

UDK 504.5:669.018.674(497.11)"2023"
COBISS.SR-ID 203013641

PROCENA ZDRAVSTVENOG RIZIKA STANOVNIKA GRADA BORA (SRBIJA) USLED POVEĆANJA KAPACITETA TOPIONICE BAKRA

Živan Živković

UNIVERZITET U BEOGRADU, TEHNIČKI FAKULTET U BORU, SRBIJA

Sažetak: U ovoj studiji prikazani su rezultati istraživanja povećanog rizika od nekancerogene ugroženosti zdravlja dece i odraslih kao i kancerogenog rizika kod građana grada Bora (Srbija), usled povećanja kapaciteta topionice bakra u Boru za 2,5 puta sredinom 2023. godine i eksploatacije rudnika "Čukaru Peki" sa povećanim sadržajem arsena (As) višestruko iznad limitiranih vrednosti. Posle stabilizacije stanja u novoj topionici, urađena je analiza stanja kvaliteta ambijentalnog vazduha u urbanom delu grada Bora za 2024. godinu, kao i njegov uticaj na rizik od nekancerogenih i kancerogenog uticaja na ljudsko zdravlje. Dobijeni rezultati za koeficijent opasnosti (Hazard Quotient - HQ) <1 ukazuju da je nekancerogeni rizik prihvatljiv. Rezultati za kancerogeni rizik (CR) = 5,58 E-4 za izmerene maksimalne vrednosti sadržaja polutanata u ambijentalnom vazduhu za 2024. godinu, ukazuju da se radi o visoko neprihvatljivom kancerogenom riziku. Za srednje vrednosti kvaliteta vazduha za 2024. godinu, CR = 1,24E-4 što daje ocenu blago neprihvatljiv rizik. Dobijeni rezultati ukazuju da predominantan uticaj na vrednosti CR imaju As i kadmijum (Cd), a nikel (Ni) ima zanemarljiv uticaj. Uticaj olova (Pb) zahteva posebnu analizu po metodologiji Integrirani biokinetički model izloženosti i unosa (Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model - IEUBK).

Ključne reči: air pollution, PM₁₀, Pb, Cd, Ni, As, procena rizika, rak

UVOD

Zagađenje ambijentalnog vazduha u industrijski razvijenim regijama svuda u Svetu predstavlja ozbiljne rizike za zdravlje ljudi [1], što je slučaj i u Srbiji posebno u rudarskim regijama [2]. Mnoge studije ukazuju da koncentracija suspendovanih čestica (particulate mater - PM) imaju glavnu ulogu u zagađivanju vazduha, pre svega zbog njihovog hemijskog sastava, koje u aerodinamičkim uslovima variraju u granicama dijametra 2,5 i 10 µm. PM čestice su označene kao uticajne na ljudsko zdravlje u toku dužeg vremena izloženosti visokim koncentracijama, koju Svetska zdravstvena organizacija (World Health Organization (WHO)) 2019. godine limitira na 20 µg/m³ [3]. Standard kvaliteta vazduha u Evropskoj uniji (EU), koji Evropska agencija za životnu sredinu (European Environment Agency - (EEA)) definiše godišnje limitirane vrednosti za PM₁₀ na 40 µg/m³ kao i sadržaj teških metala u njima: Pb (0,5 µg/m³), As (6 ng/m³), Cd (5 ng/m³) i Ni (20 ng/m³) [4]. Zakonska regulativa u Srbiji je ista kao u EU [5]. Potrebno je istaći činjenicu da je Evropska agencija za životnu sredinu (EEA) 2024. godine donela nove granične vrednosti do 2030. godine kao i ciljne vrednosti do 2050. godine gde se

vrednost za PM₁₀ smanjuje za 50%, a vrednosti za Pb, Cd, Ni i As ostaju na istim graničnim vrednostima [6,7].

Prema izveštaju Međunarodne agencije za istraživanje raka [International Agency for Research on Cancer (IARC)] Cd ozbiljno utiče na zdravlje dece i ljudi, koji spada u grupu 1 kancerogenih metala. Cd izaziva rak pluća i bubrega s obzirom da ulazi u krvotok. Kod dece, povećava infekcije disajnih organa, smanjuje kognitivne sposobnosti, a kod odraslih izaziva hipertenziju, hroničnu insuficijenciju bubrega i rak pluća [8]. Olovo (Pb) koji se takođe nalazi u PM₁₀ česticama, kumulativno se taloži u krvotok i teško se izlučuje iz organizma. Kod dece izaziva poremećaje kod učenja, pamćenja, izaziva trajna oštećenja mozga i smanjenje količnika inteligencije (IQ). Kod odraslih izaziva kardiovaskularne probleme, bubrežnu insuficijenciju, osteoporozu [9]. Nikel (Ni) se taloži u plućima i krvotoku. IARC klasifikuje Ni i njegova jedinjenja u grupu 1 kancerogenih elemenata. Ni je povezan sa kancerom pluća, grkljana i nosne šupljine, kao i oštećenja DNK [10]. Arsen (As) je takođe svrstan od IARC u grupu 1 kancerogenih supstanci, a WHO naglašava da nema bezbednog nivoa As u ambijentalnom vazduhu [39]. Kod dece izaziva

bronhitis, infekcije disajnih puteva, a u kombinaciji sa Ni negativno utiče na razvoj nervnog sistema i kognitivnih mogućnosti kao i kancera u zreloom dobu. Kod odraslih negativno utiče na kardiovaskularni sistem, izaziva najčešće kancer pluća, bešike i jetre [11,12].

ZNAČAJ I CILJ STUDIJE

Studija se sprovodi da bi bio dat odgovor o nivou rizika sa udisanjem zagađenog vazduha, posle povećanja kapaciteta topionice bakra u Boru (Srbija) sredinom 2023. godine za 2,5 puta [5 sa stanovišta izloženosti PM₁₀ česticama koje sadrže teške metale (Pb, Cd Ni i As).

Korišćene su informacije Instituta za Rudarstvo i metalurgiju u Boru (Srbija) koji su dostupni na sajtu administracije Grada Bora [13].

U ovoj studiji izabrane su čestice PM₁₀ umesto PM_{2,5} iz sledećih razloga [12]:

- PM₁₀ čestice su verifikovani zagađivač štetan po zdravlje ljudi. Nove smernice o kvalitetu vazduha WHO iz 2021. godine daju preporuke za šest zagađivača od kojih je jedna PM₁₀ koja značajno utiče na zdravlje ljudi nezavisno od PM_{2,5}[39],
- Iako PM_{2,5} prodiru u pluća lakše od PM₁₀, uticaj izloženosti česticama na ljudsko zdravlje zavisi od njihovog hemijskog sastava, a ne samo od njihove veličine.
- Takođe, treba naglasiti da PM₁₀ čestice odgovaraju česticama sa manjim aerodinamičkim prečnikom od 10µm, gde su i PM_{2,5} uključene [14, 15].

