urbanim sredinama gde su koncentracije zagađujućih materija u vazduhu često iznad propisanih i preporučenih granica. Procena Svetske

zdravstvene organizacije (WHO) koja se odnosi na bolesti prouzrokovane zagađenjem vazduha, za period 2010-2019. god., za zagađenje ambijenta (samostalno i zajedno sa zagađenjem domaćinstava), je da je u navedenom periodu u Evropi od posledica zagađenog vazduha obolelo preko 13 miliona ljudi, a u Srbiji oko 250 hiljada ljudi svih uzrasta i polova, kao što je prikazano (Sl.1 i Sl.2)

GHE Cause	Mean value	Mean lower value	Mean upper value	Mean value [95% CI]
Total	13081014.7	8045104.909	19282676.71	13 081 015 [8 045 105 - 19 282 677]
Ischaemic Heart Disease	7624660.098	4270413.326	11279233.96	7 624 660 [4 270 413 - 11 279 234]
Stroke	2614386.844	1023392.996	4733521.318	2 614 387 [1 023 393 - 4 733 521]
Acute Lower Respiratory Infections	1029692.117	474256.292	1700337.729	1 029 692 [474 256 - 1 700 338]
Chronic Obstructive Pulmonary Disease	941170.198	239071.912	2100942.252	941 170 [239 072 - 2 100 942]
Lung Cancer	860361.045	362843.865	1570455.066	860 361 [362 844 - 1 570 455]

Sl. 1 Procena broja stanovnika obolelih od bolesti prouzrokovanih zagađenjem vazduha u periodu 2010-2019. god. u Evropi.

GHE Cause	Mean value	Mean lower value	Mean upper value	Mean value [95% CI]
Total	255645.16	187978.392	333653.619	255 645 [187 978 - 333 654]
Ischaemic Heart Disease	115904.21	77417.76	151467.423	115 904 [77 418 - 151 467]
Stroke	64523.688	34456.792	101388.914	64 524 [34 457 - 101 389]
Lung Cancer	36913.712	21415.973	54694.079	36 914 [21 416 - 54 694]
Chronic Obstructive Pulmonary Disease	25276.197	10442.795	47137.72	25 276 [10 443 - 47 138]
Acute Lower Respiratory Infections	12797.679	8779.911	17164.727	12 798 [8 780 - 17 165]

Sl. 1 Procena broja obolelih stanovnika od bolesti prouzrokovanih zagađenjem vazduha u periodu 2010-2019. god. u R. Srbiji.

Za tačnu procenu nivoa zagađenja, koriste se podaci dobijeni sa automatskih stanica za monitoring kvaliteta vazduha iz državne mreže monitoringa, ali je postojeći broj ovih stanica (oko 70) i dalje nedovoljan da bi se mrežom automatskog monitoringa kvaliteta vazduha ravnomerno pokrila čitava teritorija Republike Srbije. S druge strane, satelitski podaci o kvalitetu vazduha pružaju širu sliku o prostornoj distribuciji zagađenja,

omogućavajući analizu na globalnom, regionalnom i lokalnom nivou. Međutim, tačnost ovih podataka veoma zavisi od atmosferskih uslova, algoritama obrade i mogućnosti kalibracije u odnosu na direktna merenja sa zemlje [1,2]. Ovi nedostaci se mogu nadomestiti kompaktnim senzorskim mrežama [10], koje omogućavaju gustu pokrivenost na lokalnom nivou i kontinuirano praćenje varijacija zagađenja u realnom vremenu. Njihova fleksibilnost i niža cena u poređenju sa automatskim analizatorima i stanicama za monitoring čine ih sve važnijim alatom u naučnim istraživanjima i kreiranju ekoloških politika. Integracijom podataka iz državne mreže automatskog monitoringa kvaliteta vazduha, satelitskih merenja i sa senzorskih mreža koje koriste jeftine senzore, moguće je postići precizniju procenu prostorne i vremenske distribucije zagađujućih materija, što je ključno za efikasno upravljanje kvalitetom vazduha.

