

UDK: (045)=163.41

NAUČNI RAD

Oblast: Zaštita životne sredine

Primljen: 13.12.2021.

Prerađen: 20.12.2021.

Prihvaćen: 23.12.2021.

**ANALIZA REZULTATA MERENJA ČESTICA PM₁₀ NA
TERITORIJI GRADA BORA ZA PERIOD 2020.-2021.**

**ANALYSIS OF THE RESULTS OF MEASUREMENT OF
PM₁₀ ON THE TERRITORY OF THE CITY OF
BOR FOR THE PERIOD 2020-2021**

Nevena Ristić, Aleksandar Simonovski, Viša Tasić,
Tatjana Apostolovski-Trujić

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Bor,
E-mail: nevena.ristic@irmbor.co.rs

Izvod

Zbog činjenice da su rudnici sa površinskim otkopavanjem rude bakra u neposrednoj blizini grada Bora, kao i da se topionica bakra nalazi na samo par stotina metara od starog centra grada, kvalitet vazduha je najvažniji ekološki problem u gradu i okolnim naseljima. U toku 2020. i 2021. godine prema Programu lokalnog monitoringa kvaliteta vazduha vršena su merenja koncentracija suspendovanih čestica PM₁₀ na četiri mesta u gradu i prigradskim naseljima i analiziran je sadržaj Pb, Cd, Ni i As u uzorcima PM₁₀ na dnevnom nivou. U ovom radu odvojeno su analizirani rezultati merenja za period grejne i negrejne sezone. Ustanovljeno je da su na svim posmatranim mernim mestima (MM) osim na mernom mestu Jugopetrol koncentracije čestica PM₁₀ u periodu grejne sezone više u odnosu na period negrejne sezone. Na svim MM osim na MM Krivelj broj dana sa prekoračenjima dnevne granične vrednosti za koncentracije PM₁₀ bio je veći od maksimalno dozvoljenog broja od 35 dana godišnje. Na svim MM prekoračena je godišnja granična vredost za koncentraciju As u PM₁₀. Dobijeni rezultati ukazuju na to da problem zagađenja vazduha sadržajem As u PM₁₀ i dalje postoji i da hitno treba preduzeti mere za njegovo rešavanje u cilju zaštite zdravlja ljudi.

Ključne reči: merenje, suspendovane čestice, kvalitet vazduha, topionica bakra, arsen

Abstract

Due to the fact that the mines with surface mining of copper ore are in the immediate vicinity of the town of Bor, and that the copper smelter is only a few hundred meters from the old city center, air quality is the most important environmental problem in the town and surrounding settlements. During 2020 and 2021, according to the Local Air Quality Monitoring Program, concentrations of suspended PM₁₀ particles were measured at four places in the city and suburbs and the content of Pb, Cd, Ni, and As in PM₁₀ samples on a daily basis was analyzed. In this paper, the measurement results for the heating and non - heating seasons are analyzed. It was found that at all observed measuring points (MP) except at the MP Jugopetrol, the concentrations of PM₁₀ particles in the heating season were higher than in the non-heating season. On all MPs except MP Krivelj, the number of days exceeding the daily limit value for PM₁₀ concentrations was higher than the maximum

allowed number of 35 days per year. The annual limit value for the concentration of As in PM₁₀ was exceeded on all MPs. The obtained results indicate that the problem of air pollution with As content in PM₁₀ still exists and that urgent measures should be taken to solve it in order to protect human health.

Keywords: measurement, suspended particles, air quality, copper smelter, arsenic

1. UVOD

Proizvodnja bakra u Boru počela je 1903. godine jamskom eksploatacijom rude, a površinska eksploatacija počinje od 1912. godine otvaranjem površinskog kopa Bor, gde se ruda bakra eksploatisala sve do 1986. godine. Kasnije su otvorena još dva površinska kopa u blizini, Veliki Krivelj 1979. godine i Cerovo 1990. godine.