Osnovni cilj ove studije jeste analiza prostorne i vremenske varijacije teških metala (As, Cd, Pb i Ni) i procenu koeficijenta opasnosti [Hazard Quotient (HQ)] i kancerogeni rizik (Cancer Risk (CR)) kod dece i kod odraslih koji koriste različite puteve unosa polutanata u organizam: udisanje, gutanje i dermalna apsorpcija [1].

Za analizu postavljenih ciljeva korišćeni su raspoloživi podaci sa mernih stanica koje su bile u funkciji na teritoriji urbanog dela grada Bora (Srbija) u periodu posle uvećanja kapaciteta topionice bakra u Boru za 2,5 puta [5]. Analizirani su godišnji rezultati za 2024. godinu kada se proizvodnja u topionici bakra stabilizovala, što ukazuje da se u narednom periodu može očekivati isti kvalitet ambijentalnog vazduha. Ostvarena prekoračenja koncentracije teških metala u razmatranoj 2024.

godini u PM₁₀ česticama ukazuju na uvećani rizik od kancera kako kod dece tako i kod odraslih ljudi [1,16,17], što ukazuje na opravdanost istraživanja čiji se rezultati prezentiraju u ovome radu.

Problemi aerozagađenja ambijentalnog vazduha u Boru, naročito nakon povećanja kapaciteta topionice za 2,5 puta, ne predstavljaju rizik po zdravlje ljudi samo na području ove aglomeracije, već mogu imati potencijalne prekogranične posledice, imajući u vidu da je vazдушna udaljenost do granice sa Bugarskom oko 20 km, a do Rumunije, države članice Evropske unije, oko 80 km. Navedene okolnosti ukazuju na potrebu za pojačanim monitoringom kvaliteta ambijentalnog vazduha i doslednim praćenjem usklađenosti sa standardima Evropske unije u ovoj oblasti, što dodatno potvrđuje relevantnost sprovedene studije.

MATERIJAL I METODE ISTRAŽIVANJA

Kvalitet ambijentalnog vazduha u aglomeraciji Bora bio je problematičan pre svega zbog topionice bakra koja je počela sa radom početkom XX veka. Problematične su bile epizode ekstremno visokih koncentracija sumpor-dioksida SO₂[18] sve do izgradnje nove topionice 2015. godine kada je koncentracija SO₂ svedena u prihvatljive granice [5]. Pored sadržaja SO₂ u ambijentalnom vazduhu, problematična je uvek bila i koncentracija PM₁₀ čestica, sa povećanim sadržajem teških metala a pre svega Pb, Cd, Ni i As [19] u vazduhu ali i u zemlji u široj okolini topionice [20]. Kontaminacija vazduha teškim metalima sadržanih u PM₁₀: As, Cd, Pb, Ni koja se kontinuirano meri, i dalje predstavljaju problem za građane Bora [16], a posebno posle 2023. [5]. Sredinom 2023. godine inostrani vlasnik topionice bakra u Boru, izvršio je rekonstrukciju iste i uvećao kapacitet topionice za 2,5 puta u odnosu na prethodno stanje, što predstavlja veliki izazov za kvalitet ambijentalnog vazduha u Boru. Rekonstruisana topionica je po tehnologiji Peći za fleš topljenje i konvertovanje (Flash Smelting and Converting Furnaces) [21], u kojoj se ostvaruju temperature do 1300°C. Nepoželjni teški metali u takvim uslovima Pb, Cd, Ni i As, tope se na: 327°C, 321°C, 1455°C i 614°C, respektivno, pri čemu As na toj temperaturi sublimira. Cd, Pb i Ni ključaju na sledećim temperaturama: 767°C, 1749°C i 2913°C respektivno, što ukazuje da se As i Cd u toku procesa prevode u gasovito stanje, pa se u toku

hlađenja pretvaraju u sitne čestice koje su u obliku oksida nalaze u ambijentalnom vazduhu [21], a u sadržaju Pb i Ni delom ulaze sadržaji iz prašine iz koncentrata bakra i rudarske proizvodnje.

Problem kvaliteta ambijentalnog vazduha i negativni uticaji na zdravlje ljudi se uvećava otvaranjem novog rudnika bakra "Čukaru Peki" sa sadržajem bakra u rudi od 2,71% Cu and 1,75 g/t Au, sa potpunim vlasništvom inostrane kompanije i rudnom rentom od samo 3% što je izuzetno atraktivno za ubrzanu eksploataciju. U dobijenom koncentratu bakra preradom ove rude sadržaj Cu se kreće u granicama 20–30 % Cu (što je optimalno za tehnološki proces topljenja) i iskorišćenje bakra u granicama 88–95%. Veliki problem se javlja zbog činjenice da su koncentracije As u koncentratu bakra u granicama 0,52–2,5%. [22]. **Koncentrat bakra sa ovako visokim sadržajem As prema zakonima EU i Srbije ne treba da se pretapaju u topionicama bakra**[5, 23]. Prema zakonu Republike Srbije gornja granica sadržaja As u koncentratu bakra je 0,2% As, koji se može tretirati u topionici bakra, što u realnim uslovima u topionici bakra u Boru iznosi više od deset puta. Međutim, topionica bakra i rudnik su u vlasništvu inostrane kompanije koja ne poštuje Zakone Srbije. Pored koncentrata bakra proizvedenog u Srbiji, ova kompanija uvozi koncentrate iz inostranstva, **a njihov hemijski sastav nije dostupan javnosti**. Takođe, koncentrat bakra iz Bora se izvozi preko luke u Baru (Crna Gora) gde se vrši pretovar koncentrata iz kamiona u brodove. Nedavno je utvrđen povećani sadržaj Pb u krvi ovih radnika. Dozvoljena granica Pb u krvi ljudi je od 2,8 µg/dL. Mnogo veće vrednosti utvrđene su kod 58 od 63 testiranih radnika koji su osetili vidljive zdravstvene probleme. Sadržaj Pb u krvi bio je u granicama 8,0–15,9 µg/dL a kod jednog radnika utvrđen je sadržaj od 25,1 µg/dL. U isto vreme, registrovano je povećanje sadržaja Pb u krvi i kod radnika u topionici bakra u Boru, koji su zatražili lekarsku pomoć [24]. Direktive EU su granične vrednosti sadržaja Pb u krvi radnika u pogonima sa povećanom koncentracijom Pb snizile sa 40-70 µg/dL na 15 µg/dL, što ukazuje da se posle uvećanje kapaciteta topionice bakra u Boru, monitoring kvaliteta vazduhu u topionici kao i u ambijentalnom vazduhu u gradu Bora mora biti uvećan.