II. MATERIJAL I METODOLOGIJA

A. Zagađujuće materije čije se koncentracije redovno prate u ambijentalnom vazduhu

Zagađujuće materije čije se koncentracije u ambijentalnom vazduhu najčešće kontinuirano prate na većini mernih mesta u državnoj mreži automatskog monitoringa kvaliteta vazduha su: **Suspendovane čestice** (frakcije **PM_{2.5}** i **PM₁₀**): Suspendovane čestice PM_{2.5} (čestice prečnika manjeg od 2.5 mikrometra) i PM₁₀ (čestice prečnika manjeg od 10 mikrometara). Dokazano je da povećane koncentracije ovih čestica u vazduhu ambijenta imaju negativan uticaj na ljudsko zdravlje, posebno na respiratorni i kardiovaskularni sistem. **NO₂ (azot dioksid)**: NO₂ je gas koji nastaje kao rezultat sagorevanja fosilnih goriva, posebno u saobraćaju i industrijskim procesima. Povišene koncentracije NO₂ mogu ukazivati na zagađenje od saobraćaja i drugih industrijskih aktivnosti, što može imati negativne efekte na ljudsko zdravlje, uključujući iritacije očiju i disajnih puteva, kao i povećane rizike od astme i drugih respiratornih oboljenja. **SO₂ (sumpor dioksid)**: SO₂ je gas koji se najčešće oslobađa sagorevanjem uglja i nafte, kao i tokom industrijskih procesa. Povišene koncentracije SO₂ mogu izazvati respiratorne probleme, posebno kod osoba sa već narušenim zdravljem. Dugoročno izlaganje SO₂ može uzrokovati oštećenje pluća i pogoršati postojeće respiratorne bolesti poput astme.

TABELA I. PREPORUČENE GRANIČNE VREDNOSTI POLUTANATA OD STRANE WHO

Zagađujuća materija	Jedinica	WHO smernice pre 2021. god.	WHO smernice iz 2021. god.
PM _{2.5}	µg/m ³ (god. prosek)	10	5
PM _{2.5}	µg/m ³ (24h prosek)	25	15
PM ₁₀	µg/m ³ (god. prosek)	20	15
PM ₁₀	µg/m ³ (24-h prosek)	50	45
NO ₂	µg/m ³ (god. prosek)	40	10
NO ₂	µg/m ³ (24-h prosek)	/	25
SO ₂	µg/m ³ (god. prosek)	40	20

Analizom podataka o ovim zagađujućim materijama u određenom periodu vremena ostvaruje se uvid u to kako pojedine zagađujuće materije utiču na kvalitet vazduha u

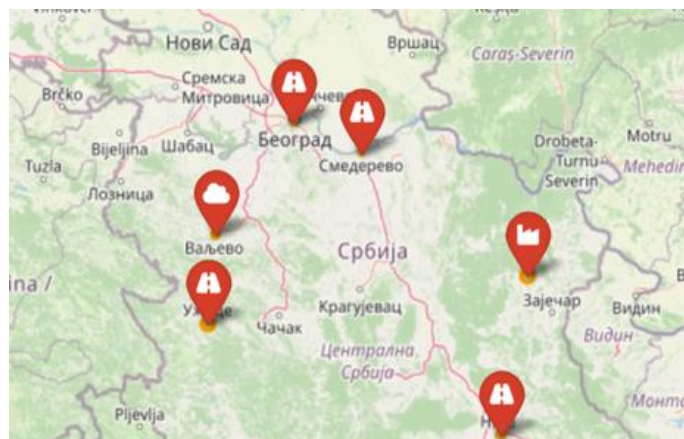
posmatranim sredinama. Ovakve analize pomažu u donošenju odluka pri kreiranju politika zaštite životne sredine i zaštite zdravlja stanovništva, kao i u implementaciji odgovarajućih strategija za smanjenje emisija zagađujućih materija.

B. Lokacije i merne stanice

U ovom radu analizirani su podaci sa šest automatskih mernih stanica iz državne mreže automatskog monitoringa kvaliteta vazduha Republike Srbije čije su karakteristike prikazane u TABELA II i Sl. 3. Kao indikatori kvaliteta vazduha korišćene su srednje dnevne koncentracije PM_{2.5} i PM₁₀, NO₂ i SO₂, u periodu od pet godina (2019-2023. god.).

TABELA II OPISI MERNIH MESTA, TIPOVA STANICA I ZAGAĐUJUĆIH MATERIJIA

Grad	Naziv stanice	Tip stanice	Zagađujuće materije
Beograd	Beograd Mostar	Urbana, Saobraćaj	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂
Smederevo	Smederevo Centar	Urbana, Saobraćaj	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂
Bor	Bor Gradski park, IRM Bor	Urbana, Industrija	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂
Niš	Niš IZJZ	Urbana, Saobraćaj	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂
Valjevo	Valjevo	Urbana, Pozadina	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂
Užice	Užice	Urbana, Saobraćaj	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂



Sl. 3 Lokacije odabranih automatskih mernih mesta u državnoj mreži monitoringa kvaliteta vazduha na karti R. Srbije

C. Opis statističkih metoda i metrika primenjenih u analizi

U ovom radu primenjene su osnovne deskriptivne i grafičke statističke metode radi kvantitativne analize distribucije koncentracija zagađujućih materija (PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂ i NO₂) na primeru gradova u Srbiji u kojima je aerozagađenje najizraženije. Analiza rezultata merenja zagađujućih materija u periodu od pet godina omogućava identifikaciju kratkoročnih promena, sezonskih promena, kao i trend kvaliteta vazduha na posmatranim mernim mestima [4,7].

