

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET

Jelena R. Obradović

**PROCENA RIZIKA PO ZDRAVLJE UČENIKA ŠKOLE
U URBANOJ SREDINI USLED PRISUSTVA ŠTETNIH
HEMIJSKIH SUPSTANCI NA SUSPENDOVANIM
ČESTICAMA U VAZDUHU**

Doktorska disertacija

Beograd, 2025.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY

Jelena R. Obradović

**HEALTH RISK ASSESSMENT FOR STUDENTS IN AN
URBAN SCHOOL ENVIRONMENT DUE TO
PARTICULATE MATTER-BOUND HARMFUL
CHEMICAL SUBSTANCES IN THE AIR**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2025.

Mentori:

dr Antonije Onjia, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Slavica Ražić, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Farmaceutski fakultet

Članovi komisije:

dr Aleksandra Perić-Grujić, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Maja Đolić, docent
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Danka Stojanović, viši naučni saradnik
Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča

Datum odbrane doktorske disertacije: _____

ZAHVALNICA

Neizmernu zahvalnost dugujem svom mentoru dr Antoniju Onjiji, redovnom profesoru Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Hvala Vam pre svega na Vašoj istinskoj dobroti i ljudskosti i ogromnoj pomoći i podršci u izradi ove doktorske disertacije. Hvala Vam za sve što ste učinili za mene, za svaki savet koji ste mi dali i što ste nesebično delili svoje veliko znanje i iskustvo i uvek bili tu da pomognete. Teško je izraziti beskrajnu zahvalnost koju Vam dugujem!

Zahvaljujem svojoj mentorki dr Slavici Ražić, redovnom profesoru Farmaceutskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu na korisnim savetima i pomoći tokom izrade ove doktorske disertacije.

Zahvaljujem dr Aleksandri Perić-Grujić, redovnom profesoru Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, dr Maji Đolić, docentu Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu i dr Danki Stojanović, višem naučnom saradniku Instituta za nuklearne nauke Vinča - Institut od nacionalnog značaja, Univerziteta u Beogradu na konstruktivnim savetima i korisnim smernicama tokom pregleda ove doktorske disertacije.

Zahvaljujem dr Mileni Jovašević-Stojanović, naučnom savetniku Instituta za nuklearne nauke Vinča - Institut od nacionalnog značaja, Univerziteta u Beogradu, kao i ostalim kolegama sa projekta H2020 VIDIS, na podršci i pomoći.

Zahvaljujem laboratoriji Anahem d.o.o. na pomoći pri realizaciji eksperimentalnog rada u okviru ove disertacije, posebno Jeleni Radulović i Aleksandri Savić na pomoći i savetima.

Zahvaljujem mojim kolegama iz Vazduhoplovne akademije, posebno Drakčetu Vidojeviću i Ivanu Jovanoviću koji su uvek bili spremni da nesebično pomognu tokom eksperimentalnog rada sprovedenog u školi.

Veliku zahvalnost dugujem mojoj mami Evici, očuhu Živomiru i bratu Nenadu na ljubavi i podršci tokom mog školovanja i odrastanja. Hvala vam što verujete u mene!

Iznad svega, neizmernu zahvalnost dugujem mom suprugu dr Milanu Obradoviću, naučnom savetniku Instituta za Nuklearne nauke Vinča - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerziteta u Beogradu, koji mi je bio ogromna podrška i pomoć u izradi ove doktorske disertacije. Hvala ti što toliko veruješ u mene, hvala ti na ogromnom razumevanju, hvala ti što si me bodrio, ulivao snagu da nastavim dalje onda kada je bilo teško, što si učinio sve da mi pomogneš i zbog toga ću ti uvek biti zahvalna. Ova disertacija ne bi bila realizovana bez tvoje beskrajne ljubavi prema meni i zato su svi moji uspesi i tvoji!

Ovu disertaciju posvećujem mojoj deci Dunji, Tari i Filipu koji su moja snaga na ovom teškom ali uspešnom putu.

Procena rizika po zdravlje učenika škole u urbanoj sredini usled prisustva štetnih hemijskih supstanci na suspendovanim česticama u vazduhu

SAŽETAK

Loš kvalitet vazduha u školama ne samo da negativno utiče na kognitivne sposobnosti učenika, već može imati i dugoročne štetne efekte na zdravlje. Uzimajući u obzir neophodnost očuvanja i praćenja kvaliteta vazduha zbog sve većeg broja antropogenih aktivnosti koje smanjuju kvalitet vazduha, cilj istraživanja ove doktorske disertacije bio je kvantifikacija zagađujućih supstanci u vazduhu, pre svega toksičnih elemenata i policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH) prisutnih na finim česticama (PM_{2,5}) u učionici i dvorištu škole u hladnom i toplom periodu godine, određivanje izvora zagađenja i procena rizika po zdravlje učenika kombinacijom metoda faktorizacije pozitivne matrice (PMF) i Monte Karlo simulacije (MCS) sa posebnim osvrtom na rizike povezane sa različitim izvorima zagađenja. Dobijeni rezultati su pokazali da su koncentracije PM_{2,5} bile u opsegu 5,33-47,5 µg/m³ u zatvorenom prostoru i 8,22-83,1 µg/m³ u spoljašnjoj sredini. Koncentracija elemenata prisutnih na PM_{2,5} u učionici je bila približno 1,5 puta manja u poređenju sa vrednostima iz spoljašnje sredine. Ca i Fe su bili najzastupljeniji elementi, dok su kod teških metala Zn, a zatim Cr, Pb, Cu, Mn i Ni imali najviše koncentracije. Takođe je pokazano da su koncentracije Cr i Ni bile veće od graničnih vrednosti. Prosečna koncentracija ukupnih PAH je bila veća u spoljašnjoj sredini nego u unutrašnjem prostoru. Acenafthen, benzo[b]fluoranten i benzo[k]fluoranten bili su najzastupljeniji PAH u unutrašnjem prostoru i u spoljašnjoj sredini. Odnos unutrašnjih i spoljašnjih koncentracija PM_{2,5} i većine elemenata i PAH bio je ispod jedan, što ukazuje na veći doprinos spoljašnjih izvora. PMF analiza je pokazala složenu interakciju između prirodnih i antropogenih izvora elemenata. Identifikovano je šest primarnih izvora elemenata, pri čemu su saobraćaj i resuspendovana prašina bili dominantni izvori. Dijagnostički odnosi PAH i PMF su pokazali da su emisije iz vozila i sagorevanje fosilnih goriva i biomase bili glavni izvori PAH tokom grejne sezone, dok je saobraćaj bio primarni izvor PAH u negrejnem periodu. Procena zdravstvenog rizika usled izloženosti elementima prisutnim na PM_{2,5} putem inhalacije, pokazala je da su Ni, Cr i Mn najviše doprineli nekancerogenom riziku, dok su Cr i u manjoj meri As imali najveći kancerogeni potencijal. Ukupan nekancerogeni i kancerogeni rizik za elemente je bio u prihvatljivim granicama, pri čemu je emisija elemenata iz vozila imala najveći zdravstveni rizik. Procena kancerogenog rizika usled izloženosti učenika PAH putem inhalacije ukazala je na prihvatljiv nivo u unutrašnjem prostoru, pri čemu su benzo[a]piren i dibenz[a,h]anthracen imali najveći kancerogeni doprinos. Srednja vrednost rizika od karcinoma pluća tokom života je bila unutar prihvatljivog nivoa u učionici, ali su pojedine dnevne vrednosti prevazilazile granične vrednosti. Međutim, 2D MSC analiza je pokazala da je vrednost dugotrajnog rizika od raka pluća u unutrašnjem prostoru bila ispod granične vrednosti od $1,0 \times 10^{-4}$. Takođe, pokazano je da su emisije PAH iz vozila i iz saobraćajne prašine i isparavanja naftnih derivata, najviše doprineli ukupnom kancerogenom riziku. Rezultati ove doktorske disertacije ukazuju da su na distribuciju elemenata i PAH prisutnih na PM_{2,5} u učionici dominantan uticaj imali izvori iz spoljašnje sredine. Uprkos potencijalnim zdravstvenim rizicima, rezultati ukazuju da je izloženost elementima i PAH prisutnim na PM_{2,5} bila u prihvatljivim granicama.

Ključne reči: Fine suspendovane čestice, Elementi, Policiklični aromatični ugljovodonici, Faktorizacija pozitivne matrice, Zdravstveni rizik, Monte Karlo simulacija.

Naučna oblast: Inženjerstvo zaštite životne sredine

Health Risk Assessment for Students in an Urban School Environment Due to Particulate Matter-Bound Harmful Chemical Substances in the Air

ABSTRACT

Poor air quality in schools not only has a negative impact on students' cognitive abilities, but can also have long-term negative effects on health. Recognizing the need to maintain and monitor air quality as the number of anthropogenic activities affecting air quality increases, the aim of this PhD thesis was to quantify air pollution, especially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) bound to fine particulate matter (PM_{2.5}) in classrooms and schoolyards during the heating and non-heating periods, the determination of the pollution source and the assessment of the health risk for students through a combination of positive matrix factorization (PMF) and Monte Carlo simulations (MCS) with particular attention to the assessment of source-specific risks. The results obtained showed that PM_{2.5} concentrations were in the range of 5.33-47.5 µg/m³ for indoor areas and 8.22-83.1 µg/m³ for outdoor areas. The concentration of elements bound to PM_{2.5} in the classroom was about 1.5 times lower compared to outdoor values. Ca and Fe were the most abundant elements, while among the heavy metals Zn, followed by Cr, Pb, Cu, Mn and Ni had the highest concentrations. In addition, the concentrations of Cr and Ni were above the limit values. The average concentration of total PAHs was higher outdoors than indoors. The most frequently occurring PAHs were acenaphthene, benzo[b]fluoranthene and benzo[k]fluoranthene both indoors and outdoors. The ratio of PM_{2.5} and most elements and PAHs indoors to outdoor air was less than one, indicating a larger contribution from outdoor air sources. The PMF analysis showed a complex interaction between natural and anthropogenic sources of elements. Six primary sources of elements were identified, with traffic and airborne dust recognized as dominant sources. The analysis of the diagnostic ratio and PMFs for PAHs showed that motor vehicle emissions and the combustion of fossil fuels and biomass are the main sources of PAHs during the heating season, while traffic is the main source of PAHs during the non-heating season. The health risk assessment of inhalation exposure to PM_{2.5}-bound elements showed that Ni, Cr and Mn contributed most to the non-carcinogenic risk, while Cr and, to a lesser extent, As had the greatest carcinogenic potential. The overall non-carcinogenic and carcinogenic risk for elements was within acceptable limits, with elements originating from vehicles contributing the most to health risk. The assessment of carcinogenic risk from exposure of students to PM_{2.5}-bound PAHs by inhalation showed an acceptable level indoors, while benzo[a]pyrene and dibenz[a,h]anthracene contributed the most. The average lifetime lung cancer risk was within the acceptable range in the classroom, but some daily levels exceeded the safety limit. However, the 2D MSC analysis showed that the lifetime indoor lung cancer risk was below the limit of 1.0×10^{-4} . It also showed that PAH emissions from vehicles and traffic dust, as well as volatilization of petroleum products on roads contributed most to the overall carcinogenic risk. The results of this dissertation indicate that the distribution of PM_{2.5}-bound elements and PAHs in the classroom was predominantly influenced by outdoor sources. Despite the potential health risks, the results show that exposure to elements and PAHs was within acceptable limits.

Keywords: Fine particulate matter, Elements, Polycyclic aromatic hydrocarbons, Positive matrix factorization, Health risk, Monte Carlo simulation.