Količina suspendovanih čestica koja se emituje iz metalurških pogona topionice bakra i sa površinskih kopova i rudničkih i flotacijskih jalovišta zavisi od mnogo faktora, kao što su: izbor tehnološkog postupka prerade rude bakra, sastav ulazne sirovine, temperatura i vreme trajanja procesa, vrsta rudarskih radova, tip i količina angažovane rudarske opreme, meteorološki parametri i slično. Pri svim tehnološkim postupcima koji se primenjuju pri preradi rude bakra oslobađaju se toksične i kancerogene materije kao što su As, Pb, Zn, Bi i Sb [1].

Prosečan sadržaj arsena u koncentratu bakra koji se preradivao u staroj topionici u Boru (do 2015. godine) iznosio je između 0.05 i 0.15%. Pre samog procesa topljenja, uglavnom se meša više vrsta koncentrata i topitelja (kvarc i krečnjak) tako da finalni sadržaj arsena u nastaloj šarži ne bude veći od 0.5%. Imajući u vidu da je u staru borsku topionicu dnevno na preradu dopremeno od 1500 do 1800 t koncentrata, ovaj sadržaj arsena je i te kako značajan [2].

Vlada Srbije uložila je značajna sredstva u izgradnju nove topionice bakra i fabriku sumporne kiseline u Boru, koja je počela sa radom 2016. godine. Nova topionica bakra koristi flash-smelting tehnologiju [3], pa su od tada i emisije otpadnih gasova iz metalurških pogona drugačijeg intenziteta i sastava. Modernizacijom topionice trebalo bi da se drastično smanje emisije SO₂, PM i drugih zagađujućih materija koje čine tokove otpadnog gasa iz topionice.

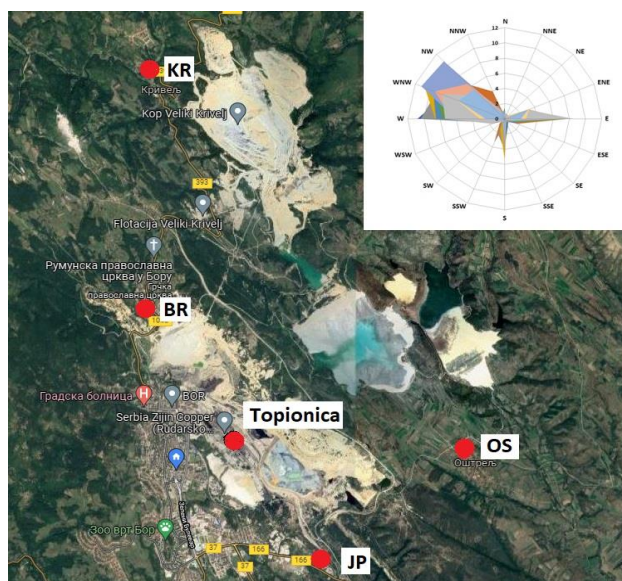
Cilj ovog rada je da se utvrdi postoje li sezonske promene koncentracija PM₁₀ i sadržaja Pb, Cd, Ni i As u PM₁₀ i koliko su značajne razlike kada se odvojeno posmatraju rezultati u sezoni grejanja i negrejnoj sezoni.

2. MERNA MESTA I METOD MERENJA

U toku 2020. i 2021. godine prema Programu lokalnog monitoringa kvaliteta vazduha grada Bora vršena su merenja koncentracija suspendovanih čestica PM₁₀ na četiri merna mesta (MM) na teritoriji grada (Krivelj, Brezonik, Jugopetrol i Oštrelj). Iz 24h uzoraka PM₁₀ sa navedenih MM određivan je i

sadržaj Pb, Cd, Ni i As. Položaj ovih MM u odnosu na topionicu bakra u Boru prikazan je na slici 1. U ovom radu su analizirani rezultati merenja (slika 1) u periodu od 15. oktobra 2020. godine do 15. oktobra 2021. godine.