Korišćenjem metrika kao što su srednja vrednost, medijana, standardna devijacija i međukvartilni raspon, omogućeno je poređenje stepena zagađenja između gradova i uočavanje prostorno-vremenskih obrazaca [9]. Ovakva analiza predstavlja

osnovu za detekciju odstupanja, procenu stabilnosti mernih sistema i validaciju podataka iz alternativnih izvora, kao što su mreže građanskog monitoringa kvaliteta vazduha koje koriste jeftine senzore [6].

Sezonska varijabilnost je izuzetno važna za metrologiju i kalibraciju mreža monitoringa na bazi jeftinih senzora, jer kvalitet merenja (tačnost, preciznost) veoma zavisi od uslova u kojima senzori rade. Rezultati merenja kvaliteta vazduha jeftinim senzorima zavise od promena temperature i relativne vlažnost vazduha. Na primer, niska temperatura i visoka relativna vlažnost vazduha u hladnom periodu godine negativno utiču na rezultate merenja suspendovanih čestica primenom jeftinih senzora [11].

Radi vizuelnog i kvantitativnog sagledavanja trendova, korišćeni su i elementi vremenskih analiza sa akcentom na pokretni prosek. Primena pokretnog proseka sa prozorom od 365 dana omogućila je eliminaciju sezonskih oscilacija i dnevnih varijacija koje su tipične za zagađujuće materije kao što su $PM_{2.5}$ i SO_2 , naglašavajući stabilne promene u srednjem nivou zagađenja tokom posmatranog perioda [5]. Na ovaj način, omogućena je detekcija dugoročnih trendova, kao i procena efekata mera javne politike, promena u urbanizaciji i industrijskoj aktivnosti.

Kombinovanjem numeričke i grafičke analize podataka, omogućeno je sveobuhvatno sagledavanje varijabilnosti i pouzdanosti merenja. Ovaj pristup je od posebnog značaja u kontekstu metrologije, jer doprinosi proceni kvaliteta mernih rezultata, identifikaciji potencijalnih grešaka i validaciji mernih sistema, naročito kod upotrebe jeftinih senzora koji zahtevaju pažljivu kalibraciju i nadzor [8].

III. REZULTATI I DISKUSIJA

Prilikom analize rezultata merenja zagađujućih materija korišćene su srednje dnevne vrednosti koncentracija $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 i SO_2 preuzete sa automatskih mernih mesta iz državne mreže monitoringa kvaliteta vazduha Republike Srbije u periodu 2019-2023. god. čiji su nazivi dati u TABELA II.

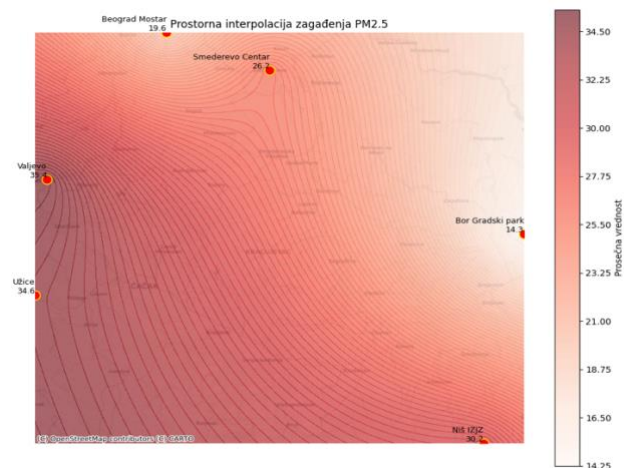
A. Suspendovane čestice frakcije $PM_{2.5}$

TABELA III. ANALIZA KONCENTRACIJA $PM_{2.5}(\mu g/m^3)$ (MEAN- SREDNJA VREDNOST, STD – STANDARDNO ODSUPANJE, IQR –INTERKVARTILNI RASPON)

Grad	Beograd	Valjevo	Niš	Smederevo	Bor	Užice
mean	19.7	36.9	31.4	26.8	15.0	34.6
std	15.8	31.8	30.2	24.8	9.1	28.8
min	1.8	2.4	3.7	0.7	2.0	1.0
25%	9.0	13.7	12.0	11.2	9.4	15.2
50%	14.2	25.2	18.7	18.0	13.2	23.5
75%	25.0	52.5	39.1	32.8	18.5	46.2
max	114.0	246.0	192.8	165.7	119.5	178.0
median	14.2	25.2	18.7	18.0	13.2	23.5
IQR	16.0	38.8	27.1	25.6	9.1	31.0

