

UDK: 628.539:661.984.“2010/2013“:“2019/2023“(045)=163.41 Primljen: 05.02.2024.
DOI: 10.5937/bakar2401011T Prerađen: 09.05.2024.
NAUČNI RAD Prihvaćen: 10.05.2024.
Oblast: Ekološko inženjerstvo

**ANALIZA SEZONSKIH PROMENA KONCENTRACIJA AZOT
DIOKSIDA U BORU U PERIODIMA OD 2010. DO 2013. GODINE I
OD 2019. DO 2023. GODINE**

**ANALYSIS OF SEASONAL VARIATIONS IN THE NITROGEN
DIOXIDE LEVELS IN THE CITY OF BOR IN THE PERIODS
2010-2013 AND 2019-2023**

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

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

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

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

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

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

^{1e} E-mail: tamara.urosevic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9838-3702>

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

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

Izvod

Pored saobraćaja glavni izvor azot dioksida u ambijentalnom vazduhu su i industrijska postrojenja u kojima se vrši sagorevanje na visokim temperaturama, kao što su toplane i topionice. U velikim gradovima azotni oksidi poreklom od saobraćaja su dominantna komponenta aerorozagađenja i predstavljaju važan izvor izloženosti i zdravstvenog rizika za ljude, posebno za one koji se kreću pored prometnih saobraćajnica. U gradu Boru merenje koncentracija azot dioksida u realnom vremenu vrši se od 2010. godine na mernom mestu „Institut IRM Bor“ kod Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor. U ovom radu prikazana je analiza rezultata merenja koncentracija azot dioksida u Boru u periodima 2010.-2013. i 2019.-2023. godine. Na osnovu analize rezultata merenja azot dioksida ustanovljeno je da u oba posmatrana vremenska perioda postoje sezonske promene koncentracija azot dioksida (grejna/negrejna sezona). U posmatranim periodima koncentracije azot dioksida bile su u proseku 17% više u grejnoj sezoni u odnosu na koncentracije NO₂ izmerene u negrejnoj sezoni. Takođe, u periodu 2019.-2023. godine prosečna koncentracija azot dioksida iznosila je 28.6 µg/m³ što je za oko 18% više u odnosu na period 2010.-2013. godine u kome je prosečna koncentracija azot dioksida iznosila 24.3 µg/m³. U posmatranim vremenskim periodima zabeleženo je svega nekoliko dana sa prosečnom dnevnom koncentracijom azot dioksida iznad dnevne granične vrednosti od 85 µg/m³, međutim nije bilo prekoračenja granične vrednosti za srednju godišnju koncentraciju azot dioksida od 40 µg/m³.

Ključne reči: merenje, azot-dioksid, kvalitet vazduha, sezonske promene, saobraćaj

Abstract

In addition to traffic, the main source of nitrogen dioxide is also industrial plants where combustion takes place at high temperatures, such as heating plants and smelters. Nitrogen oxides from traffic are the dominant component of air pollution in large cities and represent an important source of exposure and health risk for people, especially those who move along busy roads. In Bor, real-time nitrogen dioxide concentrations have been measured since 2010 at the measuring point "Institute IRM Bor" near Mining and Metallurgy Institute Bor. This paper presents an analysis of the results of measuring nitrogen dioxide concentrations in Bor in the periods 2010-2013 and 2019-2023. Based on the analysis of nitrogen dioxide measurement results, it was established that in both periods there are seasonal changes (heating/non-heating season) in nitrogen dioxide concentrations. Nitrogen dioxide concentrations were on average 17% higher in the heating season than in the non-heating season. Also, in the period 2019-2023 the average concentration of nitrogen dioxide was $28.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which is about 18% more compared to the period 2010-2013 in which the average concentration of nitrogen dioxide was $24.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In the observed periods, there was no exceedance of the limit value for the average annual concentration of nitrogen dioxide of $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. However, several days were recorded with an average daily concentration of nitrogen dioxide above the daily limit value of $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Keywords: measurement, nitrogen dioxide, air quality, seasonal changes, traffic