Problem koncentracije PM₁₀ u ambijentalnom vazduhu u Boru kao i u radnoj

sredini topionice bakra, u velikoj meri povećava zabrinutost. Merenjem koncentracije ovih čestica u zatvorenoj učionici na Tehničkom Fakultetu u Boru u periodu 5-19. mart 2018. godine (zimski period kada su prozori i vrata učionice bili zatvoreni) utvrđena je koncentracija PM₁₀ čestica unutar učionice od 28,2 µg/m³ dok je koncentracija ovih čestica napolju bila 46,1 µg/m³. Koncentracija kancerogenih metala u njima iznosila je: As 17ng/m³, Cd 1,4ng/m³ i Pb 456,7ng/m³. U ovoj učionici boravi oko 20 studenata na nastavi 4–6 časova dnevno [25]. Takođe, u periodu 1. mart – 1. april 2025. vršeno je merenje koncentracije PM_{10i} i PM_{2.5} u 15 izabranih stanova u kojima žive ljudi. Merenjem je utvrđena srednja koncentracija u ambijentu apartmana PM_{10i} i PM_{2.5} 31,3µg/m³ i 17,6µg/m³, respektivno. Sadržaj teških metala nije određivan, ali dobijeni rezultati zaslužuju posebnu pažnju i opravdanu zabrinutost [26].

Pored kvaliteta ambijentalnog vazduha u gradu Boru, u toku više od stogodišnje tradicije proizvodnje bakra u topionici bakra, prisutna je kontinuirana kontaminacija zemljišta u okolini ove topionice. Istraživanja na 12 lokacija na teritoriji u široj okolini oko topionice bakra na oko 20 km su pokazala sledeće srednje rezultate sadržaja teških metala u zemljištu na dubini oko 30cm: 913,33 µg/kg, Cu, 86,67 µg/kg; Pb, 2,92 µg/kg; Cd, 36,83 µg/kg; Ni, 1070 µg/kg; Mn, 59,08 µg/kg; i Hg, 0,133 µg/kg [20]. Ovi rezultati ukazuju na distribuciju istaloženih teških metala u zemljištu koji mogu da se dalje distributuju kroz podzemne i površinske vode, biljke koje koristi stanovništvo za ishranu, što uvećava rizik za zdravlje ljudi. Ove činjenice zahtevaju posebnu studiju, a posebno na uticaj Pb na zdravlje ljudi primenom Integrisanog biokinetičkog modela izloženosti i unosa olova (Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model (IEUBK)), metodologije koju propisuje Agen ija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (US EPA) još 2007 [27].

U okolini topionice bakra u Boru vrši se kontinuirano merenje koncentracije SO₂, PM₁₀, sadržaj As, Pb, Cd i Ni u PM₁₀ česticama u ambijentalnom vazduhu što ima predominantan uticaj na zdravlje ljudi. Merenja se vrše na osam mernih mesta od 2024. godine, a mesečni i godišnji izveštaji Instituta za rudarstvo i metalurgiju u Boru objavljuju se na sajtu grada Bora [13].

REZULTATI RADA I DISKUSIJA

Zdravstveno stanje ljudi u gradu Boru (Srbija)

Državni Institut za Zaštitu zdravlja Srbije "Dr Milan Jovanović Batut" u Beogradu, za svaku godinu objavljuje rezultate o inicijaciji i

mortalitetu od kancera po regionima u Srbiji. U tabeli 1 prikazani su rezultati za period 2016-2022. godine za Borski region, uporedno sa rezultatima u region centralne Srbije i Srbiji u celini, sa aspekta novoobolelih i broja umrlih od kancera [28].

Tabela 1. Broj novo dijagnosticiranih slučajeva i broj umrlih od kancera u periodu 2016- 2022. [28]

Godina	Cela Srbija		Centralna Srbija		Borski okrug	
	A	B	A	B	A	B
2016	570	305	553	295	621	321
2017	587	306	570	300	657	324
2018	597	309	578	303	710	309
2019	609	307	585	300	739	295
2020	600	301	576	230	714	277
2021	611	292	595	285	730	264
2022	625	291	604	285	793	313

A: Broj novih slučajeva kancera na 100.000 stanovnika B: Broj umrlih od kancera 100.000 stanovnika

Rezultati prikazani u tabeli 1, ukazuju na 100.000 stanovnika vidljivo veći stepen novoobolelih i umrlih od kancera u razmatranom periodu u regiji Bora u odnosu na region Centralne Srbije kao i Srbije u celini. Povećanjem kapaciteta topionice bakra u Boru za 2,5 puta sredinom 2023. godine, kao i povećanog sadržaja kancerogenih metala u PM₁₀ treba očekivati u narednom periodu povećanje broja novoobolelih i umrlih od kancera.

Imajući u vidu da se podaci dati u Tabeli 1 odnose na Borski okrug, koji pored Bora

obuhvata i gradove Negotin, Kladovo i Majdanpek, gde je izloženost zagađenim vazduhom mnogo manja, a da grad Bor ima oko 35.000 stanovnika, realna procena je da je broj novoobolelih i umrlih od kancera u gradu Boru mnogo veći od brojki navedenih u tabeli 1.

Usled povećane smrtnosti i migracionih kretanja broj stanovnika se generalno u Srbiji smanjuje, ali ovo smanjenje u Boru je oko tri puta veće zbog povećane smrtnosti u ovome gradu u odnosu na ostatak Srbije, Tabela 2.

Tabela2. Smanjenje populacije u Srbiji u period 2016 – 2022. [28]

Period	Cela Srbija		Centralna Srbija		Borski okrug	
	Broj	%	Broj	%	Broj	%
2016-2022	411319	5,83	270192	5,22	15502	13,30

A: Broj stanovnika koji je smanjen B: Procenat(%) smanjenog broja stanovnika

Procena zdravstvenog rizika od direktnog udisanja teških metala u PM₁₀

Za procenu zdravstvenog rizika po zdravlje ljudi u gradu Boru od direktnog udisanja teških metala u PM₁₀ čestica u ambijentalnom vazduhu sa aspekta nekancerogenih i kancerogenih efekata vršena je po metodologiji US EPA [27] koja je

primenjivana u mnogim studijama[29, 12, 30,31,17].