MM KR nalazi se u naselju Krivelj, na oko 6 km severno od topionice bakra. Položaj ovog MM je niz vetar u odnosu na topionicu bakra kada duvaju vetrovi iz pravaca jug. U blizini ovog mernog mesta je površinski kop Veliki Krivelj. MM BR nalazi se u centru naselja Brezonik, na oko 2.5 km severozapadno od topionice bakra. Položaj ovog MM je niz vetar u odnosu na topionicu bakra kada duvaju vetrovi iz pravaca jug-jugoistok. U blizini ovog mernog mesta je stari površinski kop Bor u kojem se odlaže rudnička jalovina sa površinskog kopa Veliki Krivelj. MM JP nalazi se na oko 3 km jugoistočno od topionice bakra. Položaj ovog MM je niz vetar u odnosu na topionicu bakra kada duvaju vetrovi iz pravaca sever-severozapad. U blizini ovog mernog mesta (1 km severoistočno) je gradska deponija. MM OS se nalazi u centru sela Oštrelj oko 4 km na istok od topionice bakra. Ovo MM je locirano niz vetar u odnosu na topionicu bakra kada duvaju vetrovi iz pravaca zapad.



Sl. 1. Položaj mernih mesta u odnosu na topionicu bakra u Boru
(KR - Krivelj, BR - Brezonik, JP - Jugopetrol, OS - Oštrelj)

Uzorkovanje suspendovanih čestica frakcije PM₁₀ [4-7] vršeno je referentnim uzorkivačima Sven/Leckel LVS3 [8] i LIFETEC [9]. Pre i posle uzorkovanja merena je masa filtera saglasno proceduri propisanoj standardom

SRPS EN12341:2015 [10]. Na osnovu razlike masa eksponiranih i neeksponiranih filtera i poznatog protoka vazduha kroz uzorkivač sračunate su masene koncentracije suspendovanih čestica frakcije PM_{10} .

Koncentracije As, Pb, Cd, i Ni su određene primenom Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry - ICP MS (Agilent model 7700). Granice detekcije za As, Pb, Cd, i Ni koji su određeni ICP MS metodom su 0.1, 0.5, 0.02, i 0.7 ng/m^3 , respektivno. U cilju kontrole kvaliteta i verifikacije primenjenih procedura za mikrotalasno rastvaranje i analizu elemenata u tragovima, korišćen je sertifikovani referentni materijal Urban Particulate Matter Certified Reference Material 1648a (National Institute of Standard and Technology, MD, USA). Rezultati analize sertifikovanog referentnog materijala bili su u opsegu od 80 do 110% referentnih koncentracija za sve merene elemente.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Prosečne dnevne koncentracije suspendovanih čestica PM_{10} u toku negrejne sezone (april-septembar) i grejene sezone (oktobar-mart) prikazane su u tabeli 1. Prikaz koncentracija suspendovanih čestica PM_{10} tokom negrejne sezone prikazane su na slici 2, a tokom grejne sezone na slici 3.

Na osnovu podataka iz tabele 1 može se zaključiti da su koncentracije suspendovanih čestica PM_{10} na svim MM osim na MM JP bile više u toku grejne sezone u odnosu na one izmerene u negrejnoj sezoni. Sva MM osim MM JP su u neposrednoj blizini objekata za stanovanje tako da su lokalni izvori zagrevanja ovih objekata jednim delom doprineli povećanju koncentracija suspendovanih čestica PM_{10} u toku grejne sezone.