1. UVOD

Azot oksid (NO) i azot dioksid (NO₂) su dva dominantna oksida azota koji nastaju iz različitih procesa sagorevanja, posebno pri visokim temperaturama (>1000°C). Ambijentalne koncentracije ovih gasova značajno variraju u zavisnosti od intenziteta emisije iz lokalnih izvora. U ambijentalnom vazduhu, oksidi azota formiraju se kombinacijom kiseonika i azota pri visokim temperaturama tokom procesa sagorevanja. Što je temperatura sagorevanja veća, to se više azot oksida generiše. Najčešće se 90-95% oksida azota obično emituje kao azot oksid, a samo 5-10% kao azot dioksid, iako su uočene značajne varijacije ovih procenata u zavisnosti od vrste izvora emisije. U ambijentalnim uslovima, azot oksid se brzo oksiduje u vazduhu kako bi formirao azot dioksid pomoću dostupnih oksidanasa (kao što su kiseonik, ozon i organska jedinjenja) i ova brza oksidacija je takva da se obično azot dioksid smatra primarnim zagađivačem (polutantom) vazduha. Međutim, u zatvorenim prostorima, ovaj proces oksidacije je generalno mnogo sporiji.

U gasovitom obliku, azot dioksid je lako isparljiv, crvenkasto smeđe boje, teži od vazduha i ima karakterističan oštar miris koji se može osetiti pri koncentraciji NO₂ od $188 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.1 ppm). NO₂ reaguje sa vodom i rastvorljiv je u sumpornoj i azotnoj kiselini [1].

Smatra se da su emisije NO₂ iz saobraćaja (kao proizvod sagorevanja fosilnih goriva u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem) dominantan izvor NO₂ u ambijentalnom vazduhu u urbanim sredinama. Oko 40% emisije NO i NO₂ potiče od drumskog saobraćaja pri čemu Evropa i Severna Amerika učestvuju sa čak 25% [1]. U najznačajnije izvore NO₂ u zatvorenom prostoru

ubrajaju se duvanski dim i emisije iz peći za sagorevanje gasa, drveta, nafte i uglja. Azot dioksid iz prirodnih i antropogenih izvora na otvorenom takođe utiče na nivoe ovog gasa u zatvorenom prostoru. U ambijentalnim uslovima, kako napolju tako i unutra, azot dioksid postoji u gasovitom stanju, pa je inhalacija glavni put izloženosti ljudi ovom polutantu na sobnoj temperaturi.

Udisanje vazduha sa visokom koncentracijom NO₂ može iritirati disajne puteve u ljudskom respiratornom sistemu. Takvo izlaganje tokom kratkih perioda može pogoršati respiratorne bolesti, posebno astmu, što dovodi do respiratornih simptoma (kao što su kašalj, pištanje pri disanju ili otežano disanje). Duže izlaganje povišenim koncentracijama NO₂ može doprineti razvoju astme i potencijalno povećati osetljivost na respiratorne infekcije. Osobe sa astmom, kao i deca i starije osobe su potencijalno u većem riziku od uticaja NO₂ na zdravlje, u odnosu na ostali deo populacije.

NO₂ i drugi oksidi azota u interakciji sa vodom, kiseonikom i drugim hemijskim elementima u atmosferi utiču na formiranje kiselih kiša. Kisele kiše štete osetljivim ekosistemima kao što su jezera i šume.

1.1. Merenje koncentracija azot dioksida u Boru

U skladu sa Zakonom o zaštiti vazduha („Sl. glasnik RS“ br. 36/09 i 10/13) nadležnost nad državnom mrežom za praćenje kvaliteta vazduha na nivou Republike Srbije ima Agencija za zaštitu životne sredine (SEPA). Od svog osnivanja 2004. godine, SEPA je, u skladu sa finansijskim mogućnostima, radila na formiranju državne mreže za automatski monitoring kvaliteta vazduha u Republici Srbiji. Operativni monitoring kvaliteta vazduha, primenom automatskih referentnih metoda, realizuje se saglasno Uredbi o utvrđivanju programa kontrole kvaliteta vazduha u državnoj mreži („Sl. glasnik RS“ broj 58/11) i Uredbi o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha („Sl. glasnik RS“ br. 11/10, 75/10 i 63/13) [2]. Najveći broj automatskih mernih stanica (AMS) u okviru državne mreže monitoringa kvaliteta vazduha instaliran je u periodu 2009.-2013. godine (28 fiksnih mernih mesta i jedna mobilna stanica).