Scientific field: Environmental engineering

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. CILJ ISTRAŽIVANJA	3
3. TEORIJSKI DEO	4
3.1. Zagađenje vazduha	4
3.2. Fine čestice (PM _{2,5}) suspendovane u vazduhu i uticaj na zdravlje	4
3.2.1. Uticaj PM _{2,5} na zdravlje	6
3.3. Elementi u tragovima u ambijentalnom vazduhu	7
3.4. Policiklični aromatični ugljovodonici u ambijentalnom vazduhu	9
3.5. Zagađenje vazduha u školama	12
4. MATERIJAL I METODE	16
4.1. Mesto uzorkovanja	16
4.2. Uzorkovanje i određivanje masene koncentracije PM _{2,5}	18
4.3. Određivanje koncentracije elemenata adsorbovanih na PM _{2,5}	19
4.4. Određivanje koncentracije PAH adsorbovanih na PM _{2,5}	20
4.5. Kontrola kvaliteta uzorkovanja i laboratorijskih analiza	21
4.6. Meteorološki parametri kvaliteta vazduha	24
4.7. Određivanje izvora elemenata i PAH u PM _{2,5} česticama	24
4.7.1. Određivanje odnosa unutrašnjeg i spoljašnjeg zagađenja vazduha	24
4.7.2. Korelaciona analiza	25
4.7.3. Faktorizacija pozitivne matrice	25
4.7.4. Dijagnostički odnos	26
4.8. Procena rizika po zdravlje	27
4.8.1. Određivanje uticaja metala adsorbovanih na PM _{2,5} na zdravlje	27
4.8.2. Određivanje uticaja PAH adsorbovanih na PM _{2,5} na zdravlje	28
4.8.3. Monte Karlo simulacija (MCS)	29
4.9. Statistička obrada podataka	29
5. REZULTATI I DISKUSIJA	30
5.1. Masena koncentracija PM _{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru	30
5.1.1. Distribucija PM _{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru	31
5.1.2. Uticaj meteoroloških uslova na distribuciju PM _{2,5}	32
5.2. Koncentracija elemenata prisutnih na PM _{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru	34
5.2.1. Distribucija elemenata prisutnih na PM _{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru	38
5.2.2. Zavisnost koncentracija elemenata prisutnih na PM _{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru	40
5.3. Koncentracija PAH prisutnih na PM _{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru	40
5.3.1. Distribucija PAH prisutnih na PM _{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru	46
5.3.2. Zavisnost koncentracija PAH prisutnih na PM _{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru	47
5.4. Koncentracije PM _{2,5} , CO ₂ , HCHO i TVOC u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru	48
5.5. Određivanje potencijalnih izvora emisije elemenata prisutnih na PM _{2,5}	50
5.6. Određivanje potencijalnih izvora emisije PAH prisutnih na PM _{2,5}	53
5.7. Procena zdravstvenog rizika	56
5.7.1. Analiza nekancerogenog i cancerogenog rizika usled izloženosti elementima prisutnim na PM _{2,5} specifičnog za izvor	56
5.7.2. Analiza verovatnoće zdravstvenog rizika usled izloženosti elementima specifična za izvor primenom Monte Karlo simulacije	59

5.7.3. Analiza kancerogenog rizika usled izloženosti PAH prisutnim na PM _{2,5} specifičnog za izvor	61
5.7.4. Analiza verovatnoće zdravstvenog rizika usled izloženosti PAH specifična za izvore primenom Monte Karlo simulacije	62
6. ZAKLJUČAK	68
7. LITERATURA.....	72
BIOGRAFIJA.....	86
Izjava o autorstvu	87
Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada	88
Izjava o korišćenju	89
Ocena izveštaja o proveru originalnosti doktorske disertacije.....	91

SPISAK SIMBOLA I SKRAĆENICA

CR	(eng. <i>Carcinogenic risk</i>) — Kancerogeni rizik
GC-MS	(eng. <i>Gas chromatography – mass spectrometry</i>) — Gasna hromatografija sa masenom spektrometrijom
HI	(eng. <i>Hazard Index</i>) — Indeks opasnosti
HQ	(eng. <i>Hazard Quotient</i>) — Koeficijent opasnosti
HRA	(eng. <i>Health risk assessment</i>) — Procena zdravstvenog rizika
I/O	(eng. <i>Indoor/Outdoor</i>) — Odnos unutar/spolja
ICP-MS	(eng. <i>Inductively coupled plasma – mass spectrometry</i>) — Indukovano spregnuta plazma sa masenom spektrometrijom
IUR	(eng. <i>Inhalation unit risk</i>) — Rizik od inhalacione jedinice
LOD	(eng. <i>Limit of detection</i>) — Granica detekcije
LOQ	(eng. <i>Limit of quantification</i>) — Granica kvantifikacije
LLCR	(eng. <i>Lifetime lung cancer risk</i>) — Rizik od karcinoma pluća tokom života
MCS	(eng. <i>Monte Carlo simulation</i>) — Monte Karlo simulacija
MDL	(eng. <i>Method of Limit detection</i>) — Limit detekcije metode
NCR	(eng. <i>Non-carcinogenic risk</i>) — Nekancerogeni rizik
PAH	(eng. <i>Polycyclic aromatic hydrocarbon</i>) — Policiklični aromatični ugljovodonici
PEF	(eng. <i>Particulate emission factor</i>) — Faktor emisije čestica
PMF	(eng. <i>Positive matrix factorisation</i>) — Faktorizacija pozitivne matrice
PM	(eng. <i>Particulate Matter</i>) — Suspendovane čestice
PM _{2,5}	(eng. <i>Fine Particulate Matter</i>) — Fine suspendovane čestice
RSD	(eng. <i>Relative standard deviation</i>) — Relativna standardna devijacija
SD	(eng. <i>Standard deviation</i>) — Standardna devijacija
SE	(eng. <i>Standard Error</i>) — Standardna greška
TCR	(eng. <i>Total Carcinogenic Risk</i>) — Ukupni kancerogeni rizik
TEQ	(eng. <i>Toxic equivalent quantities</i>) — Ekvivalent toksičnosti
USEPA	(eng. <i>United States Environmental protection agency</i>) — Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država
VOC	(eng. <i>Volatile organic compound</i>) — Lako isparljiva organska jedinjenja

SPISAK SLIKA

- Slika 1.** Izvori i distribucija $PM_{2,5}$
- Slika 2.** Pregled glavnih zdravstvenih komplikacija usled kratkotrajne i dugotrajne izloženosti $PM_{2,5}$.
- Slika 3.** Distribucija i depozicija elemenata prisutnih na $PM_{2,5}$.
- Slika 4.** Izvori PAH i efekti na zdravlje.
- Slika 5.** Lokacija škole.
- Slika 6.** Mesta uzorkovanja, levo je dvorište škole, desno je učionica.
- Slika 7.** Izgled učionice.
- Slika 8.** Referentni uzorkivač Sven Leckel LVS6-RV.
- Slika 9.** Elektronska analitička vaga (Radwag MYA 5.3Y).
- Slika 10.** Maseni spektrometar sa indukovano spregnutom plazmom (ICP-MS).
- Slika 11.** Gasni hromatograf sa masenom spektrometrijom (GC-MS).
- Slika 12.** Kontinuirani detektori.
- Slika 13.** Zavisnost koncentracije $PM_{2,5}$ od meteoroloških parametara u grejnom periodu.
- Slika 14.** Zavisnost koncentracije $PM_{2,5}$ od meteoroloških parametara u negrejnem periodu.
- Slika 15.** Ruža vetrova (a) i disperzija $PM_{2,5}$ normalizovana po svakom sektoru vetra.
- Slika 16.** Koncentracije elemenata vezanih na $PM_{2,5}$ u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).
- Slika 17.** Korelacija između elemenata prisutnih na $PM_{2,5}$ u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).
- Slika 18.** Koncentracije PAH prisutnih na $PM_{2,5}$ u unutrašnjem prostoru.
- Slika 19.** Koncentracije PAH prisutnih na $PM_{2,5}$ spoljašnjoj sredini.
- Slika 20.** Prstenasta analiza PAH vezanih za $PM_{2,5}$ (a) u unutrašnjem prostoru i (b) spoljašnjoj sredini.
- Slika 21.** Distribucija dnevnih koncentracija $PM_{2,5}$, CO_2 , HCHO i TVOC tokom celog perioda u unutrašnjem prostoru (a) i spoljašnjoj sredini (b).
- Slika 22.** Distribucija satnih, dnevnih i mesečnih koncentracija $PM_{2,5}$, CO_2 , HCHO i TVOC u unutrašnjem prostoru (a) i spoljašnjoj sredini (b).
- Slika 23.** Faktorski profil i doprinos elemenata prisutnih na $PM_{2,5}$ prema izvorima u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).
- Slika 24.** Raspodela izvora elemenata prisutnih na $PM_{2,5}$ u grejnom i negrejnem periodu.
- Slika 25.** Dijagnostički odnosi analiziranih PAH u zatvorenom prostoru (a, c, e) i spoljašnjoj sredini (b, d, f).
- Slika 26.** Faktorski profil i doprinos 16 pojedinačnih PAH prisutnih na $PM_{2,5}$ prema izvorima PAH za unutrašnji prostor i spoljašnju sredinu.
- Slika 27.** Raspodela izvora PAH prisutnih na $PM_{2,5}$ u zatvorenom prostoru (a, c, e, g) i spoljašnjoj sredini (b, d, f, h).
- Slika 28.** Doprinos elemenata u HI u unutrašnjem prostoru (i).
- Slika 29.** Doprinos elemenata u HI u spoljašnjoj sredini (o).
- Slika 30.** Distribucija verovatnoće za nekancerogeni i cancerogeni rizik specifična za izvore elemenata.
- Slika 31.** Doprinos pojedinačnih PAH ΣTEQ u spoljašnjoj sredini i unutrašnjem prostoru.
- Slika 32.** Distribucija verovatnoće cancerogenog rizika specifičnog za izvor dobijena pomoću 1D MCS u unutrašnjem prostoru (a) i spoljašnjoj sredini (b), analiza osetljivosti rizika u unutrašnjem prostoru (c) i spoljašnjoj sredini (d), i distribucije verovatnoće cancerogenog rizika specifičnog za izvor dobijene pomoću 2D MCS u unutrašnjem prostoru (e) i spoljašnjoj sredini (f).

SPISAK TABELA

- Tabela 1.** Emisija elemenata iz saobraćaja.
- Tabela 2.** Fizičko-hemijska svojstva 16 prioritetnih PAH.
- Tabela 3.** Uticaj kvaliteta vazduha u učionicama na kognitivne sposobnosti učenika.
- Tabela 4.** Kalibracija i validacija podataka ICP-MS analize elemenata adsorbovanih na PM_{2,5}.
- Tabela 5.** Kalibracija i validacija podataka GC-MS analize PAH adsorbovanih na PM_{2,5}.
- Tabela 6.** Q vrednosti za rešenja faktora za elemente na PM_{2,5} u PMF modelu.
- Tabela 7.** Dijagnostički odnosi PAH.
- Tabela 8.** Parametri inhalacionog izlaganja elementima.
- Tabela 9.** Faktor ekvivalentne toksičnosti za PAH.
- Tabela 10.** Koncentracije PM_{2,5} u školama u različitim zemljama.
- Tabela 11.** Odnos unutrašnjih i spoljašnjih koncentracija PM_{2,5}.
- Tabela 12.** Koncentracija elemenata prisutnih na PM_{2,5} u školama širom sveta.
- Tabela 13.** Koncentracija elemenata prisutnih na PM_{2,5} u grejnom i negrejnom periodu u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).
- Tabela 14.** Odnos koncentracija elemenata prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).
- Tabela 15.** Koncentracije PAH prisutnih na PM_{2,5} u školama širom sveta.
- Tabela 16.** Koncentracija PAH prisutnih na PM_{2,5} u grejnom i negrejnom periodu u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).
- Tabela 17.** Odnos koncentracija PAH prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).
- Tabela 18.** Korelacija između PAH prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).
- Tabela 19.** Indeks opasnosti (HI) za nekancerogene elemente prisutne na PM_{2,5}.
- Tabela 20.** Indeks opasnosti (HI) za nekancerogene elemente prisutne na PM_{2,5} za odrasle i decu.
- Tabela 21.** Ukupni rizik od kancera (TCR) za kancerogene elemente prisutne na PM_{2,5}.
- Tabela 22.** Distribucija verovatnoće kancerogenog rizika specifičnog za izvore u spoljašnjoj sredini dobijena pomoću 1D MCS.
- Tabela 23.** Distribucija verovatnoće kancerogenog rizika specifičnog za izvore u unutrašnjoj sredini dobijena pomoću 1D MCS.
- Tabela 24.** Distribucija verovatnoće kancerogenog rizika specifičnog za izvore u spoljašnjoj sredini dobijena pomoću 2D MCS.
- Tabela 25.** Distribucija verovatnoće kancerogenog rizika specifičnog za izvore u unutrašnjoj sredini dobijena pomoću 2D MCS.