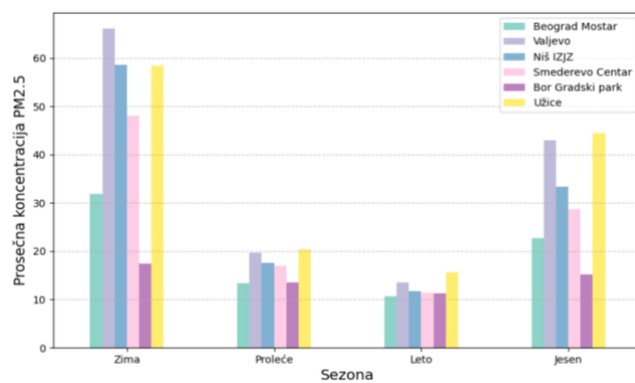
Iz TABELA III i sa Sl. 4 može se uočiti da su najviše srednje vrednosti koncentracija $PM_{2.5}$ u posmatranom periodu određene u Valjevu ($36.9 \mu g/m^3$) i Užicu ($34.6 \mu g/m^3$), što ukazuje na konstantno visok nivo čestičnog zagađenja u ovim sredinama,

kao i u slučaju maksimalnih vrednosti dnevnih koncentracija $PM_{2.5}$: Valjevo ($246 \mu g/m^3$) i Užice ($178 \mu g/m^3$).

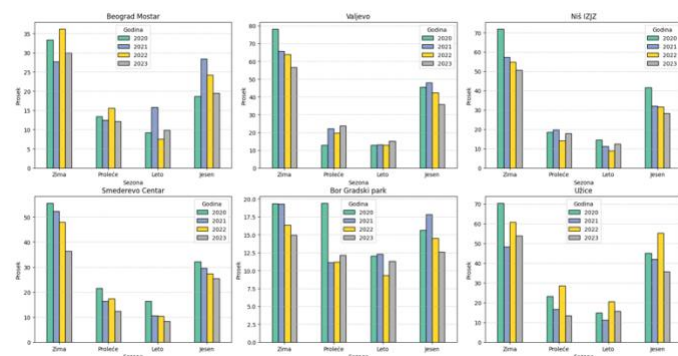


Sl. 4 Prostorni prikaz zagađenja suspendovanim česticama $PM_{2.5}$

Najniže srednje vrednosti koncentracija $PM_{2.5}$ u posmatranom periodu izmerene su u Boru ($15.0 \mu g/m^3$) i u Beogradu ($19.7 \mu g/m^3$). Varijabilnost: Valjevo i Užice imaju najvišu standardnu devijaciju i IQR, što ukazuje na nestabilne uslove sredine i česte epizode zagađenja.



Sl. 5 Sezonski prosek koncentracija $PM_{2.5}$ po mernim mestima ($\mu g/m^3$)



Sl. 6 Sezonski prosek koncentracija $PM_{2.5}$ po godinama i lokacijama ($\mu g/m^3$)

Sa Sl. 5 jasno se uočavaju sezonske promene u koncentracijama $PM_{2.5}$, sa znatno višim srednjim vrednostima tokom zimskih meseci u odnosu na letnji period. Ovakav sezonski obrazac se ponavlja tokom svih godina kao na Sl. 6 ali nije prisutan na svim

lokacijama. U Boru nema vidljive sezone promene (uticaj rada topionice bakra i rada sistema centralnog grejanja koji koristi više od 80% stambenih jedinica u Boru), dok su u Valjevu, Užicu i Nišu zabeležena izrazito velika odstupanja, što ukazuje na značaj lokalnih izvora zagađenja (lokalna ložišta u zimskom periodu) i specifičnih mikroklimatskih uslova (sva ova naselja su u kotlinama).

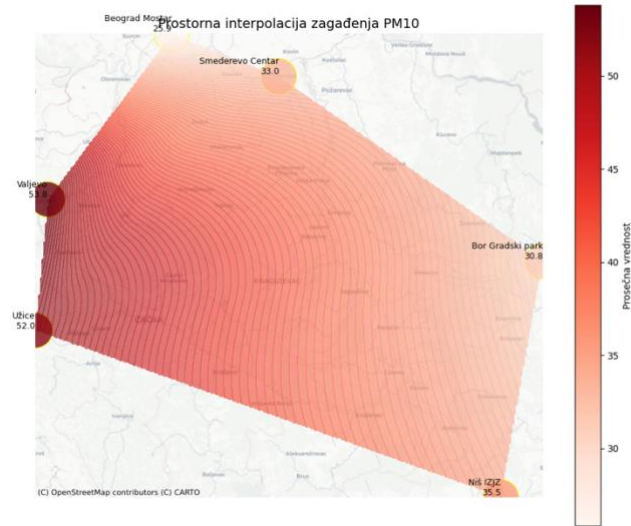
B. Suspendovane čestice frakcije PM₁₀

TABELA IV. ANALIZA KONCENTRACIJA PM₁₀(μG/M³) (MEAN- SREDNJA VREDNOST, STD – STANDARDNO ODSUPANJE, IQR –INTERKVARTILNI RASPON)