Krajem 2009. godine instalirana je AMS Institut IRM Bor (44°03'35.72''N, 22°06'05.16''E) čiji je izgled prikazan na slici 1. Ova AMS postavljena je u blizini Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor, niz vetar u odnosu na topionicu bakra kada duvaju vetrovi iz pravaca sever-severoistok. Stanica se nalazi na oko 2 km jugozapadno od topionice bakra. Takođe, stanica je postavljena na rastojanju od 10 metara od glavne saobraćajnice u gradu, u cilju praćenja uticaja saobraćaja na koncentracije NO₂.

Oprema za monitoring kvaliteta vazduha na AMS Bor - Institut IRM Bor je data u tabeli 1.



Sl. 1. Automatska merna stanica Bor - Institut IRM Bor

Tabela 1. Oprema za monitoring kvaliteta vazduha na AMS Bor - Institut IRM Bor

Polutant	Metoda merenja	Standard/ Norma	Interval izveštavanja
SO ₂	SO ₂ Analizator - UV fluorescencija MODEL 100E, Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, Proizvođač instrumenta: EAS Envimet Analytical Systems Ges.m.b.h., Austria; U skladu sa EN 14212 Kvalitet ambijentalnog vazduha - Standardna metoda za merenje koncentracije sumpor dioksida ultravioletnom fluorescencijom, TUV-Report: 936/21205926/B, 2007	EN 14212	1h
NO ₂	NO ₂ Analizator MODEL 200E, Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, Proizvođač instrumenta: Envimet Analytical Systems Ges.m.b.h., Austria; USEPA: Reference Method Number RFNA 1194-099 CE: EN61326 (1997 w/A1: 98) Class A, FCC Part 15 Subpart B Section 15.107 Class A, ICES-003 Class A (ANSI C63.4 1992) & AS/NZS 3548 (w/A1 & A2; 97) Class A.	EN 14211	1h
CO	CO Analizator MODEL 300E/EM, Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, Proizvođač instrumenta: EAS Envimet Analytical Systems Ges.m.b.h., Austria; USEPA: Reference Method Number EQOA-0992-087 CE: EN61010-1:90 + A1:92 + A2:95, EN61326 - Class A	EN 14626	1h

Realizacija projekata IPA 2012 pod nazivom „Establishment of an integrated environmental monitoring system for air and water quality“, deo „Supply of ICT equipment and software for Air Quality Monitoring System“ omogućila je da SEPA na svojoj web stranici u realnom vremenu prezentuje objedinjeni prikaz podataka automatskog monitoringa kvaliteta vazduha na području Republike Srbije [2]. Rezultati merenja koncentracija NO₂ koji su korišćeni u ovom radu preuzeti su sa zvanične web stranice SEPA. U ovom radu prikazana je analiza rezultata merenja koncentracija NO₂ u Boru u periodima 2010.-2013. i 2019.-2023. godine sa ciljem da se ispita postojanje sezonskih promena koncentracija NO₂ (grejna/negrejna sezona) i kakav je trend srednjih godišnjih vrednosti u posmatranim periodima.

2. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

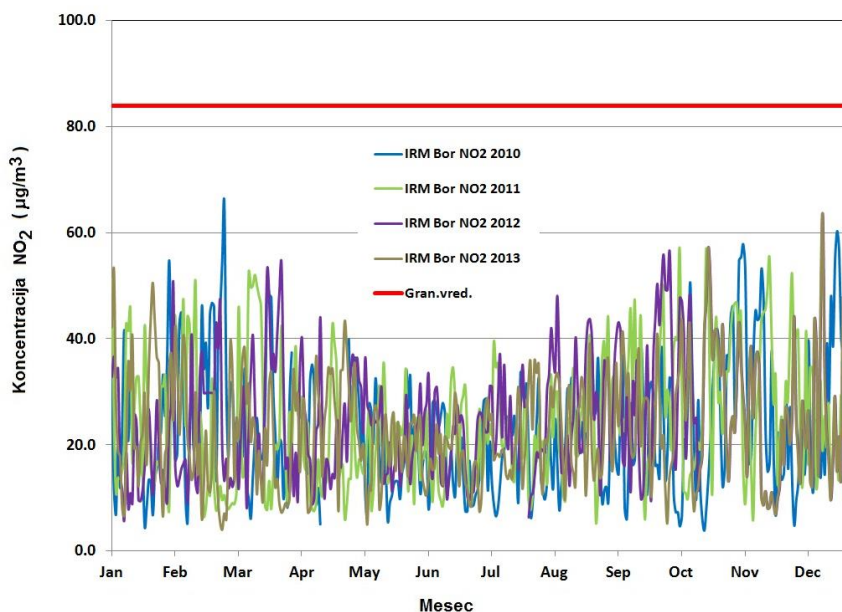
Koncentracija NO₂ koje se prate u realnom vremenu na AMS u Republici Srbiji dostupne su na web strani SEPA u vidu srednje satnih vrednosti, i to su preliminarne, neverifikovane vrednosti. U ovom radu korišćeni su verifikovani, otvoreni podaci životne sredine, preuzeti sa web strane SEPA [3]. U periodu 2014.-2018. vremenska reprezentativnost podataka o koncentracijama NO₂ u Boru bila je ispod 85%, tako da je iz tog razloga ovaj period isključen iz analize.

Tabela 2. Srednje vrednosti koncentracija NO₂ (µg/m³) na mernom mestu AMS Institut IRM Bor u periodu 2010.-2013. godine (GS - grejna sezona, NGS - negrejna sezona)

Godina	IRM Bor NO ₂	IRM Bor NO ₂ GS	IRM Bor NO ₂ NGS	NO ₂ GS/NGS
2010	23	26.6	20.4	1.30
2011	24	26.6	22.8	1.17
2012	25	24.9	25.3	0.98
2013	25	24.6	22.2	1.11
<i>Srednja vrednost</i>	<i>24.3</i>	<i>25.7</i>	<i>22.7</i>	<i>1.14</i>

U tabeli 2 prikazane su srednje vrednosti koncentracija NO₂ na mernom mestu IRM Bor u periodu 2010.-2013. godine pri čemu su posebno prikazane srednje vrednosti koncentracija NO₂ u grejnoj sezoni (periodi od 01.01. do 15.04. i od 15.10. do 31.12.) i u negrejnoj sezoni (period od 15.04. do 15.10.). Na slici 2 prikazane su srednje dnevne koncentracije NO₂ izmerene u periodu 2010.-2013. godine. Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 2 i na slici 2 može se uočiti da je u periodu 2010.-2013. godine prisutna sezonska varijacija u koncentracijama NO₂ u Boru. U proseku su u grejnom periodu godine koncentracije NO₂ u Boru bile više za 13.2% u odnosu na koncentracije NO₂ izmerene u negrejnem periodu godine. Razlog tome je sagorevanje fosilnih

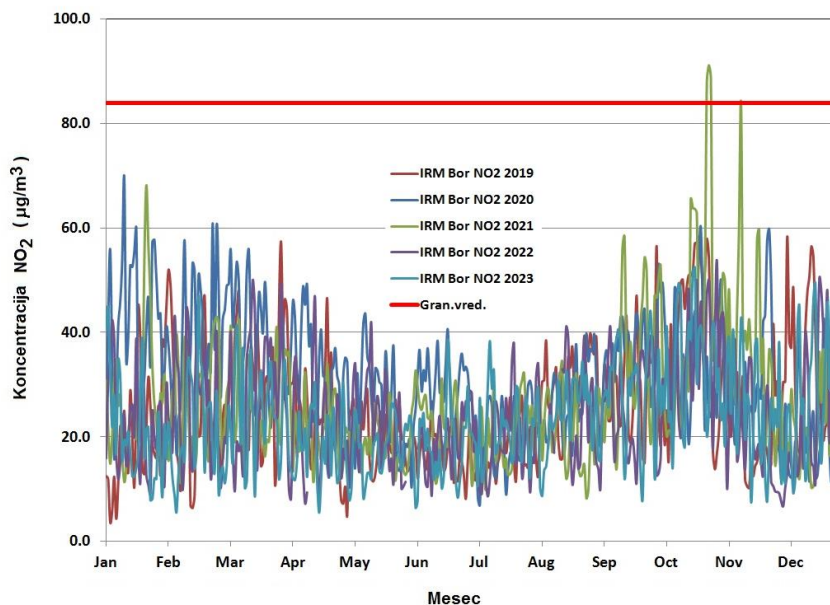
goriva za grejanje stambenih objekata tokom grejne sezone. U periodu 2010.-2013. godine nije bilo prekoračenja granične vrednosti za srednje dnevne i srednje godišnje koncentracije NO₂ u Boru.