1. UVOD

Zagađenje vazduha predstavlja jedan od najvećih ekoloških problema (Patel et al. 2020; Xu et al. 2024). Povećana urbanizacija i industrijalizacija, koju prati sve veća potreba za fosilnim izvorima energije, različitim metalima i hemikalijama dovodi do zagađenosti vazduha u meri koja štetno deluje na zdravlje ljudi (Raju et al. 2020; Zhou et al. 2023).

Na kvalitet vazduha utiču brojni činioci koji se razlikuju u zavisnosti od izvora zagađenja, ekspozicije terena i meteoroloških parametara. Međutim, uticaj ljudskih aktivnosti dolazi do izražaja naročito u urbanim sredinama što ukazuje na potrebu za analizom antropogenog faktora. Pored gasovitih zagađujućih supstanci, od posebnog toksikološkog značaja ističu se fine čestice ($PM_{2,5}$; eng. *Particulate Matter*) suspendovane u vazduhu, koje putem pluća lako difunduju u krvotok (Guo et al. 2022).

Osim povišene koncentracije, toksični potencijal $PM_{2,5}$ prvenstveno je povezan sa njihovim hemijskim sastavom (Alves et al. 2023; Garcia et al. 2023). Prisustvo toksičnih elemenata u $PM_{2,5}$ poput As, Cr, Cu, Cd, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn, Sb, i V ima štetan efekat na zdravlje ljudi (Wang et al. 2020; Kaghazchi and Soleimani 2023).

Takođe, u sastavu $PM_{2,5}$ mogu se naći i policiklični aromatični ugljovodonici (PAH; eng. *Polycyclic aromatic hydrocarbon*) koji se svrstavaju u veoma toksična jedinjenja (Mallah et al. 2022). Iako se u atmosferi može detektovati preko 100 PAH, pokazano je da njih 16 koji se mogu detektovati u $PM_{2,5}$ ima visok rizik po zdravlje ((naftalen (Nap), acenaftilen (Acy), acenaften (Ace), fluoren (Flu), fenantren (Phe), antracen (Ant), fluoranten (Fla), piren (Pyr), benz[a]antracen (BaA), krizen (Chy), benzo[b]fluoranten (BbF), benzo[k]fluoranten (BkF), benzo[a]piren (BaP), dibenz[a,h]antracen (DahA), benzo[g,h,i]perilen (BghiP) i indeno[1,2,3-c,d]piren (InP)). Dugotrajna izloženost štetnim supstancama iz vazduha čak i u malim povišenim dozama, dovodi se u vezu sa ozbiljnim zdravstvenim rizicima (Wang et al. 2021; Garcia et al. 2023).

Toksični elementi nalaze se u sastavu zemljine kore, a usled prirodnih procesa prisutni su i u atmosferi. Većina elemenata nalazi se u ljudskom telu u malim koncentracijama, gde imaju važnu ulogu u različitim fiziološkim procesima. Međutim, širok spektar antropogenih aktivnosti doprinosi povećanju njihovih koncentracija u vazduhu. Iako su toksični elementi prisutni na $PM_{2,5}$ u niskim koncentracijama ili čak u tragovima, usled visoke bioreaktivnosti štetno utiču na zdravlje (Kaghazchi and Soleimani 2023; Wang et al. 2023). Takođe, visoka tendencija bioakumulacije u ljudskom telu doprinosi štetnom efektu toksičnih elemenata, naročito pri hroničnoj izloženosti (Garcia et al. 2023).

Pored toksičnih elemenata, PAH su druga grupa veoma toksičnih jedinjenja koja negativno utiče na kvalitet vazduha (Mallah et al. 2022; Wu et al. 2022). Ova organska jedinjenja karakteriše prisustvo dva ili više spojenih benzenovih prstenova, a nastaju prilikom nepotpunog sagorevanja organskog materijala (Patel et al. 2020). Za razliku od PAH sa dva ili tri prstena, oni sa većim brojem prstenova su postojaniji u životnoj sredini, a usled niskog napona pare adsorbuju se na PM u vazduhu i to uglavnom na čestice manjih dimenzija, poput $PM_{2,5}$ (Oliveira et al. 2016; Patel et al. 2020). Takođe, PAH sa većim brojem prstenova ispoljavaju veći toksikološki potencijal, jer imaju izrazito kancerogeno, mutageno i teratogeno dejstvo (Mallah et al. 2022).

Imajući u vidu da svaki izvor toksičnih elemenata i PAH dodatno povećava njihovu koncentraciju u $PM_{2,5}$, određivanje specifičnih izvora emisije je od velikog značaja jer doprinosi razumevanju distribucije toksičnih elemenata i PAH u vazduhu. Prirodni izvori elemenata u vazduhu su vulkanske erupcije, kosmička i terestrična prašina i požari, dok je prisustvo PAH u vazduhu uzrokovano vulkanskim erupcijama i požarima. Ipak, visoke koncentracije toksičnih elemenata i PAH u vazduhu uglavnom su posledica antropogenog zagađenja (Patel et al. 2020;

Luo et al. 2024). Urbane sredine naročito su pogođene kontaminacijom vazduha sa toksičnim elementima i PAH, a među glavnim izvorima prepoznati su saobraćaj, toplane uključujući individualna ložišta i različite grane industrije (Wang et al. 2022; Garcia et al. 2023).

Loš kvalitet vazduha u školama ne samo da negativno utiče na kognitivne sposobnosti učenika, već može imati i dugoročne štetne efekte na zdravlje (Dorizas et al. 2015; Baloch et al. 2020). Deca su naročito osetljiva na štetne efekte zagađenog vazduha, imajući u vidu vreme koje provode u školama, brži metabolizam, veći broj udisaja u minuti i intenzivan razvoj svih sistema u organizmu (Baloch et al. 2020; Sadrizadeh et al. 2022).

Na kvalitet vazduha u školi mogu da utiču različiti unutrašnji faktori, uključujući karakteristike zgrade i materijale u učionici, upotrebu hemikalija i druge ljudske aktivnosti (Morawska et al. 2017; Sadrizadeh et al. 2022; Thoua et al. 2022). Međutim, dominantan uticaj na kvalitet vazduha u učionici imaju spoljašnji izvori zagađenja, naročito u školama u urbanim sredinama koje imaju prirodnu ventilaciju (Baloch et al. 2020; Othman et al. 2022). Povećane koncentracije PM_{2,5} u spoljašnjoj sredini ne samo da doprinose njihovom infiltriranju u unutrašnji prostor, već imaju tendenciju da se akumuliraju i ponovo suspenduju kretanjem učenika, čime se dodatno povećava rizik po zdravlje (Oliveira et al. 2019). Razumevanje distribucije i toksičnog potencijala PM_{2,5} povezanog sa njihovim hemijskim sastavom je ključno za procenu zdravstvenog rizika i davanje smernica za smanjenje rizika po zdravlje učenika.

Zagađen vazduh dovodi do ozbiljnih zdravstvenih problema, što ukazuje da kvalitet vazduha mora redovno da se kontroliše i prati. S tim u vezi brojna istraživanja sve su više usmerena na razvoj metodologija koje bi doprinele efikasnijem proučavanju kvaliteta vazduha (Wang et al. 2023; Sannoh et al. 2024).

Metodom multivarijantne statističke analize moguće je utvrditi raspodelu i međusobnu zavisnost ispitivanih toksičnih elemenata i PAH koji ulaze u sastav PM_{2,5}, u cilju određivanja izvora i njihove distribucije u spoljašnjem i unutrašnjem prostoru. Ove metode koriste se u svrhu grupisanja podataka u sisteme na osnovu njihovih međusobnih sličnosti, odnosno razlika, ali i za razjašnjavanje odnosa među varijablama (Alameddine et al. 2022; Miletic et al. 2024). Kako bi se izvršila procena zdravstvenog rizika usled izloženosti toksičnim elementima i PAH razvijeni su različiti indeksi. Ovaj tip procene omogućava utvrđivanje mogućih nekancerogenih i kancerogenih efekata toksičnih elemenata i PAH na zdravlje ljudi.

Većina studija koje su ispitivale kvalitet vazduha u zatvorenom prostoru u školama opširno su istraživale parametre udobnosti, gasovite zagađujuće supstance i nivoe PM (Baloch et al. 2020; Sadrizadeh et al. 2022), dok je ispitivanje hemijskog sastava PM_{2,5} u zatvorenom prostoru i njihov uticaj na zdravlje učenika i dalje predmet opsežnog istraživanja (Morawska et al. 2017; Othman et al. 2022; Alves et al. 2023; Wang et al. 2023).

Iako je u Srbiji urađeno nekoliko studija u vezi sa procenom kvaliteta vazduha u školama (Jovanović et al. 2014; Lazović et al. 2014; Kovačević et al. 2015; Živković et al. 2015; Lazović et al. 2016) i vrtićima (Živković et al. 2023), istraživanje prirode i izvora PM_{2,5} su neophodna radi formulisane efikasne strategije kontrole za ublažavanje štetnih uticaja PM_{2,5} na zdravlje učenika.

U poslednjoj deceniji u Beogradu je uočljivo značajno povećanje intenziteta saobraćaja, industrijskih aktivnosti i stambene izgradnje, što je često dovodilo do prekoračenja granične vrednosti PM_{2,5}, povremeno svrstavajući Beograd među prestonice sa najzagađenijim vazduhom.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije usmeren je na problematiku zagađenja vazduha u školi, utvrđivanje međusobne povezanosti kvaliteta vazduha u školi i u dvorištu škole, kao i indentifikaciju potencijalnih izvora zagađenja sa najvećim uticajem na utvrđene promene. U ovoj doktorskoj disertaciji je primenjen integrisan pristup ispitivanja sastava i količine toksičnih elemenata i PAH koji se nalaze na PM_{2,5} i njihovog uticaj na zdravlje učenika kroz procenu zdravstvenog rizika specifičnog za svaki pojedinačni izvor.

2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Uzimajući u obzir neophodnost očuvanja i praćenja kvaliteta vazduha zbog sve većeg broja antropogenih aktivnosti koje smanjuju kvalitet vazduha, cilj istraživanja ove doktorske disertacije bio je kvantifikacija zagađujućih supstanci u vazduhu, pre svega toksičnih elemenata i PAH koji se nalaze na PM_{2,5} u učionici i dvorištu škole u grejnom i negrejnem periodu godine, određivanje izvora zagađenja i procena rizika po zdravlje učenika sa posebnim osvrtom na rizike povezane sa različitim izvorima zagađenja.