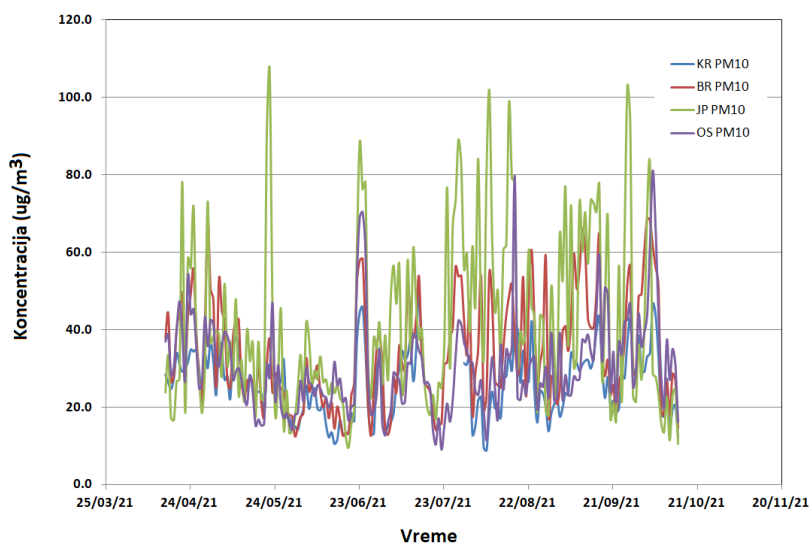
Tabela 1. Koncentracije PM_{10} ($\mu g/m^3$) izmerene u negrejnoj i grejnoj sezoni (GV- granična vrednost, NGS - negrejna sezona, GS - Grejna sezona)

Negrejna (NGS)	KR PM_{10}	BR PM_{10}	JP PM_{10}	OS PM_{10}
Srednja vrednost	26.2	34.2	41.6	30.4
Dnevna GV	50.0	50.0	50.0	50.0
Broj dana iznad GV	1	32	55	11
Grejna (GS)	KR PM_{10}	BR PM_{10}	JP PM_{10}	OS PM_{10}
Srednja vrednost	28.3	44.4	34.3	41.1
Dnevna GV	50.0	50.0	50.0	50.0
Broj dana iznad GV	10	58	34	49
Odnos PM_{10} NGS/GS	0.93	0.77	1.21	0.74

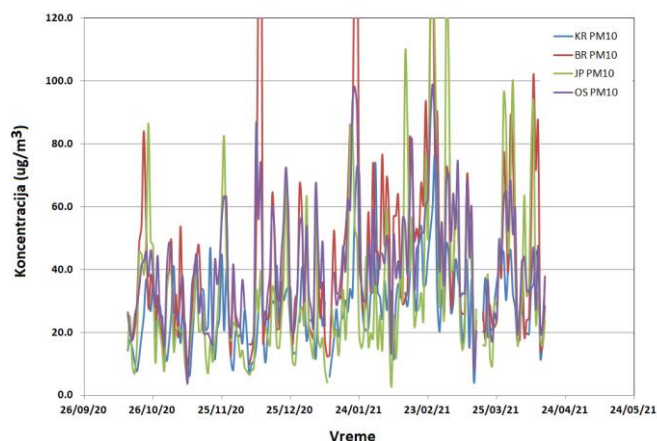
Takođe, MM JP je na dominantnom pravcu N (severnih) i NW (severozapadnih) vetrova koji nose zagađujuće materije iz metalurških postrojenja topionice bakra. Vetrovi iz pravaca N (sever), NNW (sever-severozapad) i NW (severozapad) su sa najvećom čestinom tokom zimskog perioda, pa je i to značajan razlog za povećanje koncentracija suspendovanih čestica PM₁₀ na MM JP tokom grejne sezone. Na svim MM osim na MM KR postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti koncentracija PM₁₀ izmerenih tokom grejne i negrejne sezone ($p < 0.01$, $n=180$).

Slična konstatacija važi i kada se posmatra broj dana u kojima je dolazilo do prekoračenja GV propisane za srednje dnevne koncentracije suspendovanih čestica PM₁₀ (50 µg/m³). U toku grejne sezone na svim MM osim na MM JP broj dana sa prekoračenjem GV je veći u odnosu na broj dana sa prekoračenjem GV u negrejnoj sezoni.