Grad	Beograd	Valjevo	Niš	Smederevo	Bor	Užice
mean	25.9	53.8	35.5	33.0	30.8	52.0
std	18.7	39.8	31.3	28.2	17.4	37.4
min	1.8	6.2	4.0	1.1	2.7	2.1
25%	13.1	27.1	15.1	15.4	19.8	28.3
50%	20.2	39.9	24.1	23.9	27.7	38.6
75%	32.7	69.3	43.2	39.2	38.8	63.7
max	135.9	304.5	194.1	194.2	276.1	318.5
median	20.2	39.9	24.1	23.9	27.7	38.6
IQR	19.6	42.2	28.1	23.8	19.0	35.4

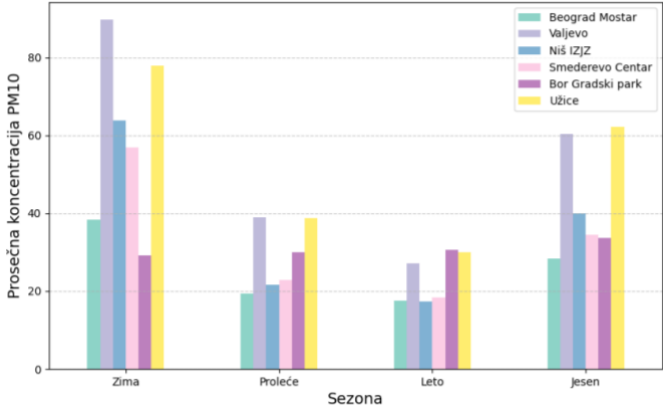
U TABELA 4 i sa Sl. 7 može se uočiti da su najviše srednje vrednosti koncentracija PM₁₀ u posmatranom periodu određene u Valjevu (53.8 μg/m³) i Užicu (52.0 μg/m³), što ukazuje na konstantno visok nivo čestičnog zagađenja u ovim sredinama, kao i u slučaju maksimalnih vrednosti dnevnih koncentracija PM₁₀: Valjevo (304.5 μg/m³) i Užice (318.5 μg/m³).

Gradovi Beograd, Niš, Smederevo i Bor i imaju umerene prosečne vrednosti (26–36 μg/m³) koncentracija PM₁₀, ali se povremeno javljaju pikovi sa visokim vrednostima PM₁₀.

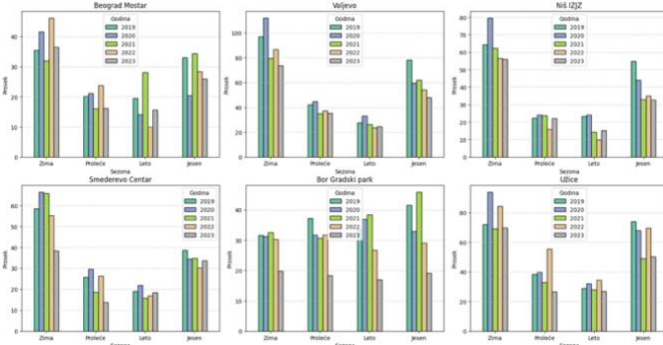


Sl. 7 Prostorni prikaz zagađenja suspendovanim česticama PM₁₀

Vrednosti PM₁₀ i PM_{2.5} značajno korelišu u pogledu sezonskih obrazaca Sl. 8, ali je uočljivo da odnos PM_{2.5}/PM₁₀ varira između gradova, što ukazuje na razlike u izvorima zagađenja u različitim sredinama Sl. 9



Sl. 8 Sezonski prosek koncentracija PM₁₀ po mernim mestima (μg/m³)



Sl. 9 Sezonski prosek koncentracija PM₁₀ po godinama i lokacijama (μg/m³)