Nekancerogeni efekti

Procenjeni dnevni unos (Estimated Daily Intake (EDI)) vršen je po metodologiji [29] :

$$EDI = (C \times IR \times AF \times F \times ED) / (BW \times AT) \quad (1)$$

$$AT = ED \times 365$$

Značenje pojedinačnih oznaka

Tabela 3. Oznake, nazivi i jedinice mera korišćene u jednačinama (1)-(5)

Oznaka	Engleski termin	SRPSKI TERMINPrevod	Jedinica
EDI	Estimated Daily Intake	procenjeni dnevni unos	µg/kg telesne mase/dan
C	Contaminant Concentration	koncentracija kontaminanta	µg/m ³
IR	Intake Rate	stopa unosa/udisanja	m ³ /dan
AF	Bioavailability Factor	faktor bioraspoloživosti	bez jedinice
F	Frequency of Exposure	učestalost izloženosti	dana/godina
ED	Exposure Duration	trajanje izloženosti	godina
BW	Body Weight	telesna masa	kg
AT	Averaging Time	vreme usrednjavanja	dana

Parametar za nekancerogeni rizik (HQ) predstavlja sumu svih hazarda za različite supstance [27], odnosno HQ koeficijent opasnosti predstavlja odnos između procenjene izloženosti doze i referentne doze RfD.

Odnosno: $HQ = EDI / RfD$ (2)
 gde RfD predstavlja referentnu dozu ($\mu\text{g/kg}$ telesne mase/dan).

Vrednosti za referentne doze RfD za različite supstance za procenu nekancerogenog rizika korišćene su iz referentnih baza [32,33].

Ako je :

$HQ < 1$ rizik prihvatljiv.

$HQ > 1$ mogući zdravstveni problemi.

Ukupni nekancerogeni rizik HQ određuje se po jednačini (3) PREMA inhalaciji većeg broja supstancu u isto vreme:

$\Sigma HQ = HQ_1 + HQ_2 + \dots + HQ_n$ (3)

gde 1–n predstavlja broj analiziranih zagađujućih materija u vazduhu.

Kancerogeni efekti

Kancerogeni rizik (CR) predstavlja doživotni rizik od raka. Procena je da će se kod osobe razviti rak tokom života usled izloženosti kancerogenim komponentama [27, 32,33, 34]:

$CR = EDI \times SF$ (4)

gde CR, EDI i SF predstavljaju redom, kancerogeni rizik (bezdimenziona veličina), procenjeni dnevni unos ($\mu\text{g/kg}$ telesne mase/dan) i inhalacioni faktor nagiba (SF) [$(\mu\text{g/kg}$ telesne mase/dan)⁻¹].

Vrednosti faktora nagiba (SF), korišćene za procenu kancerogenog rizika za različite

supstance, preuzete su iz relevantnih referentnih baza podataka [35, 32, 33]. Ukupni CR koristi se kao zbirni pokazatelj za sve kancerogene supstance, kao verovatnoća pojave raka usled izloženosti:

$\Sigma CR = CR_1 + CR_2 + \dots + CR_n$ (5)

Granice prihvatljivog rizika su:

CR: manje od 10^{-6} - zanemarljiv rizik; 10^{-6} - 10^{-4} - prihvatljiv rizik; $>10^{-4}$ - visok rizik.

Za uticaj Pb iz ambijetalnog vazduha na opšte zdravlje i kancerogeni uticaj, koristi se posebna procedura koju propisuje IEUBK koji je razvila US EPA 2021, [36]. Ovaj model uključuje ukupan unos Pb u organizam: iz zemlje, iz vode, iz kućne prašine iz hrane i iz inhalacije (koji čini oko 10% ukupne količine unetog Pb), na osnovu koga se vrši izračunavanje koncentracije olova u krvi (Blood Lead Level (BLL)) što nije predmet ove studije, s obzirom na raspoloživost samo podataka o sadržaju Pb u ambijentalnom vazduhu [36,37].

Nivo zagađenosti ambijetalnog vazduha u urbanom delu Bora, koji se meri na osam mernih stanica koncentracijom PM₁₀ čestica, kao i sadržaj teških metala u njima, prema standardu US EPA [27]: Pb, Cd, Ni i As. U tabeli 4. prikazani su rezultati srednjih godišnjih sadržaja navedenih polutanata, maksimalni dnevni sadržaj, kao i broj dana u toku kalendarske godine kada su prekoračene gornje limitirane vrednosti, služile su kao polazne vrednosti za procenu zdravstvenog rizika u aglomeraciji grada Bora.

Tabela 4. Izmerene vrednosti PM₁₀, Pb, Cd, Ni i As u ambijentalnom vazduhu u 2024. godini izmerene na teritoriji grada Bora

Merno mesto		PM10 ($\mu\text{g/m}^3$)	Pb ($\mu\text{g/m}^3$)	Cd (ng/m^3)	Ni (ng/m^3)	As (ng/m^3)
Jugopetrol	X1	169,8	2,898	286	17,4	471
	X2	37	0,243	19,8	2,4	42
	X3	77	14	46	0	66
Oštrelj	X1	107,5	0,113	16,7	17,9	28,5
	X2	36,7	0,015	13,6	2	3,3
	X3	75	0	3	0	44
Brezonik	X1	139,5	0,390	28,3	12,6	88
	X2	30,6	0,029	2,65	2	5,6
	X3	86	0	53	0	75
Gradski park	X1	57,1	0,063	4,94	15,6	13,4
	X2	22,6	0,008	0,72	2	2,30
	X3	3	0	0	0	6
Ind. zona	X1	139,5	3,293	116,9	10,1	221,9
	X2	32,8	0,11	8,01	2	15,1
	X3	34	0	54	0	92
Krivelj	X1	85,3	0,121	26,8	17	35,8
	X2	26,8	0,070	0,68	2	14
	X3	16	0	5	0	9
Institut	X1	71,30	0,43	33,6	5,2	47,7

	X2	30,7	0,073	3,91	2	6,7
	X3	4	0	14	0	21
Metovnica	X1	57,1	0,063	4,94	15,6	13,4
	X2	22,6	0,08	0,72	2	2,3
	X3	3	0	0	0	8

X₁ – Maksimalna izmerena srednja dnevna vrednost na mernom mestu X₂ - Godišnja srednja vrednost na mernom mestu; X₃ - Broj dana u kojima je prekoračena dozvoljena granična vrednost na mernom mestu

Imajući u vidu činjenicu da su svih osam mernih mesta u aglomeraciji grada Bora, raspoređena na različitim lokacijama u skladu sa postojećom ružom vetrova, kao i činjenice da se ljudi kreću na celom gradskom području i da su

izloženi efektima aerozagađenog vazduha na celom području gde je vršen monitoring vazduha. Zbog toga su izračunate srednja vrednost maksimalnih koncentracija izmerenih na pojedinim mernim mestima (X₁), srednja vrednost srednjih vrednosti na svim mernim mestima (X₂) i srednja vrednost broja dana kada su bile prekoračene limitirane vrednosti (X₃), a dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 5.