Sl. 2. Srednje dnevne koncentracije NO₂ na mernom mestu IRM Bor u periodu 2010.-2013. godine

Tabela 3. Srednje vrednosti koncentracija NO₂ (µg/m³) na mernom mestu AMS Institut IRM Bor u periodu 2019.-2023. godine (GS - grejna sezona, NGS - negrejna sezona)

Godina	IRM Bor NO ₂	IRM Bor NO ₂ GS	IRM Bor NO ₂ NGS	NO ₂ GS/NGS
2019	29	31.5	26.7	1.18
2020	35	39.0	31.4	1.24
2021	31	34.8	27.5	1.27
2022	24	26.0	22.3	1.16
2023	24	24.9	22.3	1.11
Srednja vrednost	28.6	31.2	26.0	1.19



Sl. 3. Srednje dnevne koncentracije NO₂ na mernom mestu IRM Bor u periodu 2019.-2023. godine

U tabeli 3, kao i na slici 3, prikazane su srednje vrednosti koncentracija NO₂ na mernom mestu IRM Bor u periodu 2019.-2023. godine. Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 3 i na slici 3 može se uočiti da je u periodu 2019.-2023. godine prisutna sezonska varijacija u koncentracijama NO₂ u Boru. U proseku su u grejnoj sezoni koncentracije NO₂ u Boru bile više za 20% u odnosu na koncentracije NO₂ izmerene u negrejnoj sezoni. Razlog tome je sagorevanje fosilnih goriva za grejanje stambenih objekata tokom grejne sezone, kao i veća emisija NO₂ iz topionice bakra i gradske toplane u periodu 2019.-2021. godine.

U periodu 2019.-2023. godine zabeleženo je nekoliko prekoračenja granične vrednosti za srednje dnevne koncentracije NO₂ (4 dana tokom 2021. godine), dok u posmatranom periodu nije bilo prekoračenja srednje godišnje granične vrednosti za koncentracije NO₂ u Boru.

U periodu od maja 2022. do maja 2023. godine topionica bakra u Boru nije radila zbog rekonstrukcije i proširenja kapaciteta [4], što je jedan od razloga zašto su srednje godišnje koncentracije NO₂ u Boru u 2022. i 2023. godine niže nego u periodu 2019.-2021. godine.

Takođe, u periodu 2019.-2023. godine prosečna koncentracija azot dioksida iznosila je $28.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ što je za oko 18% više u odnosu na period 2010.-2013. godine u kome je prosečna koncentracija azot dioksida iznosila $24.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. U posmatranim vremenskim periodima zabeleženo je svega nekoliko dana sa prosečnom dnevnom koncentracijom azot dioksida iznad dnevne granične vrednosti od $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, međutim nije bilo prekoračenja granične vrednosti za srednju godišnju koncentraciju azot dioksida od $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kako na formiranje i rasprostiranje azot dioksida u ambijentalnom vazduhu utiču mnogi faktori, od kojih se na neke ne može uticati, (meteorološki uslovi) akcenat treba staviti na smanjenje emisija azot dioksida iz industrijskih postrojenja, odnosno na primenu savremenih tehnologija kojima se ove emisije svode na minimum.