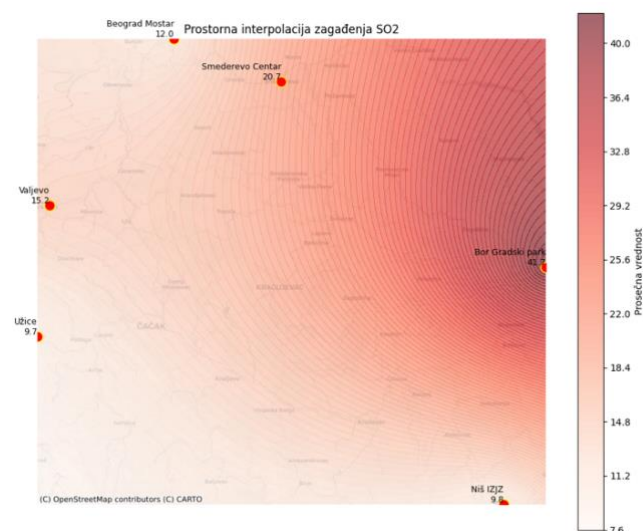
Ovakav sezonski obrazac ukazuje na to da je proveru karakteristika jeftinih PM senzora potrebno vršiti najmanje 2 puta godišnje i uvesti sezonske dinamičke koeficijente.

C. Sumpor-dioksid SO₂

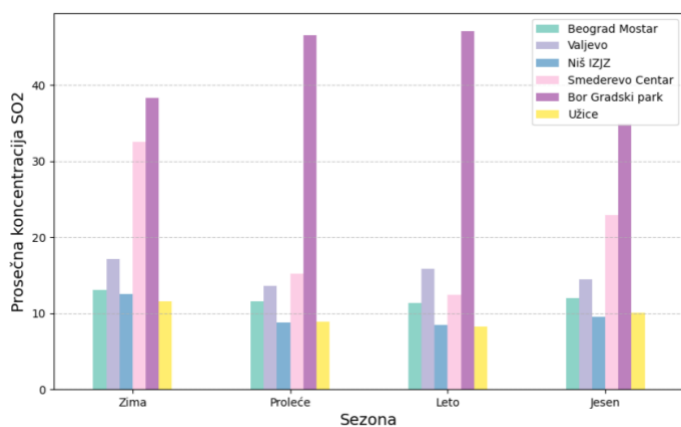
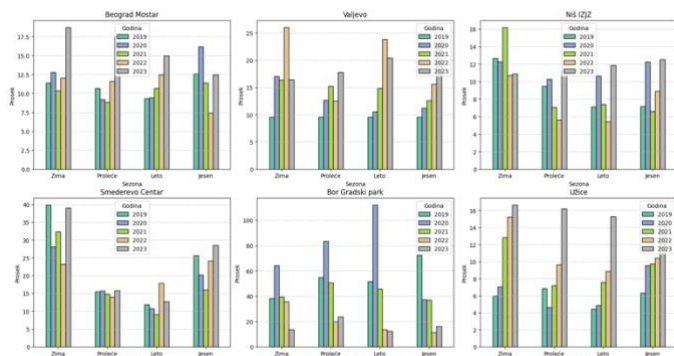
TABELA V. ANALIZA KONCENTRACIJA SO₂(μG/M³) (MEAN- SREDNJA VREDNOST, STD – STANDARDNO ODSUPANJE, IQR –INTERKVARTILNI RASPON)

Grad	Beograd	Valjevo	Niš	Smederevo	Bor	Užice
mean	12.0	15.2	9.1	20.7	44.2	9.7
std	6.4	6.5	4.9	14.9	63.2	4.8
min	2.9	2.6	1.7	3.0	2.1	1.7
25%	7.7	9.6	6.2	10.7	15.4	5.7
50%	10.9	14.1	9.8	16.0	27.5	8.3
75%	14.9	19.4	11.9	25.8	42.5	14.4
max	133.7	59.4	60.8	108.6	887.7	33.3
median	10.9	14.1	9.8	16.0	27.5	8.3
IQR	7.1	9.8	5.7	15.2	27.1	8.6

Bor se izdvaja sa daleko najvišim vrednostima sumpor-dioksida (mean 44.2 μg/m³, max 887.7 μg/m³) – TABELA V i Sl 10. Uzrok tome jeste prisustvo metalurškog kompleksa topionice bakra gde se prerađuju sulfidni koncentracije bakra, bez adekvatnog tretmana otpadnih gasova sve do sredine 2023. god. Ostali gradovi imaju umerene do niske vrednosti koncentracije SO₂ u odnosu na godišnju graničnu vrednost. Prosečne koncentracije SO₂ u Valjevu i Smederevu pokazuju izraženiju varijabilnost u odnosu na one određene za Beograd i Užice.

Sl. 10 Prostorni prikaz zagađenja SO₂

Sezonski obrazac za koncentracije SO₂ je primećen samo u Smederevu što nije slučaj u ostalim gradovima Sl. 11. Ovo se može pripisati sezonskim varijacijama, pravcu i učestanosti vetra tokom godine na teritoriji Smedereva Sl. 12.