Tabela 5. Godišnje srednje vrednosti koncentracije polutanata na svim mernim mestima na teritoriji grada Bora u 2024. godini.

Scenario	PM10 (µg/m ³)	Pb (µg/m ³)	Cd (ng/m ³)	Ni (ng/m ³)	As (ng/m ³)
X1	103,38	0,921	64,77	15,15	114,96
X2	29,97	0,0748	4,56	2,05	11,41
X3	37,25	1,78	21,87	0	40,19

X₁- Aritmetička sredina izmerenih maksimalnih vrednosti na teritoriji grada Bora, X₂- Aritmetička sredina srednjih godišnjih vrednosti na svim mernim mestima na teritoriji grada Bora

X₃- Aritmetička sredina broja dana kada su bile prekoračene granične vrednosti polutanata na teritoriji grada Bora

U tabeli 6. prikazana je uporedna analiza podataka po scenarijima: X-1. X-2 i X-3 za srednje vrednosti za sva merna mesta u aglomeraciji Bor za 2024. i 2025. godinu. U 2025. godini utvrđeno je po Scenariju X-1 za PM₁₀ smanjenje za 4,13µg/m³, smanjenje 0,431µg/m³ za Pb, smanjenje 30,71ng/m³ za Cd, smanjenje 4,2ng/m³ za Ni i 17,89ng/m³ povećanje za As. Po Scenariju X-2 utvrđeno je povećanje 5,53µg/m³ za PM₁₀, povećanje za 0,011µg/m³ za Pb, smanjenje 2,4ng/m³ za Cd, smanjenje 0,04ng/m³ za Ni i smanjenje za 2,01ng/m³ za As. Po Scenariju X-3 variranje broja dana prekoračenja graničnih vrednosti za svaki polutant pojedinačno je i granicama (+/-)

tri dana. Vrednosti za prvih pet meseci u 2026. godini su u granicama (+/-) 5% za sva tri scenarija. Ove činjenice ukazuju da se rad rekonstrusane topionice bakra stabilizovao, i da varijacije sadržaja polutanata u ambijentalnom vazduhu u urbanom delu grada Bora, mogu uticati na nivo rizika HQ i CR po ljudsko zdravlje, u odnosu na dobijene rezultate za 2024. godinu sa varijacijom u granicama koje su ispod 5% u narednom periodu. Najveća opasnost proizilazi od konstantne izloženosti ljudi navedenim koncentracijama polutanata u ambijentalnom vazduhu, u dužem vremenskom periodu zbog akumulativnog uticaja koji dovodi do rastući nivo CR.

Tabela 6. Zavisnost koncentracija polutanata u ambijentalnom vazduhu grada Bora (2024/2025) po scenariju X-1 i X-2

Scenario	PM10(µg/m ³) 2024/2025	Pb (µg/m ³) u PM10 2024/2025	Cd (ng/m ³) u PM10 2024/2025	Ni (ng/m ³) u PM10 2024/2025	As (ng/m ³) u PM10 2024/2025
X-1	103,38/99,25	0,921/ 0.49	64,77/34,06	15,15/10,95	114,96/132.85
X-2	29,97/35,5	0,078/0.089	4,56/2,15	2,05/2,01	11,41/9,40

Za scenario X₃ vrednosti variraju u granicama (+/-) 3 dana što ukazuje da se vrednosti iz 2024. nisu promenile.

Rezultati prikazani u tabeli 5. korišćeni su za procenu rizika zdravlja za nekancerogene rizike: procenjeni dnevni unos (Estimate Daily Intake (EDI)) i HQ za uzrast dece i za odrasle, kao i za procenu CR za decu i odrasle koristeći jednačine: (1) - (5). Za izračunavanje ovih vrednosti korišćeni su sledeći parametri za izračunavanje za decu (7 godina starosti, 20 kg telesne mase i količinu udisanja 10m³/dan) i za odrasle (30 godina starosti 70 kg telesne mase i 20 m³/dan). Za procenu zdravstvenog rizika za metale u PM₁₀ (Pb, Cd, Ni i As) korišćeni su dostupni podaci u (Agencija za zaštitu životne sredine Kalifornije-CalEPA 2016, i US EPA 2016) baze za RfD i faktor nagiba (Slope Faktor (SF)) koji omogućuju izračunavanje EDI, HQ i CR za decu i odrasle.

Procena zdravstvenog rizika

Procena nekancerogenih rizika

Procena nekancerogenog rizika izračunavanjem vrednosti procenjena dnevna doza (EDD) vršena je po jednačini (1) a procena HQ vršena je primenom jednačine (2) korišćenjem preporučenih vrednosti u bazama [35,32] za decu i odrasle.

a) Procena nekancerogenog rizika za decu

Izračunate vrednosti HQ₁ za decu za pojedine toksične elementa u PM₁₀ za maksimalne vrednosti sadržaja polutanata u 2024. godini (Scenario X-1) su sledeće:

$HQ_{1-As} = 0,18$; $HQ_{1-Cd} = 0,062$; $HQ_{1-Ni} = 0,00036$.
Ukupni $HQ_1 = 0,24236 < 1$,

Dobijeni rezultati ukazuju da je nekancerogeni rizik za decu zanemarljiv na bazi maksimalnih vrednosti polutanata u ambijentalnom vazduhu (Scenario X-1).

Vrednosti za srednje godišnje koncentracije polutanata u ambijentalnom vazduhu grada Bora za 2024. godine (Scenario X-2), su sledeće:

$HQ_{2-As} = 0,018$; $HQ_{2-Cd} = 0,0044$; $HQ_{2-Ni} = 0,00005$.

Ukupno : $HQ_2 = 0,02245 < 1$.

Dobijeni rezultati ukazuju da je nekancerogeni rizik za decu zanemarljiv na bazi srednjih godišnj-vrednosti polutanata u ambijentalnom vazduhu u gradu Boru (Scenario X-2).