Procena zdravstvenog rizika za učenike korišćenjem determinističkog i probabilističkog pristupa, kombinacijom metoda faktorizacije pozitivne matrice (PMF; eng. *Positive matrix factorisation*) i Monte Karlo simulacije, omogućava bolji uvid u potencijalno štetan uticaj toksičnih elemenata i PAH koji potiču iz svakog pojedinačnog izvora zagađenja. Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije obuhvataju:

- ispitivanje kvaliteta vazduha i dobijanje relevantnih podataka o zagađenosti kroz određivanje količine zagađujućih supstanci u vazduhu, pre svega PM_{2,5} i prisustva toksičnih elemenata i PAH u njihovom sastavu, kao i u spoljašnjoj sredini i u učionici u hladnom i toplom periodu godine;
- komparativnu analizu spoljašnjeg i unutrašnjeg aerozagađenja i utvrđivanje njihove međusobne povezanosti, određivanjem odnosa spoljašnjeg i unutrašnjeg aerozagađenja, kao i primenom korelacione analize;
- utvrđivanje antropogenog uticaja na kvalitet vazduha, određivanjem izvora emisije toksičnih elemenata i PAH prisutnih na PM_{2,5}, ispitivanjem uticaja svakog pojedinačnog izvora i utvrđivanje povezanosti između toksičnih elemenata i PAH primenom tehnika multivarijantne statističke analize kao što su: faktorske analize dijagnostičkih odnosa i PMF. Rezultati dobijeni primenom kombinacije savremenih statističkih metoda pomažu u razumevanju aspekata zagađenja vazduha, odnosno izvora i distribucije aerozagađenja, sa posebnim osvrtom na međusobnu povezanost zagađenja vazduha u spoljašnjoj sredini i u učionici;
- procenu zdravstvenog rizika specifičnog za svaki element i PAH, kombinovani efekat elemenata i PAH, povezanih sa izvorima emisije, kako bi se bolje razumeo uticaj pojedinačnih zagađujućih supstanci na zdravlje učenika. Ova procena predstavlja kombinaciju dve metode i to metode procene zdravstvenog rizika i PMF. Svaki izvor toksičnih elemenata i PAH drugačije utiče na njihovu zastupljenost i distribuciju u vazduhu. Stoga je određivanje potencijalnih izvora zagađenja vazduha od velike važnosti za procenu zdravstvenog rizika;
- određivanje zdravstvenog rizika koji mogu izazvati toksični elementi i PAH prisutni u PM_{2,5} vazduha kombinacijom determinističkog i probabilističkog pristupa u cilju boljeg razumevanja uticaja parametara rizika specifičnog za svaki pojedinačni izvor toksičnih elemenata i PAH.

Ova istraživanja bi trebalo da doprinesu boljem razumevanju varijabilnosti, dinamike i distribucije toksičnih elemenata i PAH koji ulaze u sastav PM_{2,5} u spoljašnjem i unutrašnjem prostoru, što je ključno za procenu zdravstvenog rizika u školi. Takođe, precizno tumačenje dobijenih rezultata u ovoj disertaciji bi doprinelo davanju smernica za smanjenje rizika po zdravlje učenika.

3. TEORIJSKI DEO

3.1. Zagađenje vazduha

Zagađenje vazduha štetno deluje na zdravlje i životnu sredinu i predstavlja jedan od najvećih ekoloških problema. Imajući u vidu da zagađen vazduh štetno utiče na zdravlje ljudi na različite načine, u zavisnosti od vrste zagađenja, izloženosti (akutno i hronično) i puteva unošenja u organizam (ingestija, dermalno ili inhalacija), ukazuje na kompleksnost štetnog delovanja na zdravlje (Kampa and Castanas 2008; Shahrabaf et al. 2021).

Danas oko 99% svetske populacije živi u regionima gde je nivo aerozagađenja iznad preporučenih vrednosti od strane Svetske zdravstvene organizacije (SZO) (WHO 2021). Pored toga, stanovnici zemalja sa niskim i srednjim nacionalnim bruto dohotkom često su izloženi ekstremno visokom nivou zagađenja vazduha. Usled izloženosti zagađenom vazduhu svake godine prerano umre oko 7 miliona ljudi (WHO 2021). Takođe, stopa mortaliteta ljudi koji žive u gradovima sa višim nivoima zagađenja vazduha je za 15-20% veća u poređenju sa gradovima sa čistijim vazduhom (Mashitani et al. 2016). Na nivou Evropske unije skoro pola miliona smrtnih slučajeva dovodi se u vezu sa zagađenjem vazduha (Mendell et al. 2016). Kako bi se umanjio štetan efekat zagađenog vazduha, doneti su brojni zakoni i uredbe kojima se definišu gornje koncentracije zagađujućih supstanci u vazduhu.

Atmosferski vazduh čini mešavina različitih gasovitih, čestičnih i bioloških komponenti. Iako je kvalitet vazduha u direktnoj zavisnosti od koncentracije štetnih komponenti, zagađenje vazduha predstavlja dinamičan proces na koji utiču brojni faktori.

Različiti izvori zagađenja emituju u vazduh primarne supstance, koje potom u interakciji sa drugim supstancama pod različitim atmosferskim uslovima stvaraju sekundarne produkte (Vallero 2014). Takođe, uticaj vremenskih uslova i prostorna ekspozicija su važni činioci koji utiču na nivo zagađenja vazduha na nekom terenu, kao i na dužinu trajanja zagađenja (Ito et al. 2007).

Izvori zagađenja vazduha dele se na prirodne i antropogene. Međutim, u urbanim sredinama antropogene aktivnosti imaju dominantan uticaj na kvalitet vazduha. Među glavnim izvorima zagađenja vazduha u urbanoj sredini ističu se sagorevanje fosilnih goriva, saobraćaj i različite grane industrije (Manisalidis et al. 2020). Od gasovitih supstanci najčešće izučavani su štetni uticaji sumpor-dioksida (SO_2), azot-dioksida (NO_2), ozona (O_3), ugljen-monoksida (CO), ugljen-dioksida (CO_2), formaldehida (HCHO) i isparljivih ugljovodonika (VOC; eng. *volatile organic compound*). Pored gasne faze, posebnu pažnju u pogledu štetnog uticaja na zdravlje imaju suspendovane čestice (PM, eng. *particulate matter*) u vazduhu (Ito et al. 2007; Xiaoyan et al. 2015).

3.2. Fine čestice ($\text{PM}_{2,5}$) suspendovane u vazduhu i uticaj na zdravlje

Čestice u vazduhu predstavljaju mešavinu čvrstih i tečnih aerosola različitih veličina, oblika i hemijskog sastava (Vallero 2014). Inicijator formiranja jezgra PM uglavnom predstavlja elementarni ugljenik (Zhang et al. 2018). Pored ugljenika i vode, u sastavu $\text{PM}_{2,5}$ nalaze se različiti neorganski elementi, joni i minerali, zatim organska jedinjenja poput ugljovodonika, PAH i VOC, i biološki materijal prisutan u vazduhu.

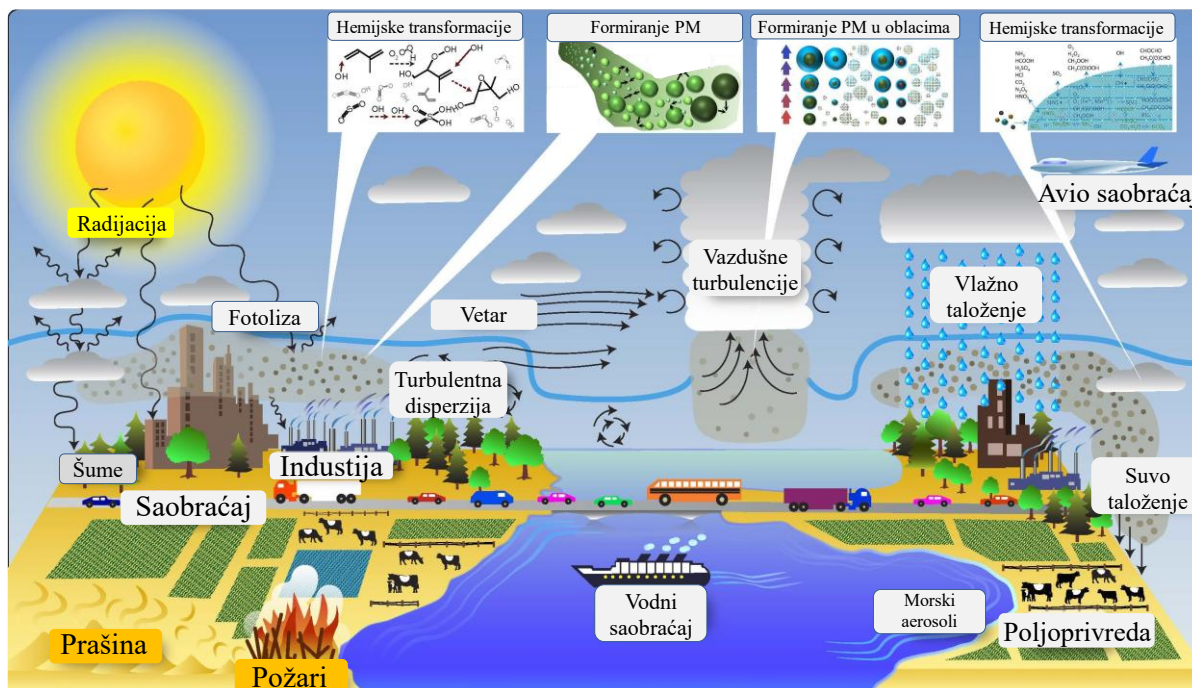
Primarno PM se emituju u atmosferu iz prirodnih izvora, kao što su resuspendovana prašina, vulkanske erupcije i šumski požari ili iz antropogenih izvora, poput sagorevanja fosilnih goriva, biomase, saobraćaja i različitih grana industrije.

Sekundarne PM nastaju u atmosferi usled fizičkih i hemijskih transformacija. U studijama koje su izučavale poreklo i raspodelu izvora $\text{PM}_{2,5}$ pokazano je da 37-82% su sekundarne

čestice, koje nastaju usled sagorevanja biomase (11-21%) i od saobraćaja (37%) (Amato et al. 2016; Oliveira et al. 2019).

PM se najčešće klasifikuju na osnovu veličine na PM₁₀ (krupne), veličine 2,5-10 µm i PM_{2,5} (fine) veličine < 2,5 µm i ultra fine čestice veličine ≤ 0,1 µm.

Na prostornu i vremensku distribuciju PM utiču izvori emisije, disperzija čestica i klimatski uslovi (**Slika 1**).



Slika 1. Izvori i distribucija PM_{2,5}. Preuzeto i modifikovano iz (<https://www.epa.gov/cmaq/overview-science-processes-cmaq>).

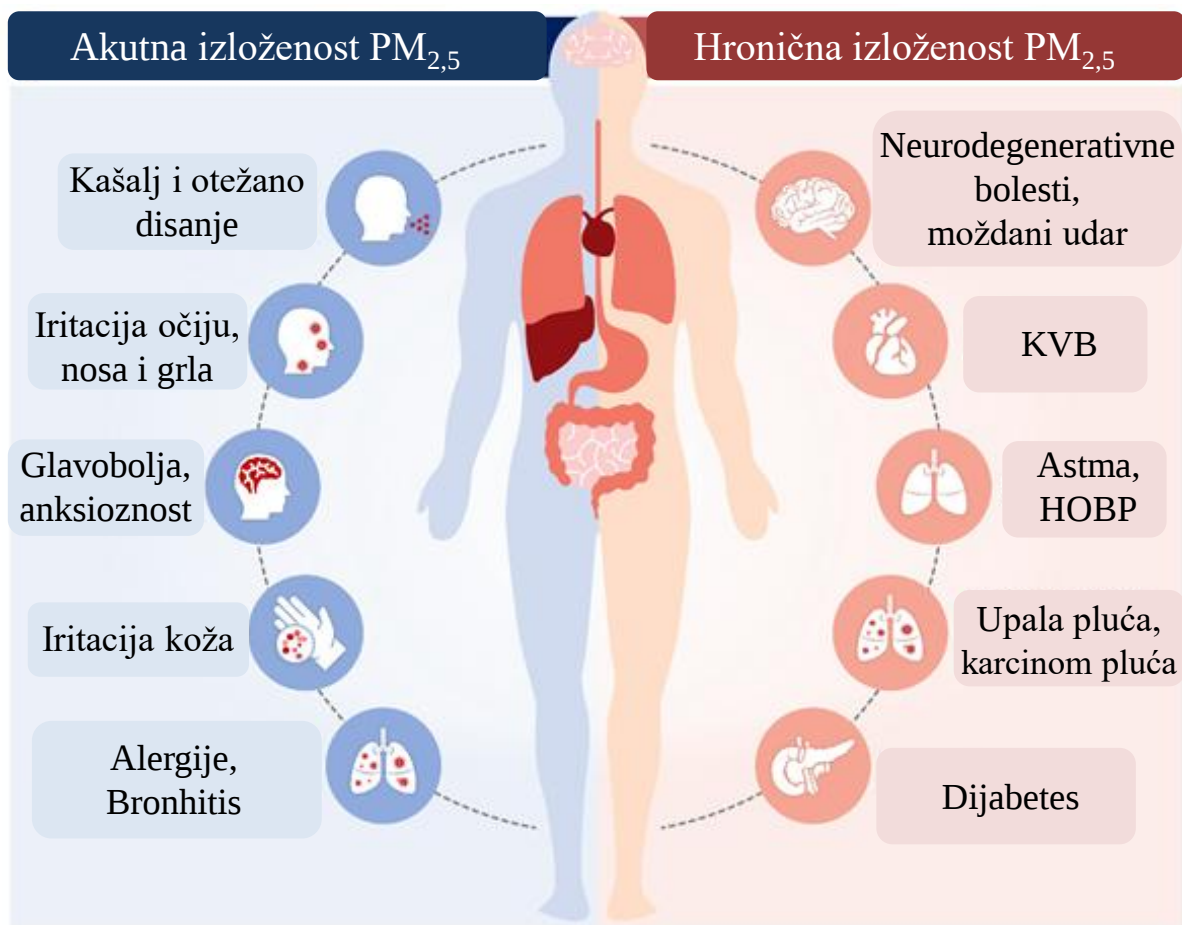
Nakon emisije, PM se uglavnom raznose na različite udaljenosti od izvora zagađenja, u zavisnosti od njihove veličine, meteoroloških uslova i konfiguracije terena (Ito et al. 2007). Veće PM se brzo talože nakon emisije, dok PM_{2,5} mogu da ostanu u vazduhu i do nekoliko meseci i da se prenesu na velike razdaljine (Yang et al. 2019).