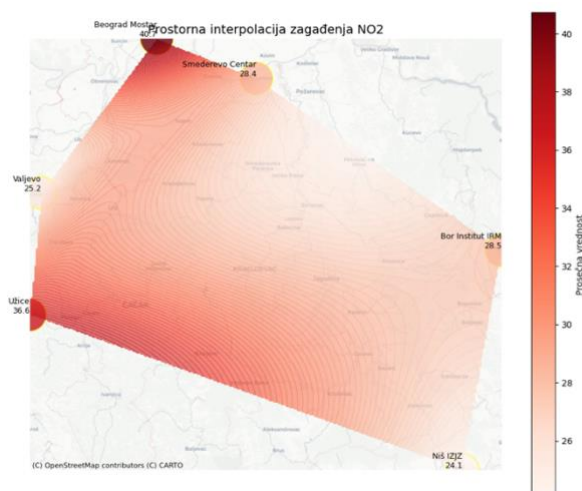
Sl. 11 Sezonski prosek koncentracija SO₂ po mernim mestima (µg/m³)Sl. 12 Sezonski prosek koncentracija SO₂ po godinama i lokacijama (µg/m³)

D. Azot-dioksid NO₂

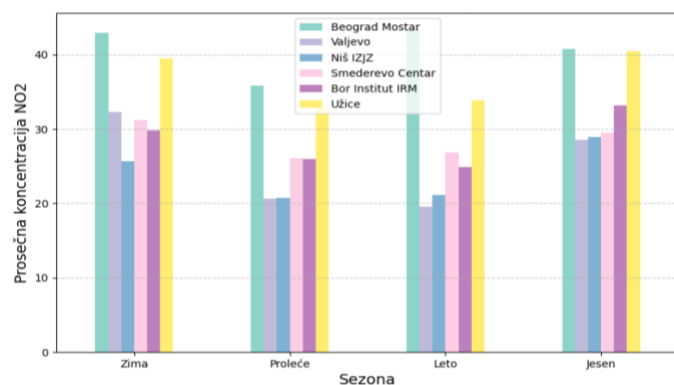
U TABELA VI i na Sl.13 može se uočiti da su najviše srednje vrednosti koncentracija NO₂ u posmatranom periodu određene u Beogradu (40.7 µg/m³) i Ušicu (36.6 µg/m³), što ukazuje na konstantno visok nivo zagađenja NO₂ u ovim sredinama.

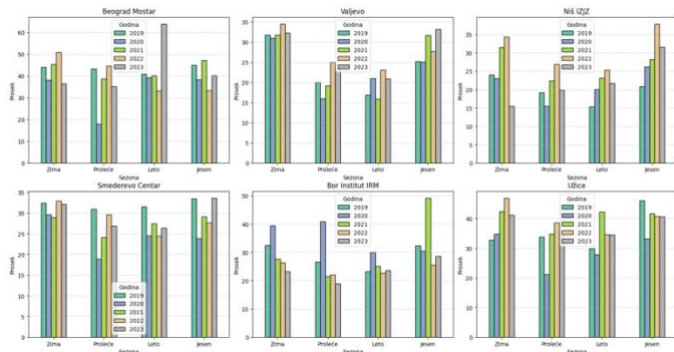
TABELA VI. ANALIZA KONCENTRACIJA NO₂ (µg/M³) (MEAN- SREDNJA VREDNOST, STD – STANDARDNO ODSUPANJE, IQR –INTERKVARTILNI RASPON)

Grad	Beograd	Valjevo	Niš	Smederevo	Bor	Ušice
mean	40.7	25.2	24.1	28.4	28.5	36.6
std	15.9	9.1	10.0	10.4	13.4	10.9
min	3.2	3.6	4.7	4.4	5.5	6.8
25%	29.2	18.5	17.0	20.6	18.4	29.4
50%	38.6	23.7	22.6	27.2	26.0	35.6
75%	50.8	30.5	28.9	35.8	36.0	42.9
max	98.6	96.1	70.2	70.6	93.0	83.8
median	38.6	23.7	22.6	27.2	26.0	35.6
IQR	21.6	12.0	11.9	15.1	17.6	13.5

Sl. 13 Prostorni prikaz zagađenja NO₂

Beograd ima ubedljivo najvišu srednju vrednost koncentracija NO₂ (40.7 µg/m³), što je očekivano s obzirom na gust saobraćaj i urbani karakter. Ušice i Smederevo takođe pokazuju povišene nivoe. Niš i Valjevo imaju umerene vrednosti (oko 24–25 µg/m³), dok Bor pored industrije i izražen saobraćajni doprinos koncentracijama NO₂

Sl. 14 Sezonski prosek koncentracija NO₂ po mernim mestima (µg/m³)



Sl. 2 Sezonski prosek koncentracija NO₂ po godinama i lokacijama (µg/m³)

IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana statistička analiza koncentracija zagađujućih materija (PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂ i NO₂) na primeru gradova u Srbiji u kojima je aerozagađenje najizraženije. Pored osnovnih deskriptivnih statistika (srednja vrednost, standardna devijacija, minimum, maksimum, percentili, IQR), analizirana je i prostorna distribucija i sezonska varijabilnost zagađujućih materija.