Vrednosti za HQ₁ i HQ₂ za decu su < 1 , što ukazuje da trenutno nema akutnog nekancerogenog rizika. As pokazuje najveću potencijalnu opasnost, što dugoročnoj izloženosti ovim koncentracijama polutanata As i Cd , kumulativno može biti veoma opasno po zdravlje mlade populacije u ovoj aglomeraciji.

b) Procena nekancerogenog rizika za odrasle

Za odrasle vrednosti HQ₁ na osnovu maksimalnih vrednosti za pojedine polutante u ambijentalnom vazduhu u gradu Boru u toku 2024. godini (Scenario X-1) iznose:

$HQ_{1-As} = 0,11$; $HQ_{1-Cd} = 0,036$; $HQ_{1-Ni} = 0,00021$,
Ukupna vrednost: $HQ_1 = 0,14621 < 1$,

Procena nekancerogenog rizika za odrasle na osnovu srednjih godišnjih vrednosti sadržaja polutanata u ambijentalnom vazduhu grada Bora (Scenario X-2) vršeno je na isti način procenom HQ₂ vrednost za svaki polutant u ambijentalnom vazduhu:

$HQ_{2-As} = 0,010$; $HQ_{2-Cd} = 0,0026$; $HQ_{2-Ni} = 0,00003$.
Ukupna vrednost: $HQ_2 = 0,01263 < 1$,

Dobijeni rezultati ukazuju da je ukupni nekancerogeni rizik HQ₁ < 1 za odrasle na osnovu maksimalno registrovanih vrednosti koncentracija polutanata u ambijentalnom vazduhu tokom 2024 (Scenario X-1), zanemarljiv. Takođe, ukupni nekancerogeni rizik HQ₂ < 1 za odrasle na osnovu srednjih vrednosti koncentracija polutanata u ambijentalnom vazduhu tokom 2024. godine (Scenario X - 2) je zanemarljiv.

U svim slučajevima nekancerogeni rizik za decu i odrasle po Scenariju - X-1 i Scenariju X- 2 , imaju opadajući trend u nizu: $HQ_{As} > HQ_{Cd} > HQ_{Ni}$. Za Pb nije računat uticaj s obzrom da se za njegov uticaj zahteva posebna IEUBK procedura, ali s obzirom na njegov nizak sadržaj u ambijentalnom vazduhu njegov uticaj bi mogao da poveća ukupne vrednosti HQ za najviše 10%, što ne bi uticalo da ukupne vrednosti HQ.

Procena kancerogenog rizika

A) Procena kancerogenog rizika za populaciju dece

Izračunavanje CR vršeno je korišćenjem jednačine (4) a za izračunavanje ukupnog rizika jednačina (5). Dobijene vrednosti CR za pojedine polutante za maksimalne vrednosti u 2024. godini za populaciju dece su sledeće (Scenario X-1):

CR1-As = $8,2E-5$; CR1-Cd = $4,7E-4$; CR1-Ni = $6,0E-6$. Ukupni CR1 = $5,58E-4$.

Za srednje godišnje vrednosti za 2024. godinu, dobijene su sledeće vrednosti: (Scenario 2):

CR2-As = $8,1E-5$; CR2-Cd = $3,3E-5$; CR2-Ni = $5,0E-6$. Ukupni CR2 = $1,24E-4$.

Po Scenariju X-1 ukupni CR = $5,58E-4$ je 5,6 puta viši nivo od EPA vrednosti, i predstavlja neprihvatljiv rizik u kome Cd učestvuje sa 84,2%, As sa 14,7 % i Ni sa 1,1%. Po Scenariju X-2, ukupni CR = $1,24E-4$, što predstavlja više od EPA vrednosti za oko 24% i predstavlja blago neprihvatljiv rizik u kome učestvuju: As = 66,9%, Cd = 26,9% i Ni = 6,5 %.

B) Procena kancerogenog rizika za odrasle

Procena kancerogenog rizika (CR) za odrasle na osnovu maksimalnih vrednosti polutanata u PM₁₀ u toku 2024. godine (Scenario -1) pokazuju sledeće vrednosti:

CR1-As = $4,8E-4$; CR1-Cd = $2,7E-5$; CR1-Ni = $3,0E-6$. Ukupni CR1 = $5,07E-4$.

Udeo pojedinih polutanata u ukupnom CR po Scenariju X-1 je sledeći: As ≈ 94,7%, Cd ≈ 5,3% i Ni ≈ 0,6%

Procena kancerogenog rizika za srednje godišnje vrednosti koncentracije polutanata u ambijentalnom vazduhu u urbanom delu grada Bora (Scenario X--2) pokazuju sledeće vrednosti: CR2-As = $4,7E-5$; CR2-Cd = $2,0E-5$; CR2-Ni = $2,1E-6$. Ukupni CR2 = $6,91E-5$.

Udeo pojedinih polutanata u ukupnom CR2 po Scenariju X-2 je sledeći: As ≈ 68%, Cd ≈ 28,9% i Ni ≈ 3%.

Vrednost ukupnog CR1 = $5,07E-4$ je višestruko veća od granične vrednosti koju

definiše EEA od $1,0E-4$ i predstavlja ne prihvatljivi rizik po zdravlje odraslih ljudi. Za Scenario 2, CR2 = $6,91E-5$ koja se nalazi u granicama između $1,0E-4$ i $1,0E-6$, pa se rizik smatra da je u granicama prihvatljivosti. Međutim, imajući u vidu činjenicu da As ima predomionantan uticaj na CR i da je njegova koncentracija u toku 2024. godine, bila viša od dozvoljene granice ukupno 40,19 dana (Tabela 5), ukazuje da se CR za ambijentalni vazduh u ispitivanoj regiji može smatrati da je neprihvatljiv.

Multivarijantna analiza

Na osnovu bivarijantne analize godišnjih koncentracija polutanata u ambijentalnom vazduhu u urbanoj zoni u Boru, Pirsonovi korelacioni koeficijenti izračunati su u tabeli 7. Statistička analiza podataka sprovedena je primenom statističkog softverskog paketa SPSS, uz procenu statističke značajnosti odnosa između posmatranih varijabli [38]. Pozitivna korelacija od 0,99 predstavlja visoki nivo podudarnosti ($p < 0,01$), između koncentracije As i koncentracije Cd. Takođe, dobra pozitivna korelacija postoji između koncentracije As sa Ni od 0,93, kao i između Cd i Ni 0,94. Takođe postoji negativna korelacija između koncentracija Pb sa Cd: -0,96; Ni: -0,83 i As: -0,95, respektivno. Dobijeni pozitivni visoki korelacioni koeficijenti između As, Cd i Ni ukazuju na njihov odnos u koncentratima koji su tretirani tokom 2024. godine u dobroj korelaciji, a negativna korelacija Pb sa As, Cd i Ni ukazuje da je sadržaj Pb u koncentratu bio promenljiv.