Iako je koncentracija PM najveća u urbanim i industrijskim zonama, posebno zabrinjava prisustvo PM u oblastima udaljenim od izvora emisije (Jovanović et al. 2020; Manisalidis et al. 2020). Na povećanje koncentracije PM na mestima udaljenim od primarnih izvora mogu da utiču vetar, vazdušne turbulencije, vazdušne mase, kao i specifičnost lokacije. Stoga, pored izučavanja izvora i sastava PM predmet brojnih istaživanja bio je izučavanje mobilnosti i transporta PM na regionalnom nivou, sa posebnim osvrtom na sezonsku distribuciju (Cong et al. 2010; Ewing et al. 2010).

Kako bi se razumeli procesi distribucije PM primenjuje se nekoliko analitičkih pristupa, kao što su: metode raspodele PM_{2,5} zasnovane na proceni koncentracija dobijenih iz monitoringa, metode zasnovane na modelima procene disperzije za simulaciju emisije, transporta i taloženja PM_{2,5} i statističke procene podataka zasnovane na receptorskim modelima kako bi se identifikovali izvori PM_{2,5} i njihova distribucija (Jovanović et al. 2020; Lee et al. 2024). Posebno su opasne PM manjih veličina koje sadrže teške metale ili PAH (Wei and Yang 2010). Upravo zbog toga, analiza hemijskog sastava PM je od velike važnosti kako bi se procenio rizik po zdravlje ljudi.

3.2.1. Uticaj PM_{2,5} na zdravlje

Toksičnost PM zavisi od veličine čestica, strukture, koncentracije u vazduhu, rastvorljivosti i hemijskog sastava (Thangavel and Park 2022; Kumar et al. 2023). Unete u organizam putem udisanja, PM₁₀ dospevaju do gornjih delova respiratornog sistema, zbog čega se još nazivaju i torakalnim česticama. Sa druge strane, PM_{2,5} dospevaju u donje disajne puteve, nazivaju se još i respirabilne čestice. Za razliku od PM₁₀ čiji su toksikološki efekti uglavnom lokalnog karaktera, povezani sa različitim komplikacijama respiratornog sistema, PM_{2,5} lako prodiru u krvotok izazivajući različite zdravstvene probleme u celom organizmu (**Slika 2**).



Slika 2. Pregled glavnih zdravstvenih komplikacija usled kratkotrajne i dugotrajne izloženosti PM_{2,5}. KVB - Kardiovaskularne bolesti; HOBP - Hronična opstruktivna bolest pluća. Preuzeto i modifikovano iz (Basith et al. 2022).

Epidemiološke i toksikološke studije ukazuju na međusobnu povezanost povećane koncentracije PM_{2,5} u vazduhu i povećanih zdravstvenih komplikacija, kao i stope mortaliteta (Hayes et al. 2020; Dominici et al. 2022; Guo et al. 2022). Analizom stope mortaliteta u periodu od 2000. do 2019. godine pokazano je da usled kratkotrajne izloženosti PM_{2,5} godišnje prevremeno umre oko milion ljudi (Yu et al. 2024).

Podaci globalne mreže o bolestima (eng. *Global Burden of Disease*) ukazuju da usled ukupne izloženosti PM_{2,5} svake godine prevremeno umre preko 4,5 miliona ljudi (Bu et al. 2021). Takođe, PM_{2,5} se svrstavaju među deset vodećih faktora rizika za razvoj bolesti (Sang et al. 2022). Procenjuje se da približno 50% bolesti nastaje kao posledica zagađenja vazduha

u zatvorenom prostoru, dok je 30% svih bolesti uzrokovano izloženosti PM u zatvorenom prostoru (Morawska et al. 2013; Hänninen et al. 2021; Ćujić et al. 2023).

Prevalencija raka i drugih zdravstvenih problema znatno je veća u sredinama sa povišenim atmosferskim koncentracijama PM_{2,5} (Maji et al. 2018; Saini and Sharma 2020). Pored toga, izloženost PM_{2,5} povećava rizik od razvoja bolesti jetre, kostiju, očiju, poremećaj funkcije hormona, kao i brojne komplikacije tokom trudnoće i kod novorođenčadi (Guo et al. 2022; Thangavel and Park 2022). Osim povišenih nivoa, toksični potencijal PM_{2,5} prvenstveno je povezan sa njegovim hemijskim sastavom (Alves et al. 2023; Garcia et al. 2023).

3.3. Elementi u tragovima u ambijentalnom vazduhu

Brza urbanizacija i industrijalizacija, često praćene neadekvatnim odnosom prema životnoj sredini, uključujući uništavanje prirodnih staništa i stvaranje divljih deponija u najvećoj meri doprinose povećanoj koncentraciji elemenata u atmosferi (Vardhan et al. 2019).

Prirodni izvor elemenata predstavlja matični materijal iz koga elementi dospevaju u atmosferu različitim prirodnim procesima, poput vulkanskih erupcija, erozija i vetra. Takođe, značajan doprinos emisiji elemenata u atmosferu predstavljaju požari, morska voda i kosmička prašina (Vithanage et al. 2022).

Ipak glavni uzrok visokih koncentracija elemenata u vazduhu su različite aktivnosti čoveka. Prisutvo elementa poput Pb, Cd i Hg na visokim planinama kao i u najudaljenijim delovima Arktika i Antarktika ukazuju na štetan uticaj čoveka na kvalitet vazduha na globalnom nivou. Među glavnim izvorima elemenata ističu se različite grane industrije uključujući rudarstvo, saobraćaj, sagorevanje fosilnih goriva za proizvodnju toplotne energije i poljoprivreda. Rudarstvo i industrija proizvodnje metala su među glavnim izvorima emisije elemenata u atmosferi.

U studiji sprovedenoj u jednom industrijskom gradu u Rumuniji izmerene su visoke koncentracije As, Cd, Ni i Pb u atmosferi, koje su bile nekoliko puta veće od prosečnih vrednosti za ove metale u Rumuniji (Bodor et al. 2021). Ispitivanje sastava elemenata prisutnih na PM_{2,5} u urbanoj i industrijskoj sredini u Srbiji (Jovanović et al. 2020), pokazala je da su koncentracije PM_{2,5} bile iznad preporučenih dnevnih vrednosti u obe gradske sredine, dok su koncentracije većine elemenata, posebno potencijalno kancerogenih elemenata kao što su As, Cd i Pb, bile značajno veće u gradu sa teškom industrijom (Jovanović et al. 2020).

Ispitivanje izvora elemenata u tragovima u PM_{2,5} u ruralnim mestima utvrđeno je da su glavni uzročnici emisije elemenata zemljana prašina, industrija, sekundarne formacije, saobraćaj i sagorevanje uglja i biomase (Liu et al. 2020).

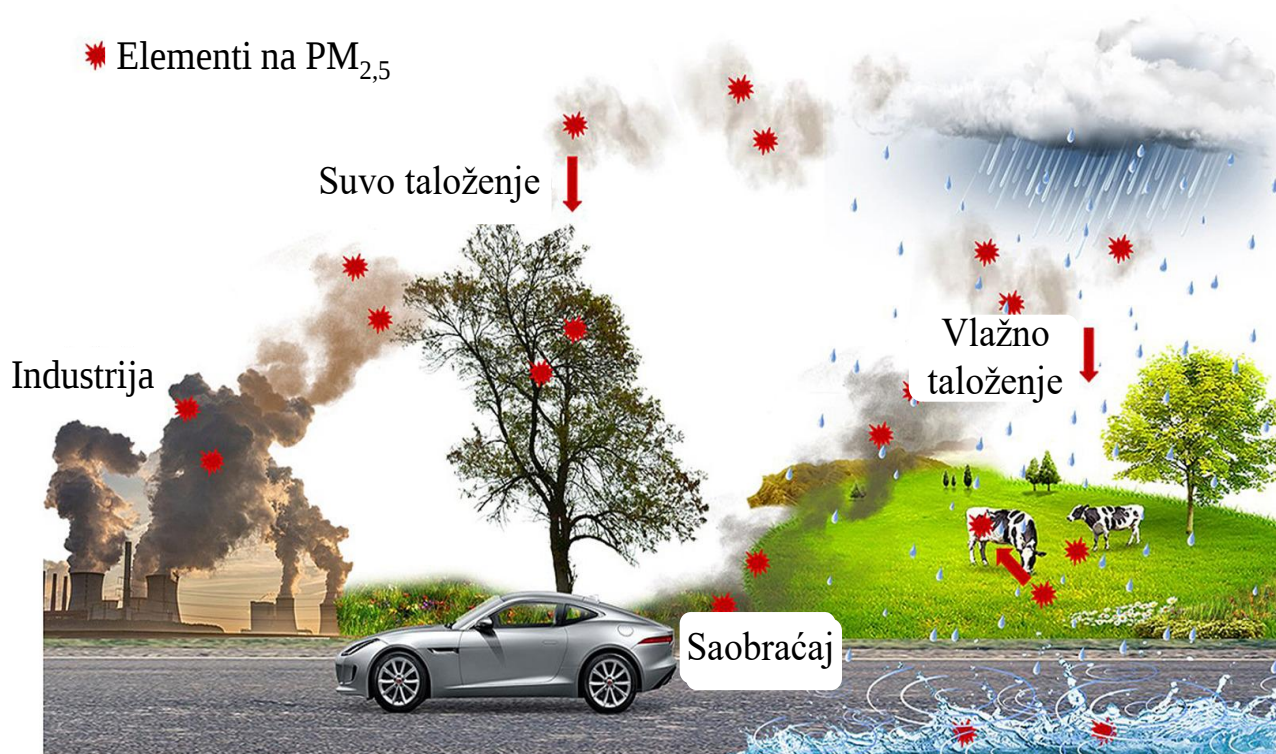
Analiza elemenata u tragovima u PM_{2,5} u primorskom gradu na severu Poljske ukazala je sezonsku varijabilnost, pri čemu su koncentracije Cd, Cu, Mo, Ni, V i Zn bile značajno veće zimi u odnosu na proleće ili leto, što ukazuje na sagorevanje fosilnih goriva za proizvodnju toplotne energije kao glavni izvor, dok je emisija elemenata iz brodova imala najveći doprinos tokom letnjeg perioda (Siudek 2020).

Saobraćaj predstavlja jedan od glavnih izvora elemenata prisutnih na PM u velikim gradovima (**Tabela 1**) (Vithanage et al. 2022). Koncentracije teških metala poput Cd, Sb, Zn, Cu, Pb, As i Ni su značajno veće od graničnih vrednosti u mikrokruženju saobraćajnica (Zhang et al. 2018).

Tabela 1. Emisija elemenata iz saobraćaja (Vithanage et al. 2022).