Kada se sabere broj dana sa prekoračenjem GV u grejnoj i negrejnoj sezoni najveći broj prekoračenja GV zabeležen je na MM BR čak 90 dana od 365 (25%), zatim na MM JP 89 dana, na MM OS 60 i na MM KR 11 dana. Samo je na MM KR broj dana sa prekoračenjem dnevne GV bio ispod dozvoljenog broja od 35 dana godišnje [11]. Na svim MM je srednje godišnja koncentracija suspendovanih čestica PM₁₀ u posmatranom periodu bila ispod GV za srednje godišnje koncentracije (40 µg/m³) [11].



Sl. 2. Prikaz koncentracija suspendovanih čestica PM₁₀ tokom negrejne sezone



Sl. 3. Prikaz koncentracija suspendovanih čestica PM_{10} tokom grejne sezone

Prosečne dnevne koncentracije Pb u PM_{10} u toku negrejne sezone i grejne sezone prikazane su u tabeli 2. Na osnovu podataka iz tabele 2 može se zaključiti da su koncentracije Pb u PM_{10} na svim MM bile neznatno više u toku grejne sezone u odnosu na one izmerene u negrejnoj sezoni. Pošto su glavni izvori emisije Pb tačkasti i površinski izvori u topionici bakra, usled prerade koncentrata bakra sa značajnim sadržajem Pb dolazi do epizodnog zagađenja vazduha sa Pb u PM_{10} u danima kada se takvi koncentri prerađuju u topionici. Kao posledica toga na MM JP broj dana sa prekoračnjem dnevne koncentracije Pb u PM_{10} iznosi 19 u negrejnoj i 21 dan u grejnoj sezoni. Na ostalim MM nije bilo prekoračenja dnevnih GV za Pb u PM_{10} osim na MM BR i to 1 dan u grejnoj sezoni. Na svim MM osim na MM KR ne postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti koncentracija Pb u PM_{10} izmerenih tokom grejne i negrejne sezone ($p > 0.05$, $n=180$).

Tabela 2. Koncentracije Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) izmerene u negrejnoj i grejnoj sezoni (GV- granična vrednost, NGS - negrejna sezona, GS - Grejna sezona)

Negrejna (NGS)	KR Pb	BR Pb	JP Pb	OS Pb
Srednja vrednost	0.013	0.075	0.366	0.048
Dnevna GV	1.000	1.000	1.000	1.000
Broj dana iznad GV	0	0	19	0
Grejna (GS)	KR Pb	BR Pb	JP Pb	OS Pb
Srednja vrednost	0.023	0.086	0.387	0.048
Dnevna GV	1.000	1.000	1.000	1.000
Broj dana iznad GV	0	1	21	0
Odnos Pb NGS/GS	0.58	0.87	0.95	0.99

Tabela 3. Koncentracije Cd (ng/m³) izmerene u negrejnoj i grejnoj sezoni
(GV- granična vrednost, NGS - negrejna sezona, GS - Grejna sezona)

Negrejna (NGS)	KR Cd	BR Cd	JP Cd	OS Cd
Srednja vrednost	0.3	1.7	7.4	1.1
Godišnja GV	5.0	5.0	5.0	5.0
Grejna (GS)	KR Cd	BR Cd	JP Cd	OS Cd
Srednja vrednost	0.6	2.1	6.0	1.1
Godišnja GV	5.0	5.0	5.0	5.0
Odnos NGS/GS	0.53	0.81	1.24	1.00

Prosečne dnevne koncentracije Cd u PM₁₀ u toku negrejne sezone i grejne sezone prikazane su u tabeli 3. Na osnovu podataka iz tabele 3 može se zaključiti da su koncentracije Cd u PM₁₀ na MM JP bile više u toku negrejne sezone u odnosu na one izmerene u grejnoj sezoni. Pošto su glavni izvori emisije Cd tačkasti i površinski izvori u topionici bakra, usled prerade koncentrata bakra sa značajnim sadržajem Cd dolazi do epizodnog zagađenja vazduha Cd u PM₁₀ u danima kada se takvi koncentracije prerađuju u topionici. Kao posledica toga na MM JP, koje je na dominantnom pravcu vetra sa najvećom čestinom koji nose zagađenje iz topionice bakra, prekoračena je godišnja GV za koncentraciju Cd u PM₁₀, tokom celog perioda posmatranja. Na ostalim MM nije bilo prekoračenja godišnje GV za koncentraciju Cd u PM₁₀. Na svim MM osim na MM KR ne postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti koncentracija Cd u PM₁₀ izmerenih tokom grejne i negrejne sezone ($p > 0.05$, $n=180$).