Tabela 7. Pirsonovi korelacioni koeficijenti između polutanata u česticama PM10

	Pb	Cd	Ni	As
Pb	1			
Cd	-0,96	1		
Ni	-0,83	0,94	1	
As	-0,95	0,99	0,93	1

U tabeli 8. prikazani su Pirsonovi korelacioni koeficijenti između vrednosti HQ i CR za decu i odrasle za oba scenarija koncentracija polutanata u ambijentalnom vazduhu (Scenario X-1 i Scenario X-2). Dobijeni rezultati pokazuju visok stepen pozitivne korelacije između vrednosti za deciju i populaciju odraslih za HQ u granicama 0,93 – 0,98, što ukazuje na veliku korelaciju između zdravstvenog nekancerogenog rizika za populaciju dece i

odraslih po oba scenarija X-1 i X-2., odnosno $(HQ_{1,2})A / (HQ_{1,2})B = 0,93-0,98$.

Pozitivna korelacija u granicama 0,96–0,99 između CR rizika kod populacije dece i odraslih po Scenariju X-1 i X-2, odnosno $(CR_{1,2})A / (CR_{1,2})B = 0,96-0,99$ ukazuje na podjednaku opasnost od kancera kod obe populacije. Najmanji stepen pozitivne korelacije utvrđen je kod odnosa HQ i CR za Scenarije X-1 i X-2, u granicama 0,78 – 0,83 za populaciju odraslih, a

za populaciju dece u granicama 0,83-0,88. S obzirom da je korelacija HQ/CR za populaciju dece pozitivnija u odnosu na isti odnos za populaciju odraslih $(HQ_{1,2}/CR_{1,2})A > (HQ_{1,2}/CR_{1,2})B$ verovatnoća kod populacije dece

je veća da vremenom budu izloženi CR-u. Korelacija između $(CR_{1,2})A / (CR_{1,2})B = 0,96 - 0,99$ ukazuje da je verovatnoća CR za obe populacije u visokoj pozitivnoj korelaciji.

Tabela 8. Pirsonovi korelacioni koeficijenti između HQ i CR za decu i odrasle po scenariju X-1 i X-2

	HQ ₁ -A	HQ ₂ -A	HQ ₁ -B	HQ ₂ -B	CR ₁ -A	CR ₂ -A	CR ₁ -B	CR ₂ -B
HQ ₁ -A	1							
HQ ₂ -A	0.98	1						
HQ ₁ -B	0.97	0.96	1					
HQ ₂ -B	0.95	0.94	0.93	1				
CR ₁ -A	0.88	0.85	0.84	0.82	1			
CR ₂ -A	0.86	0.83	0.82	0.80	0.99	1		
CR ₁ -B	0.87	0.84	0.83	0.81	0.98	0.98	1	
CR ₂ -B	0.84	0.81	0.80	0.78	0.97	0.96	0.98	1

(1) – Scenario X-1; (2) Scenario X-2; A- Populacija dece ; B- Populacija odraslih

ZAKLJUČAK

Povećanje kapaciteta topionice bakra u Boru (Srbija) u drugoj polovini 2023. godine za 2,5 puta i eksploatacija rudnika Čukaru Peki sa povećanim sadržajem As u rudi, koji u koncentratu bakra ima sadržaj više od deset puta iznad dozvoljene granice od 0,2%As, kao i povećanje sadržaja Cd u mnogome smanjuje kvalitet ambijentalnog vazduha u urbanoj sredini grada Bora. Takođe, povećani sadržaj As i Cd u PM₁₀, česticama u ambijentalnom vazduhu godinama unazad, dovodi do povećanog oboljevanja i smrtnosti od kancera u Boru, koja je mnogo veća nego u ostalom delu Srbije. Ove činjenice opravdano dovode do povećanog rizika za zdravlje ljudi u gradu Boru posle povećanog kapaciteta topionice bakra, koja se nalazi na lokaciji u neposrednoj blizini urbanog dela grada Bora.

Rezultati procene nekancerogenih rizika kod dece i kod odraslih $(HQ_{1,2}A) < 1$ $(HQ_{1,2}B) < 1$ ukazuju da su nekancerogeni rizici po oba scenarija (1 i 2) za decu (A) i odrasle (B) trenutno na prihvatljivom nivou. Međutim, dugoročno kontinuirano povećani sadržaj As i Cd u PM₁₀ česticama u ambijentalnom vazduhu u urbanoj sredini grada Bora, zbog njihove

akumulacije u ljudskom organizmu, vremenom uvećavaju kancerogeni rizik.

Procena kancerogenog rizika u gradu Boru pokazuje po scenariju maksimalnih vrednosti zabeleženih u toku 2024. godini (Scenario: X-1) je CR₁ = 5,58E-4, kod dece (A) i CR₁ = 5,07E-4 kod odraslih (B) koje su višestruko iznad limitirane vrednosti (1.0 - 4) definisane standardima EU, što predstavlja neprihvatljivi rizik. Po scenariju srednjih godišnjih vrednosti (Scenario: X-2) CR₂ = 1,24E-4 kod dece (A) i CR₂ = 6,9E-5 kod odraslih (B), ukazuju na blago neprihvatljiv rizik za populaciju dece (A) i prihvatljiv rizik za populaciju odraslih (B) koji se nalazi u granicama (10⁻⁴-10⁻⁶). Predominantan uticaj na vrednosti CR imaju koncentracije As i Cd u PM₁₀, čije su koncentracije u ambijentalnom vazduhu u visokoj međusobnoj pozitivnoj korelaciji od 0,99. S obzirom da se ovi teški metali akumuliraju u ljudskom organizmu, dugim izlaganjem njihovim sadržajima u ambijentalnom vazduhu, raste verovatnoća za uvećanje CR. U uslovima povećanog kapaciteta topionice bakra, povećava se rizik za zdravlje ljudi u gradu Boru, a zbog blizine granice sa Bugarskom i Rumunijom, državom članicom EU.