Izvori	Elementi												
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Pd	Pt	Rh	Sb	V	Zn
Baterije					■	■	■				■		
Kočnice			■	■			■				■		■
Katalizatori								■	■	■			
Gorivo	■	■		■	■		■				■		
Pocinkovani delovi		■		■									■
Svetla					■								
Ulje		■	■	■								■	■
Boje							■						
Gume		■	■	■		■	■						■

Pored izvora emisije elemenata, na koncentraciju i distribuciju elemenata u atmosferi utiču različiti faktori, poput sezonskih varijacija, vetra, temperature i vlažnosti vazduha (Gunawardena et al. 2013). Takođe, na prisustvo elemenata u atmosferi utiču različiti oblici taloženja (**Slika 3**).



Slika 3. Distribucija i depozicija elemenata prisutnih na PM_{2,5}. Preuzeto i modifikovano iz (Vithanage et al. 2022).

Pojam elementa u tragovima odnosi na prisustvo različitih toksičnih elemenata koji se u životnoj sredini nalaze u malim koncentracijama a mogu da izazovu različite zdravstvene komplikacije. Prisustvo elemenata u tragovima u vazduhu, pored direktnog uticaja na zdravlje, može indirektno da utiče na zdravlje usled kontaminacije vode, zemljišta i vegetacije (Manisalidis et al. 2020).

Iako se većina elementa nalazi u organizmu u fiziološkim uslovima, povišene koncentracije elemenata dovode do različitih poremećaja u svim sistemima u organizmu (Kampa and Castanas 2008; Saravanan et al. 2022).

Posebno su štetni teški metali poput Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se i V koji se akumuliraju u organizmu. Glavni izvor arsena u vazduhu predstavlja sagorevanje fosilnih goriva, posebno sagorevanje uglja i u manjoj meri metalurška industrija (Tian et al. 2013). Dugotrajna izloženost arsenu dovodi do povećanog rizika od melanoma i raka pluća. Sagorevanje uglja i lož ulja, metalurška industrija i saobraćaj su glavni izvori Cd i Ni (Tian et al. 2013; Xiaoyan et al. 2015). Hronična izloženost Cd i Ni može da dovede do oštećenja bubrega i kostiju, endokrinih poremećaja, kao i razvoja različitih maligniteta (Kampa and Castanas 2008).

Kako bi se utvrdio štetan efekat elemenata na zdravlje koriste se različiti indeksi procene rizika. Koeficijent opasnosti (HQ; eng. *Hazard Quotient*) i indeks opasnosti (HI; eng. *Hazard Index*) se koriste za procenu nekancerogenog rizika usled izloženosti elementima, dok se kancerogeni rizik (CR; eng. *Carcinogenic Risk*) i ukupan rizik od kancera (TCR; eng. *Total Carcinogenic Risk*) primenjuju za procenu kancerogenog rizika kod ljudi (Vithanage et al. 2022).

3.4. Policiklični aromatični ugljovodonici u ambijentalnom vazduhu

Nepotpuno sagorevanje organskog materijala predstavlja glavni uzrok širokog prisustva PAH u životnoj sredini (Patel et al. 2020).

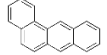
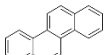
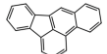
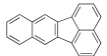
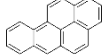
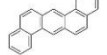
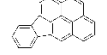
PAH su velika grupa organskih jedinjenja, izgrađenih od dva ili više spojenih aromatičnih prstenova sa različitim fizičko-hemijskim svojstvima (**Tabela 2**). Na osnovu broja prstenova PAH se mogu klasifikovati na PAH manje molekulske težine, koje čine PAH sa dva ili tri aromatična prstena i PAH veće molekulske težine sa četiri ili više aromatičnih prstenova (Chaturvedi et al. 2023).

U atmosferi PAH se nalaze u gasnoj fazi ili adsorbovani na česticama. Na raspodelu PAH između ove dve faze utiču mnogi faktori pre svega molekulska težina, rastvorljivost u vodi i pritisak pare PAH, zatim vlaga i temperatura vazduha, padavine, sunčevo zračenje, kao i koncentracija slobodnih radikala u vazduhu poput ozona, hidroksilnih i nitratnih radikala (Dat and Chang 2017; Oliveira et al. 2019).

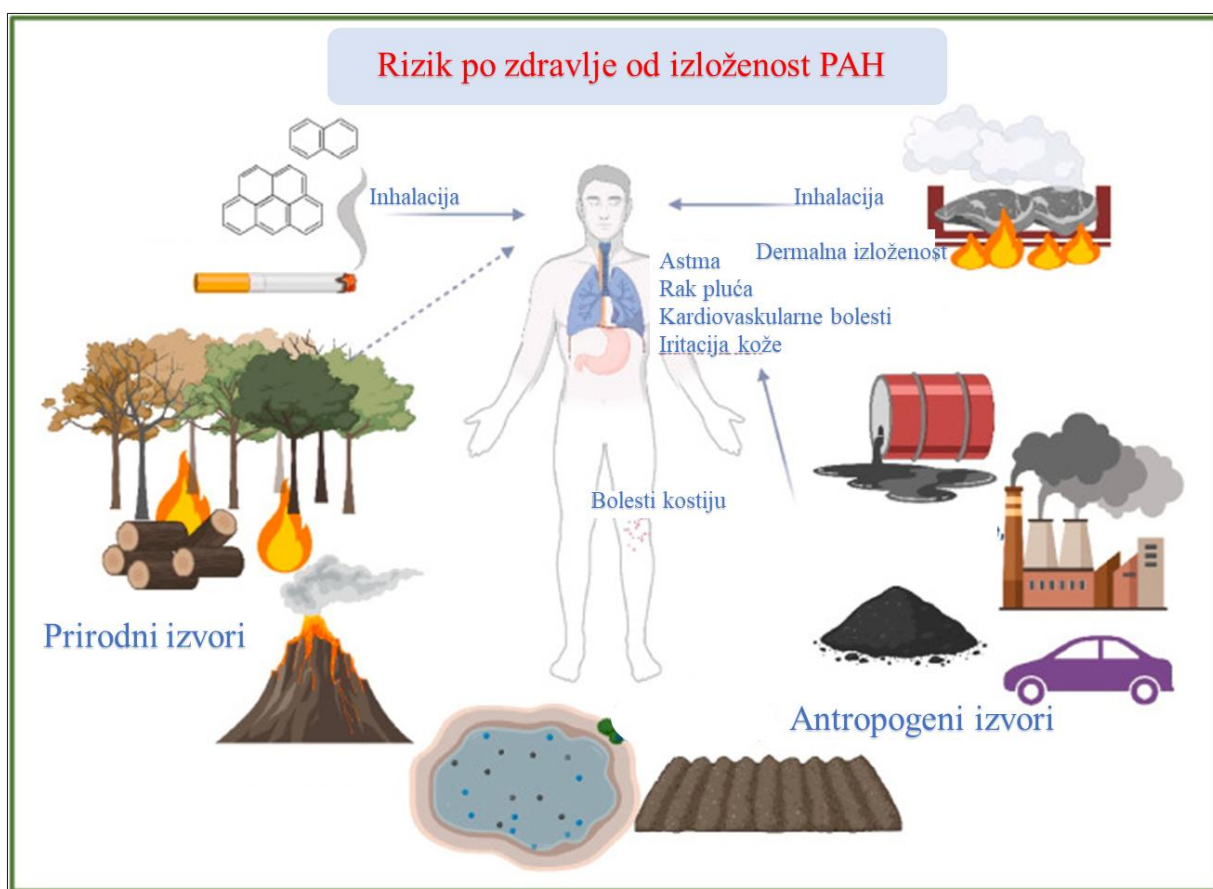
PAH sa većim brojem prstenova, usled niskog napona pare i smanjene rastvorljivosti u vodi se uglavnom adsorbuju na PM i to one manjeg prečnika, kao što su PM_{2,5} (Oliveira et al. 2016; Patel et al. 2020). Takođe, PAH sa većom molekulskom težinom su postojaniji i teže se razgrađuju u prirodnim uslovima (Premnath et al. 2021). Pored toga, PAH sa većim brojem prstenova ispoljavaju veći toksikološki potencijal i imaju izražene kancerogene, mutagene i teratogene efekte (Mallah et al. 2022).

Epidemiološke studije ukazuju na direktnu povezanost između izloženosti PAH i visokog rizika od metaboličkih i kardiovaskularnih bolesti (Holme et al. 2019; Mallah et al. 2022). Iako se u atmosferi može detektovati više stotina različitih PAH, šesnaest prioriternih PAH označenih od Agencije za zaštitu životne sredine Sjedinjenih američkih država se ističe po izrazito štetnom delovanju na zdravlje (US EPA) (Wang et al. 2021).

Tabela 2. Fizičko-hemijska svojstva 16 prioritetnih PAH

PAH	Struktura	Molekulska težina (g/mol)	Rastvorljivost u vodi (mg/L)	Tačka topljenja (°C)	Tačka ključanja (°C)	Pritisak pare (mmHg)
Naftalen		128,17	31	80	218	11,9
Acenaftilen		152,20	3,8	92-93	280	3,86
Acenaften		154,21	16,1	95	279	0,50
Fluoren		166,22	1,9	116-117	295	0,43
Fenantren		178,23	1,1	100	339	$9,07 \times 10^{-2}$
Antracen		178,23	0,045	218	340	$3,4 \times 10^{-3}$
Fluoranten		202,26	0,26	111	375-393	$1,08 \times 10^{-3}$
Piren		202,26	0,132	156	360-404	$5,67 \times 10^{-4}$
Benzo(a)antracen		228,29	0,011	158	435	$6,52 \times 10^{-7}$
Krizen		228,29	0,0015	254	448	$1,04 \times 10^{-6}$
Benzo(b)fluoranten		252,32	0,0015	168	168	$1,07 \times 10^{-5}$
Benzo(k)fluoranten		252,32	0,0008	215	217	$1,28 \times 10^{-8}$
Benzo(a)piren		252,32	0,0038	179	496	$6,52 \times 10^{-7}$
Dibenz(a,h)antracen		278,35	0,0005	262	262	$2,80 \times 10^{-9}$
Indeno(1,2,3-c,d)piren		276,34	0,062	164	536	$1,30 \times 10^{-8}$
Benzo(g,h,i)perilen		276,34	0,00026	273	525	$1,33 \times 10^{-8}$

Prema poreklu PAH, izvori emisije se dele na prirodne i antropogene izvore. Prirodne izvore predstavljaju vulkanske erupcije i požari, ali je njihov ukupan doprinos zagađenju vazduha manje značajan u poređenju sa aktivnostima čoveka (**Slika 4**) (Venkatraman et al. 2024). Među glavnim izvorima PAH antropogenog porekla ubrajaju se industrija, saobraćaj, grejanje i poljoprivreda (Mishra et al. 2016; Patel et al. 2020). Različite grane industrije, kao što su proizvodnja metala, boja i lakova, guma, pesticida, cementa, električne energije i spaljivanje otpada doprinose velikoj emisiji PAH u atmosferu (Chaturvedi et al. 2023). Značajan izvor emisije PAH predstavlja saobraćaj, uključujući drumski, vodni i vazdušni (Venkatraman et al. 2024). Takođe, različiti sistemi grejanja, uključujući individualna ložišta u velikoj meri doprinose povećanim koncentracijama PAH u vazduhu (Patel et al. 2020). U ruralnim sredinama usled sagorevanja biomase i poljoprivrednog otpada dovode do povećane emisije PAH, koje mogu biti toliko velike da se transportuju i do urbanih područja (Cui et al. 2022). U zatvorenom prostoru, najveći izvori PAH su dim i vatra bilo od sagorevanja drveta ili drugih materijala, kuvanje i duvanski dim (Oliveira et al. 2019).



Slika 4. Izvori PAH i efekti na zdravlje. Preuzeto i modifikovano iz (Venkatraman et al. 2024).

Prema načinu nastanka PAH, izvori se mogu klasifikovati u tri kategorije: pirogeni tokom kojih dolazi do nepotpunog sagorevanja organskog materijala na veoma visokim temperaturama (350-1.200°C), petrogeni tokom kojih nastaju PAH od nafte i njenih derivata i biogeni koji generišu PAH usled sporog raspadanja organskog materijala ili tokom različitih metaboličkih procesa mikroorganizama, algi i biljaka (Mojiri et al. 2019; Marris et al. 2020; Patel et al. 2020).