Tabela 4. Srednje godišnje vrednosti koncentracija NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) u Boru, Smederevu, Nišu i Beogradu u periodima 2010.-2013. i 2019.-2023. godine

Godina	IRM Bor	Smederevo Centar	IZJZ NIŠ	Beograd Vračar
2010	23	16	36	35
2011	24	23	39	41
2012	25	20	43	38
2013	25	14	36	31
2019	29	32	20	28
2020	35	24	22	29
2021	31	27	26	24
2022	24	29	31	29
<i>Srednja vrednost</i>	<i>27.0</i>	<i>23.1</i>	<i>31.6</i>	<i>31.9</i>

U tabeli 4 prikazane su srednje godišnje vrednosti koncentracija NO_2 izmerene u Boru, Smederevu, Nišu i Beogradu u periodu 2010.-2013. i 2019.-2022. godine [5]. Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 4 može se primetiti da su prosečne godišnje koncentracije NO_2 u Nišu i Beogradu više u odnosu na prosečne godišnje koncentracije NO_2 koje su izmerene u Boru i Smederevu. Ovo ukazuje na znatan doprinos saobraćaja i lokalnih izvora na koncentracije NO_2 u većim urbanim centrima. Takođe, varijacije srednje godišnjih koncentracija NO_2 ukazuju i na značajan uticaj meteoroloških faktora (pre svega pravac i brzina vetra) na vrednosti koncentracija NO_2 koje su izmerene na posmatranim mernim mestima.

ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je analiza rezultata merenja koncentracija NO₂ u Boru u periodima 2010.-2013. i 2019.-2023. godine sa ciljem da se ispita da li postoje sezonske promene koncentracija NO₂ (grejna/negrejna sezona) i kakav je trend srednjih godišnjih vrednosti koncentracija NO₂ u posmatranim periodima.

Ustanovljeno je da postoje sezonske varijacije koncentracija NO₂ tokom godine. U posmatranom periodu koncentracije NO₂ bile su, u proseku, za 17% više u grejnoj sezoni u odnosu na koncentracije NO₂ izmerene u negrejnoj sezoni. Takođe, u periodu 2019.-2023. godine prosečna koncentracija azot dioksida iznosila je 28.6 µg/m³ što je za oko 18% više u odnosu na period 2010.-2013. godine u kome je prosečna koncentracija azot dioksida iznosila 24.3 µg/m³.

Ovakav porast koncentracija NO₂ u periodu 2019.-2023. godine može se dobrim delom pripisati porastu proizvodnje u topionici bakra u periodu 2019.-2021. godine.

U posmatranim vremenskim periodima zabeleženo je svega nekoliko dana sa prosečnom dnevnom koncentracijom azot dioksida iznad dnevne granične vrednosti od 85 µg/m³, međutim nije bilo prekoračenja granične vrednosti za srednju godišnju koncentraciju azot dioksida od 40 µg/m³. Kako na formiranje i rasprostiranje azot dioksida u ambijentalnom vazduhu utiču mnogi faktori, od kojih se na neke ne može uticati, u narednim godinama akcenat treba staviti na kontrolu i smanjenje emisija azot dioksida iz industrijskih postrojenja i iz saobraćaja, odnosno na primeni savremenih tehnologija kojima se ove emisije svode na minimum.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2024. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-66/2024-03/ 200052.

Ovaj rad je finansijski podržan od strane programa Horizon Europe Research and Innovation program u okviru ugovora o grantu br.101060170 - WeBaSOOP, "Research Reinforcing in the Western Balkans' in Offline and Online Monitoring and Source Identification of Atmospheric Particles."

LITERATURA

- [1] D. Knežević, D. Nišić, A. Cvjetić, D. Ranđelović, Monitoring u životnoj sredini - Odabrana poglavlja, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Urednik: Aleksandar Ganić, 2015, ISBN: 978-86-7352-288-3
- [2] <http://www.sepa.gov.rs/index.php?menu=300&id=20028&akcija=showAll> (pristupljeno 28.01.2024.)
- [3] <http://data.sepa.gov.rs/> (pristupljeno 28.01.2024.)
- [4] V. Tasić, T. Apostolovski-Trujić, B. Radović, R. Kovačević, N. Ristić, T. Urošević, V. Kamenović, Merenje kvaliteta vazduha u aglomeraciji Bor u 2022. godini u periodu rekonstrukcije topionice bakra u Boru, Bakar, Vol.48, 1 (2023) 53-62.
- [5] <http://www.sepa.gov.rs/index.php?menu=5000&id=1304&akcija=showDocuments&tema=Vazduh> (pristupljeno 28.01.2024.)