LITERATURA:

1. Bodor K, Bodor Z, Szép R. Spatial distribution of trace elements (As, Cd, Ni, Pb) from PM10 aerosols and human health impact assessment in an Eastern European country: Romania. Environ Monit Assess. 2021;193:176.
2. Mihalj I, Šušak S, Malešević A, et al. Particulate air pollution in central Serbia and some proposed measures for the restoration of degraded and disturbed mining areas. Geogr Pannonica. 2024;28(3):205-220.
3. World Health Organization. Air quality guidelines for Europe. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2019.
4. European Environment Agency. Air quality in Europe 2019. EEA Report No. 10/2019. Copenhagen: EEA; 2019. doi:10.2800/822355.
5. Živković Ž, Panić M, Fedajev A, Veličković M. The challenges of increasing the copper smelter capacity on ambient air quality in Bor, Serbia. Water Air Soil Pollut. 2023;234:82.
6. European Environment Agency. Air quality in Europe 2024. EEA Report No. 5/2024. Luxembourg:

- Publications Office of the European Union; 2024. doi:10.2800/22775.
7. International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans [Internet]. Lyon: IARC; 2024 [cited 2024 Sep 30]. Available from: <https://monographs.iarc.who.int/>
 8. Sah D, Verma PK, Kandikonda MK, Lakhani A. Pollution characteristics and human health through multiple exposure pathways and source apportionment of heavy metals in PM10 at an Indo-Gangetic site. *Urban Clim.* 2019;27:149-162. doi:10.1016/j.uclim.2018.11.010.
 9. Du Y, Gao B, Zhou H, et al. Health risks assessment of heavy metals in road dusts in urban parks of Beijing, China. *Procedia Environ Sci.* 2013;18:299-309. doi:10.1016/j.proenv.2013.04.040.
 10. Keresztesi Á, Nita IA, Birsan MV, et al. Assessing the variations in the chemical composition of rainwater and air masses using the zonal and meridional circulation indices. *Atmos Res.* 2020;237:104846. doi:10.1016/j.atmosres.2020.104846.
 11. Papanikolaou NC, Hatzidaki EG, Belivanis S, et al. Lead toxicity update. A brief review. *Med Sci Monit.* 2005;11(10):RA329-RA336.
 12. Bromandi P, Rodriguez SA, Janatian N, et al. Health risk assessment of European inhabitants exposed to contaminated ambient particulate matter by potentially toxic elements. *Environ Pollut.* 2023;323:121232.
 13. City of Bor Ecology Department. Annual report on air quality in Bor 2024 and 2025. Bor: City Administration of Bor; 2025.
 14. Deng WJ, Zheng HL, Tsui AKY, Chen XW. Measurement and health risk assessment of PM2.5 flame retardants, carbonyls and black carbon in indoor and outdoor air in kindergartens in Hong Kong. *Environ Int.* 2016;96:65-74.
 15. Juda-Rezler K, Reizer M, Oudinet JP. Determination and analysis of PM10 source apportionment during episodes of air pollution in Central Eastern European urban areas: the case of wintertime 2006. *Atmos Environ.* 2011;45(36):6557-6566. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.08.020.
 16. Kovačević R, Radović B, Manojlović D, et al. Determining PM10 pollution sources near the copper smelter in Bor, Serbia. *Atmosphere.* 2024;15:1498. doi:10.3390/atmos15121498.
 17. Kozielska B, Kaleta D. Cancer risk associated with inhalation exposure to PM10-bound PAHs and PM10-bound heavy metals in Polish agglomerations. *Appl Sci.* 2025;15:7903. doi:10.3390/app15147903.
 18. Đorđević P, Nikolić Đ, Jovanović I, et al. Episode of extremely high concentrations of SO2 and particulate matter in the urban environment of Bor, Serbia. *Environ Res.* 2013;126:204-207. doi:10.1016/j.envres.2013.05.002.
 19. Nikolić Đ, Milošević N, Mihajlović I, et al. Multi-criteria analysis of air pollution with SO2 and PM10 in urban area around the copper smelter in Bor, Serbia. *Water Air Soil Pollut.* 2010;206:369-383.
 20. Nikolić Đ, Milošević N, Živković Ž, et al. Multi-criteria analysis of soil pollution by heavy metals in the vicinity of the copper smelting plant in Bor (Serbia). *J Serb Chem Soc.* 2011;76(4):625-641. doi:10.2298/JSC100823054N.
 21. Taskinen P, Jokilaakso A. Reaction sequences in flash smelting and converting furnaces: an in-depth view. *Metall Mater Trans B.* 2021. doi:10.1007/s11663-021-02283-7.
 22. NevSun Resources Ltd. Timok Upper Zone Copper-Gold Project: prefeasibility study and resource estimate for the lower zone. NI 43-101 Technical Report. Vancouver: NevSun Resources Ltd.; 2018.
 23. Perez K, Toro N, Gávez E, et al. Environmental, economic and technological factors affecting Chilean copper smelters: a critical review. *J Mater Res Technol.* 2021;15:213-225. doi:10.1016/j.jmrt.2021.08.007.
 24. US Environmental Protection Agency. Concepts, methods and data sources for cumulative health risk assessment of multiple chemicals, exposures and effects: a resource document. EPA/600/R-06/013F. Washington (DC): US EPA; 2007.
 25. Institute of Public Health of Serbia "Dr Milan Jovanović Batut". Cancer incidence and mortality in Central Serbia 2016-2022. Belgrade: Institute of Public Health of Serbia; 2022.
 26. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Public Health Assessment Guidance Manual. Atlanta (GA): ATSDR; 2025.
 27. Gladović A, Petrović B, Vukelić D, et al. Carcinogenic and human health risk assessment of children's and adults' exposure to toxic metalloid(s) from PM10 in critical sites of the Republic of Serbia. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2023;30(25):61753-61765.
 28. Guo W, Zhang X, Yue J, et al. Nasal filters reveal exposure risks of inhalable particulates and heavy metals in urban women. *Environ Int.* 2024;188:108743.
 29. US Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System (IRIS): Glossary [Internet]. Washington (DC): US EPA; 2016.
 30. Taiwo AM, Awomeso JA, Taiwo OT, et al. Assessment of health risks associated with road dust in major traffic hotspots in Abeokuta metropolis, Ogun State, southwestern Nigeria. *Stoch Environ Res Risk Assess.* 2017;31(2):431-447.
 31. Gangwar C, Choudhary B, Chauhan A, et al. Assessment of air pollution caused by illegal e-waste burning to evaluate human health risk. *Environ Int.* 2019;125:191-199.
 32. California Environmental Protection Agency. Office of Environmental Health Hazard Assessment [Internet]. Sacramento (CA): CalEPA; 2016. Available from: <https://oehha.ca.gov/>
 33. US Environmental Protection Agency. IEUBK overview of changes from IEUBKwin version 2. Washington (DC): US EPA; 2021.
 34. Kalbarczyk R, Kalbarczyk E. Structure of Pb concentration in PM10 particulate matter in Poland and its dependence on thermal air conditions and precipitation. *Atmos Res.* 2025;326:108306.
 35. Ho R. Handbook of univariate and multivariate data analysis with IBM SPSS. 2nd ed. Boca Raton (FL): CRC Press; 2013.
 36. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021.