Koncentracija PAH varira tokom godine, pri čemu se najveće koncentracije beleže tokom zime i proleća (Oliveira et al. 2019). Tokom hladnih meseci, pored sagorevanja različitih tipova goriva za proizvodnju toplotne energije, povećana koncentracija PAH nastaje kao rezultat smanjenja fotodegradacije i difuzije PAH u atmosferi usled atmosferskih uslova (Miura et al. 2019; Siudek 2022).

Izloženost PAH predstavlja ozbiljan rizik po zdravlje, pri čemu su naročito pogođene osetljivije grupe stanovništva kao što su deca (Oliveira et al. 2019). Sveopšte prisustvo PAH u različitim sferama kao što su vazduh, voda i zemljište ukazuju na izrazit negativan efekat čoveka na prirodu. Takođe, PAH se detektuju u biljkama, hrani, piću kao i u različitim proizvodima široke namene uključujući i igračke za decu (Patel et al. 2020). Čovek može biti izložen PAH udisanjem zagađenog vazduha, konzumiranjem kontaminirane hrane i vode i kontaktom preko kože (Holme et al. 2019; Mallah et al. 2022).

Udisanje PAH je najčešći način izlaganja i izrazito opasan po zdravlje, jer preko pluća PAH relativno lako dospevaju u krvotok (Mallah et al. 2022; Venkatraman et al. 2024). Međunarodna agencija za istraživanje raka (eng. International Agency for Research on Cancer) klasifikovala je BaP kao kancerogen za ljude, grupa I (IARC 2010).

Procena rizika usled izloženosti PAH određuje se primenom standarda i preporuka različitih stručnih organizacija, kao što su Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (USEPA) i SZO. Najčešće korišćeni indeksi procene rizika usled izloženosti PAH putem inhalacije kancerogeni rizik koji predstavlja ekvivalent toksičnosti (TEQ; eng. *Toxic equivalent quantities*) u odnosu na BaP, kao i rizik od karcinoma pluća tokom života (LLCR; eng. *Lifetime lung cancer risk*).

3.5. Zagađenje vazduha u školama

Poređenjem različitih faktora rizika pokazano je da loš kvalitet vazduha u unutrašnjem prostoru predstavlja vodeći uzrok smrtnosti i smanjenja dužine života (Lelieveld et al. 2020). Imajući u vidu da zagađenje vazduha u unutrašnjem prostoru predstavlja značajan faktor rizika po zdravlje, velika pažnja naučnih istraživanja usmerena je ka ispitivanju kvaliteta vazduha u školama (Kumar et al. 2023).

S obzirom na razvojnu fazu učenika i značajno vreme koje provode u školi, loš kvalitet vazduha ne samo da može da smanji sposobnost učenika da efikasno uče, već može imati i dugoročne negativne efekte na njihovo zdravlje (**Tabela 3**) (Oliveira et al. 2019; Baloch et al. 2020). U cilju preciznijeg sagledavanja uticaja kvaliteta vazduha na zdravlje učenika oformljena je multinacionalna mreža na nivou Evrope (SYMPHONY) (Baloch et al. 2020).

Tabela 3. Uticaj kvaliteta vazduha u učionicama na kognitivne sposobnosti učenika

Parametri	Merenja kognitivnih performansi ili stope učenja ili odsustva učenika	Rezultati	Literatura
Nivo CO ₂	Brzina rešavanja testova, koncentracija i pažnja	Snižen nivo CO ₂ , veća postignuća	(Coley et al. 2007; Sarbu and Pacurar 2015)
Nivo CO ₂	Odsustvo iz škole zbog bolesti	Manji broj odsustava iz škole zbog snižene koncentracije CO ₂ u učionici	(Shendell et al. 2004; Gaihare et al. 2014; Kolarik et al. 2016)

Parametri	Merenja kognitivnih performansi ili stope učenja ili odsustva učenika	Rezultati	Literatura
Termalni parametri i provetravanje	Rešavanje zadataka iz matematike i jezika	Veća postignuća u rešavanju zadataka sa povećanom stopom provetravanja	(Bakó-Biró et al. 2012; Hviid et al. 2020)
Termalni parametri i provetravanje	Odsustvo iz škole zbog bolesti	Veći broj izostanaka iz škole zbog bolesti uzrokovan manjom stopom provetravanja	(Simons et al. 2010)
Nivo CO₂, termalni parametri i provetravanje	Rešavanje zadataka iz matematike i jezika	Veća postignuća u rešavanju zadataka sa sniženom koncentracijom CO ₂ i povećanom stopom provetravanja	(Haverinen-Shaughnessy et al. 2011; Haverinen-Shaughnessy and Shaughnessy 2015; Mendell et al. 2016; Petersen et al. 2016)
Nivo PM i provetravanje	Čitanje i dostignuća iz matematike	Veća dostignuća u rešavanju zadataka sa većom stopom provetravanja i nižom koncentracijom PM	(Kabirikopaei et al. 2021)
Nivo PM, CO₂ i provetravanje	Odsustvo iz škole zbog bolesti	Veći broj izostanaka iz škole u vezi sa višom koncentracijom PM u grejnom periodu, smanjenim provetravanjem i višom koncentracijom CO ₂ u negrejnem periodu.	(Deng et al. 2021)

Na kvalitet vazduha u školama utiču različiti faktori, pre svega kvalitet vazduha u spoljašnjoj sredini, zatim ljudske aktivnosti, kvalitet zgrade i materijala unutar učionice i upotreba hemikalija (Morawska et al. 2017; Dimitroulopoulou et al. 2023). Škole koje se nalaze u urbanoj sredini naročito su pogođene štetnim delovanjem zagađenog vazduha, pri čemu je pokazano da je povećana koncentracija PM_{2,5} u učionici direktna posledica povećane koncentracije PM_{2,5} u spoljašnjoj sredini (Carrion-Matta et al. 2019; Oliveira et al. 2019; Othman et al. 2019; Wang et al. 2023). Takođe, pokazano je da se PM_{2,5} mogu akumulirati u učionicama i resuspendovati usled kretanja učenika, što doprinosi dodatnom zagađenju vazduha u učionici (Amato et al. 2014; Morawska et al. 2017).

Uzajamna povezanost između unutrašnjeg i spoljašnjeg vazduha naročito je izražena u školama sa prirodnom ventilacijom. Uticaj spoljašnjeg zagađenja na kvalitet vazduha u učionici zavisi od stepena razmene vazduha. Periodično otvaranje prozora dovodi do infiltracije PM_{2,5} iz spoljašnje sredine u unutrašnju. Takođe, sezonske promene značajno utiču na razmenu vazduha u školama, jer se u zimskim mesecima usled nižih temperatura prozori manje otvaraju, a samim tim i razmena spoljašnjeg i unutrašnjeg vazduha je manja. Međutim, ređe otvaranje prozora može dovesti do akumulacije PM_{2,5} u učionici (Sadrizadeh et al. 2022).

Meteorološki uslovi utiču na distribuciju aerozagađenja između unutrašnjeg i spoljašnjeg prostora (Huang et al. 2021; Ray et al. 2024). Korelacione analize ukazuju da temperatura i vlažnost vazduha i vetar utiču na koncentraciju PM_{2,5} u zatvorenom prostoru (Sadrižadeh et al. 2022). U toplom periodu godine kada je temperatura vazduha u spoljašnjoj sredini veća nego u zgradama, stvara se temperaturni gradijent koji pogoduje većem strujanju vazduha u hladniji prostor, a samim tim i povećanju aerozagađenja u unutrašnjem prostoru (Goyal and Khare 2009). Takođe, veća vlažnost vazduha u toku negrejne sezone smanjuje koncentraciju PM_{2,5} u spoljašnjoj sredini, tako da ista raste u unutrašnjem prostoru (Zhao et al. 2021; Zender-Świercz et al. 2024). Iako vetar povoljno utiče na smanjenje koncentracije PM_{2,5} u isto vreme može povećati infiltraciju u unutrašnji prostor spoljašnjih čestica (Liu et al. 2023; Zender-Świercz et al. 2024).

Većina studija koje su ispitivale kvalitet vazduha u školama opširno su istraživale parametre udobnosti, zagađujućih gasova, pre svega CO₂ i VOC i nivoe PM.

VOC predstavljaju grupu različitih organskih jedinjenja prisutnih u vazduhu u unutrašnjem prostoru, od kojih su najpoznatiji HCHO, benzen, toluen, naftalen i ksilen. Izvori VOC u unutrašnjem prostoru su različiti materijali, nameštaj, smole, lepkovi, boje, hemikalije za čišćenje i tepisi, dok u spoljašnjoj sredini pored ostalih izvora, saobraćaj predstavlja glavni izvor VOC u urbanim sredinama (Mai et al. 2024).

Pokazano je da su koncentracije VOC u novim ili renoviranim školama znatno veće od uobičajenih vrednosti (Mai et al. 2024). Istraživanja su pokazala da VOC u školama mogu predstavljati značajan rizik po zdravlje učenika i zaposlenih u školi (Jovanović et al. 2014; Sadrižadeh et al. 2022).

Formaldehid je bezbojni gas oštrog mirisa koji predstavlja jedan od glavnih faktora rizika po zdravlje u unutrašnjem prostoru (Villanueva et al. 2018). Iako HCHO može da bude prisutan u unutrašnjoj i spoljašnjoj sredini, koncentracije u unutrašnjem prostoru su uglavnom više (Mai et al. 2024). Izvori HCHO u unutrašnjem prostoru su različite hemikalije, koje se široko primenjuju u proizvodnji materijala i proizvoda za domaćinstvo (Angulo Milhem et al. 2021). Izloženost HCHO dovodi do iritacije gornjih disajnih puteva i očiju, dok dugotrajna izloženost može dovesti do ozbiljnijih respiratornih problema (Lam et al. 2021).

Gas koji je često prisutan u školama u većoj količini nego u spoljašnjoj sredini je CO₂ (Lazović et al. 2016). Primarni izvor CO₂ je proces sagorevanja organskog materijala, uključujući i proces disanja. Iako se CO₂ ne smatra posebno štetnim, izloženost CO₂ u koncentracijama većim od 3000 ppm dovodi do jake glavobolje, osećaja umora i smanjenja koncentracije (Azuma et al. 2018). Takođe, pokazano je da izloženost učenika povišenim koncentracijama CO₂ (1000 ppm) u učionici dovodi se u vezu sa povećanjem zdravstvenih komplikacija i smanjenjem učinka u obrazovno procesu (Madureira et al. 2015; Al-Awadi 2018).

Literaturni podaci ukazuju da su koncentracije PM_{2,5} u školama često premašivale graničnu vrednost od 15 µg/m³ preporučenu od SZO (Chithra and Shiva Nagendra 2013; Buczyńska et al. 2014; Zhao et al. 2022; Dimitroulopoulou et al. 2023). Srednje vrednosti koncentracija PM_{2,5} u školama širom sveta dosta variraju, od 75.3 µg/m³ u školama u Aziji, preko 35.0 µg/m³ u Evropi, do 15.2 µg/m³ u Severnoj Americi (Oliveira et al. 2019). Takođe, zabeležena su velika odstupanja prosečnih koncentracija PM_{2,5} u školama u Evropi, gde je prosečna koncentracija PM_{2,5} bila od 5.14 do 100 µg/m³. Različite koncentracije PM_{2,5} između škola sa različitih kontinenata mogu se objasniti društvenim, kulturnim i ekonomskim razlikama, dok se razlike u okviru istog kontinenta više pripisuju varijacijama u vremenu uzorkovanja, geografskom položaju škole i specifičnostima zgrade (Oliveira et al. 2019).