Tabela 4. Koncentracije Ni (ng/m³) izmerene u negrejnoj i grejnoj sezoni
(GV- granična vrednost, NGS - negrejna sezona, GS - Grejna sezona)

Negrejna (NGS)	KR Ni	BR Ni	JP Ni	OS Ni
Srednja vrednost	6.60	12.45	15.41	10.30
Godišnja GV	20	20	20	20
Grejna (GS)	KR Ni	BR Ni	JP Ni	OS Ni
Srednja vrednost	4.44	6.07	13.79	5.69
Godišnja GV	20	20	20	20
Odnos NGS/GS	1.49	2.05	1.12	1.81

Prosečne dnevne koncentracije Ni u PM_{10} u toku negrejne sezone i grejene sezone prikazane su u tabeli 4. Na osnovu podataka iz tabele 4 može se zaključiti da su koncentracije Ni u PM_{10} na svim MM bile više u toku negrejne sezone u odnosu na one izmerene u grejnoj sezoni. Kako Ni u PM_{10} česticama potiče uglavnom iz zemljine kore, a ne od antropogenih aktivnosti, više koncentracije Ni u negrejnoj sezoni posledica su stabilnijeg vremena sa nižom prosečnom brzinom vetra. Nije bilo prekoračenja godišnje GV za koncentraciju Ni u PM_{10} ni na jednom od posmatranih MM. Na svim MM osim na MM JP postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti koncentracija Ni u PM_{10} izmerenih tokom grejne i negrejne sezone ($p < 0.01$, $n=180$).

Tabela 5. Koncentracije As (ng/m^3) izmerene u negrejnoj i grejnoj sezoni
(GV- granična vrednost, NGS - negrejna sezona, GS - Grejna sezona)

Negrejna (NGS)	KR As	BR As	JP As	OS As
Srednja vrednost	3.9	27.9	144.6	17.7
Godišnja GV	6	6	6	6
Grejna (GS)	KR As	BR As	JP As	OS As
Srednja vrednost	7.6	37.4	130.3	18.2
Godišnja GV	6	6	6	6
Odnos NGS/GS	0.51	0.75	1.11	0.97

Prosečne dnevne koncentracije As u PM_{10} u toku negrejne sezone i grejene sezone prikazane su u tabeli 5. Na osnovu podataka iz tabele 5 može se zaključiti da su koncentracije As u PM_{10} na svim MM bile više u toku grejne sezone u odnosu na one izmerene u negrejnoj sezoni izuzev na MM JP. Pošto su glavni izvori emisije As tačkasti i površinski izvori u topionici bakra, usled prerade koncentrata bakra sa značajnim sadržajem As dolazi do epizodnog zagađenja vazduha As u PM_{10} u danima kada se takvi koncentracije prerađuju u topionici. Kao posledica toga na MM JP, koje je na dominantnom pravcu vetra sa najvećom čestinom koji nose zagađenje iz topionice bakra, srednja godišnja koncentracija As u PM_{10} bila je 20 puta više od godišnje GV. Na svim MM prekoračena je godišnja GV za koncentraciju As u PM_{10} . Na svim MM osim na MM KR ne postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti koncentracija As u PM_{10} izmerenih tokom grejne i negrejne sezone ($p > 0.05$, $n=180$).