Rezultati analize pokazuju značajne razlike u varijabilnosti koncentracija između gradova, što ukazuje na potrebu za lokalno prilagođenim strategijama merenja i kontrole zagađenja.

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da je, radi osiguravanja tačnosti i upotrebljivosti podataka, neophodno da se i uređaji iz mreža jeftinih senzora, koji pokrivaju mikrolokacije unutar gradova, kalibrišu (da se izvrši uporedna provera karakteristika senzora u odnosu na referentni uređaj) u odnosu na najbliže dostupno automatsko merno mesto iz državne mreže monitoringa kvaliteta vazduha.

S aspekta metrologije, neophodno je dokumentovati dugoročnu stabilnost karakteristika jeftinih senzora, proceniti mernu nesigurnost za svaki vremenski period, i sprovoditi najmanje dva uporedna merenja - kalibracije godišnje, kako bi se obezbedila sledljivost i tačnost merenja u zimskim i letnjim režimima rada.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] Liu, F., Beirle, S., Zhang, Q., Van der A, R. J., & Wagner, T., NO₂ pollution over China inferred from satellite and ground-based measurements. *Environmental Research Letters*, 14(3), 034003. DOI: [10.1088/1748-9326/aaf938](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf938), 2019.
- [2] Martin, R. V., Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, 42(34), 7823-7843. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2008.07.018](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.018), 2008.
- [3] van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., & Boys, B. L. Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter. *Environmental Health Perspectives*, 123(2), 135-143. DOI: [10.1289/ehp.1408646](https://doi.org/10.1289/ehp.1408646), 2015.
- [4] World Health Organization (WHO), 2021. WHO Global Air Quality Guidelines. [Link](https://www.who.int/publications-detail/who-global-air-quality-guidelines), 2021.
- [5] Broday, D. M., & Rosenzweig, R., Analysis of seasonal trends in air pollution data using moving average techniques. *Environmental Modelling & Software*, 26(4), 456-463. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.11.004>, 2011.

- [6] Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D. M., & Bartonova, A., Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>, 2017.
- [7] EEA. (2019). *Air quality in Europe – 2019 report*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>
- [8] Maag, B., Zhou, Z., & Thiele, L., A Survey on Sensor Calibration in Air Pollution Monitoring Deployments. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6), 4857-4870. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2853660>, 2018.
- [9] Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N., *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3rd ed.). Wiley, 2016.
- [10] Ramadani, U., Lazović, I., Radojević, S., Živković, M., Jovašević-Stojanović, M., Davidović, M., *Mreže senzora za praćenje koncentracije suspendovanih čestica u vazduhu*, ETRAN, DOI: <https://doi.org/10.69994/68E24029>, 2024.
- [11] Topalović, D.B., Tasić, V.M., Petrović, J.S.S. et al. Unveiling the potential of a novel portable air quality platform for assessment of fine and coarse particulate matter: in-field testing, calibration, and machine learning insights. *Environ Monit Assess* **196**, 888. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13069-0>, 2024.

ABSTRACT

Air quality monitoring is crucial for understanding the impact of pollution on human health and the environment. The National Network for Automatic Air Quality Monitoring through automatic measuring stations provides precise and metrologically traceable measurements of pollutant concentrations, providing reliable data that can be used to calibrate and verify the measurement results of sensor networks and devices that use low-cost sensors for air quality monitoring.

This paper presents the results of the analysis of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂ and NO₂ concentrations in selected urban areas in the Republic of Serbia in the period 2019-2023. Using descriptive and comparative statistical methods, spatial differences in the level of pollution and pronounced seasonal changes in certain pollutants were identified, which significantly affects the interpretation of weather trends and the assessment of population exposure to air pollution.

Special emphasis is placed on the reliability and stability of measurement data, as well as their application in support of metrologically relevant analyses. The presented analysis represents the basis for building air quality monitoring systems based on validated data, thus enabling the introduction of locally calibrated, traceable and efficient air quality monitoring networks based on the use of low-cost sensors.

Air Pollution Analysis in Serbian Cities: Seasonal Variability and the Importance of Local Calibration of Sensor Networks

Uzahir Ramadani, Slobodan Radojević, Dušan Radivojević, Marija Živković, Viša Tasić, Ivan Lazović