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja koncentracija suspendovanih čestica frakcije PM₁₀ u toku 2020. i 2021. godine koja su vršena prema Programu lokalnog monitoringa kvaliteta vazduha grada Bora na četiri MM na teritoriji grada Bora. Na svim MM je srednje godišnja koncentracija čestica PM₁₀ bila ispod GV za srednje godišnje koncentracije. Na svim MM izuzev MM KR broj dana sa prekoračenjem dnevne GV za koncentracije PM₁₀ bio je ispod dozvoljenog broja od 35 dana godišnje. Na svim MM osim na MM KR postoji statistički značajna razlika između srednjih vrednosti koncentracija PM₁₀ izmerenih tokom grejne i negrejne sezone ($p < 0.01$, $n = 180$). Pošto su prosečne brzine vetra tokom grejne i negrejne sezone bile približno jednake, povećanje koncentracija PM₁₀ u toku grejne sezone posledica je lokalnih izvora za grejanje objekata za stanovanje u blizini MM, izuzev na MM JP na kome su zbog veće čestine vetra iz pravaca NW i NNW zabeležene niže koncentracije PM₁₀ u periodu grejne sezone. Na svim MM prekoračena je godišnja GV za koncentraciju As u PM₁₀ što je posledica prerade koncentrata bakra sa povećanim sadržajem As u topionici bakra. Dobijeni rezultati ukazuju na to da problem zagađenja vazduha sadržajem As u PM₁₀ koji je na MM JP i preko 20 puta viši od godišnje granične vrednosti i dalje postoji i da hitno treba preduzeti mere za njegovo rešavanje u cilju zaštite zdravlja ljudi.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2021. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-9/2021-14/200052.

LITERATURA

- [1] D. Jovanović, Prospekcija i analiza eko stanja grada Bora i okoline sa posebnim osvrtom na aerozagađenje, Magistarska teza, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2001.
- [2] J. Marinković, Prilog teorijskom i eksperimentalnom proučavanju ponašanja arsenovih jedinjenja u procesu prženja koncentrata bakra, Magistarska teza, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1992.

-
- [3] I. V. Kojo, H. Storch, Copper Production with Outokumpu Flash Smelting: An Update, Sohn International Symposium Advanced Processing of Metals and Materials Volume 8 - International Symposium on Sulfide Smelting 2006; Edited by F. Kongoli and R.G. Reddy TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2006.
 - [4] V. Tasić, R. Kovačević, M. Jovašević Stojanović, T. Apostolovski Trujić, M. Šteharik, S. Stanković, Analiza suspendovanih čestica (PM10) u gimnaziji „Bora Stanković“ u Boru, Bakar, Vol.40, 1 (2015) 63-74.
 - [5] V. Tasić, M. Cocić, B. Radović, A. Božilov, T. Apostolovski-Trujić, Procena uticaja spoljašnjeg zagađenja suspendovanim česticama na kvalitet unutrašnjeg vazduha na Tehničkom fakultetu u Boru, Bakar, Vol. 45, 2 (2020) 19-28.
 - [6] V. Tasić, T. Apostolovski-Trujić, R. Kovačević, M. Jovašević-Stojanović, Measuring the concentration of suspended particles (PM10) in the indoor environment using the automatic monitors, Mining and Metallurgy Engineering Bor, 4 (2015) 123-128.
 - [7] V. Marjanović, A. Ivanović, V. Cvetković Stamenković, Soot participation in total air pollution in the municipality of Bor with statistical data processing, Mining and Metallurgy Engineering Bor, 3 (2014) 61-72.
 - [8] <https://www.environmental-expert.com/products/leckel-model-lvs3-mvs6-small-filter-device-634768> (pristupljeno 05.11.2021.)
 - [9] <https://www.glotechwll.com/AJR114DOWN/download-file/LIFETEK-PMS.pdf> (pristupljeno 05.11.2021.)
 - [10] SRPS EN 12341:2015 Vazduh ambijenta - Standardna gravimetrijska metoda merenja za određivanje PM10 ili PM2.5 masene koncentracije suspendovanih čestica
https://iss.rs/sr_Cyrl/publication/show/iss:pub:50728 (pristupljeno 05.11.2021.)
 - [11] Uredba o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha („Sl.glasnik RS“, br. 11/2010, 75/2010 i 63/2013).