U brojnim studijama širom sveta izučavane su koncentracije elemenata prisutnih na PM_{2,5} (John et al. 2007; Almeida et al. 2011; Tran et al. 2012; Zwoździak et al. 2013; Rivas et al. 2014; Mainka et al. 2015; Bi et al. 2018; Mesías Monsalve et al. 2018; Bennett et al. 2019;

Carrion-Matta et al. 2019; Othman et al. 2019; Martins et al. 2020; Sui et al. 2020; Tran et al. 2020; Alias et al. 2021; Heo et al. 2021; Alameddine et al. 2022; Othman et al. 2022; Wang et al. 2023; Živković et al. 2023). Rezultati ovih studija su pokazali da su koncentracije svih elemenata u učionici bile u opsegu 0,18-41,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dok su koncentracije ukupnih elemenata u spoljašnjoj sredini bile u opsegu 0,19-35,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pri čemu su najviše vrednosti zabeležene u školama u Aziji. Uprkos brojnim razlikama u dizajnu studija u većini je zabeležena viša koncentracija elemenata u spoljašnjoj sredini.

Sličan trend je zabeležen i u studijama koje su određivale koncentracije PAH prisutnih na $\text{PM}_{2,5}$, gde je pokazano da su koncentracije bile najviše u školama u Aziji (Eiguren-Fernandez et al. 2007; Gatto et al. 2014; Krugly et al. 2014; Liaud et al. 2014; Romagnoli et al. 2014; Oliveira et al. 2015; Xu et al. 2015; Oliveira et al. 2016; Romagnoli et al. 2016; Błaszczuk et al. 2017; Di Gilio et al. 2017; Oliveira et al. 2017; Wang et al. 2017; Ha et al. 2020; Ouyang et al. 2020; Zhang et al. 2020; Liaud et al. 2021; Hisamuddin et al. 2022; Živković et al. 2023). Iako PAH u vazduhu mogu biti prisutni u gasnoj fazi ili adsorbovani na PM, u studijama su uglavnom izučavani PAH prisutni na $\text{PM}_{2,5}$. Koncentracije ukupnih PAH prisutnih na $\text{PM}_{2,5}$ bile su uglavnom niže u učionici (u opsegu 0,21-133 ng/m^3) nego u dvorištu škole (u opsegu 0,36-388 ng/m^3). Među glavnim izvorima elemenata i PAH u školama koje se nalaze u urbanim sredinama ističu se saobraćaj i sagorevanje fosilnih goriva (Oliveira et al. 2019).

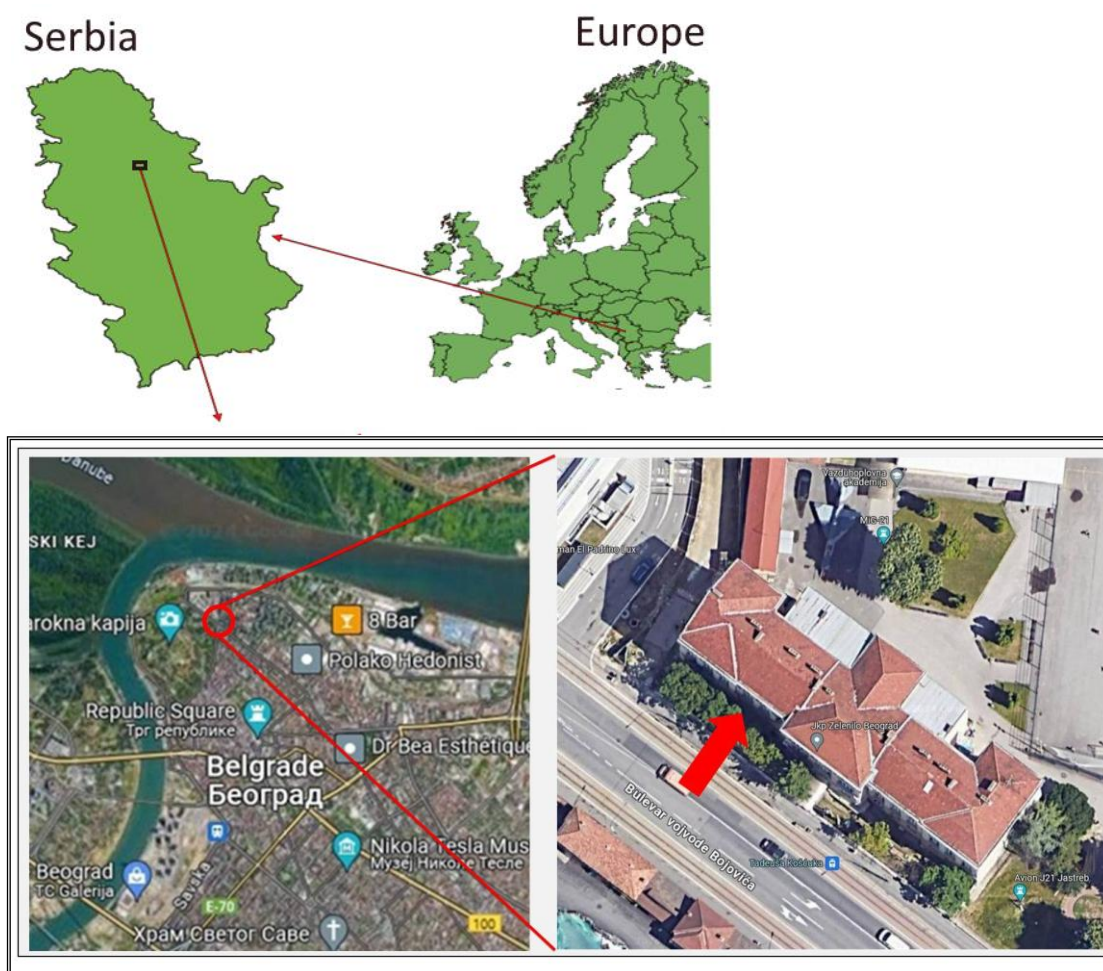
4. MATERIJAL I METODE

4.1. Mesto uzorkovanja

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije sprovedena su u školi u Beogradu (geografska širina/dužina: 44,82631°/20,45541°), tokom grejne sezone od 16. februara do 17. marta i negrejne sezone od 30. marta do 30. aprila 2024. godine.

Škola se nalazi u centru grada preko puta zoološkog vrta, i okružuju je prometni putevi. Takođe, u neposrednom okruženju škole nalaze se još toplana uključujući i individualna ložišta, tržni centri, prostori za rekreaciju i zabavu, Univerzitet u Beogradu, razne komercijalne delatnosti i reke Sava i Dunav, koje imaju značajan vodni saobraćaj.

Za ovo istraživanje odabrana je srednja škola u ovom dinamičnom urbanom okruženju, što je čini pogodnom lokacijom za procenu kvaliteta vazduha i rizika po zdravlje. Mesto uzorkovanja PM_{2,5} u okviru škole bila je učionica na prvom spratu glavne zgrade, približno 5 m iznad zemlje. Spoljašnji uzorkivač PM_{2,5} je bio u prizemlju zgrade, ispred škole u istoj ravni sa učionicom. Lokacije za uzorkovanje u zatvorenom i na otvorenom direktno su okrenute ka glavnom putu (Slika 5 i Slika 6).



Slika 5. Lokacija škole.

Crveni krug ukazuje na lokaciju škole, dok crvena strelica ukazuje na mesto gde su bili postavljeni referentni uzorkivači.



Slika 6. Mesta uzorkovanja, levo je dvorište škole, desno je učionica.



Slika 7. Izgled učionice.

Učionica je bila standardno opremljena sa podovima od drvenog, lakiranog parketa, drvenih stolova i stolica sa metalnim lakiranim okvirima, drvenom i magnetnom tablom, drvenim lajsnama na zidovima okrećenim uljanim bojama (**Slika 7**). Takođe, u učionici su se nalazili radijatori sa daljinskim tipom grejanja i projektor. Ventilacija u učionici je bila prirodna, bez mehaničke klimatizacije. Tokom perioda uzorkovanja, u učionici je boravilo 48 učenika (uzrasta 15-17 godina). Polovina učenika je bila u učionici u prepodnevnoj smeni od 8:00 do 14:05 časova, dok je druga polovina bila u poslepodnevnoj smeni od 14:15 do 20:20 časova. Sakupljanje uzoraka nastavljeno je i tokom dana vikenda kada je škola bila zatvorena.

4.2. Uzorkovanje i određivanje masene koncentracije PM_{2,5}

Uzorci PM_{2,5} iz vazduha su sakupljani korišćenjem referentnih uzorkivača (Sven Leckel LVS6-RV) tokom 24 h. Brzina uzorkovanja vazduha je bila podešena na 2,3 m³/h. Za sakupljanje PM_{2,5} korišćeni su politetrafluoroetilenski filteri (PTFE) (Whatman International Ltd.) prečnika 46,2 mm. Ukupno je prikupljeno 122 kompleta filtera i to po 60 u učionici i dvorištu škole i dva prazna filtera koja su bila postavljana na uzorkivač koji nije bio uključen, tokom 24 h.



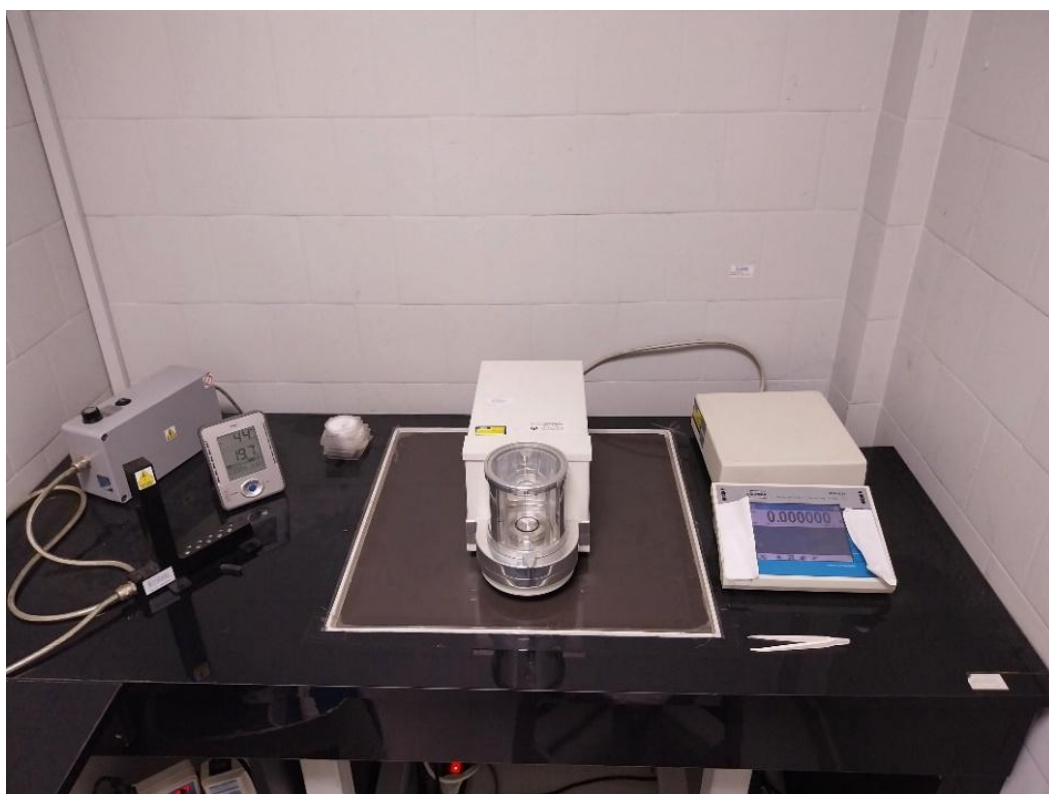
Slika 8. Referentni uzorkivač Sven Leckel LVS6-RV.

Masena koncentracija PM_{2,5} prikupljenih na filterima određivana je gravimetrijski pomoću Radwag MYA 5.3Y, elektronske analitičke vage (rezolucija: ±1 µg, Radvag, Radom, Poljska) pre i posle uzorkovanja (**Slika 9**). Pre merenja mase, uzorci filtera su ekvilibrisani 24 h u komori sa temperaturom od 20±1 °C i relativnom vlažnošću od 50±5%. Kako bi se uklonilo potencijalno elektrostatičko naelektrisanje na filterima, korišćen je Radvag DJ-04 antistatički jonizator pre svakog merenja filtera. Merenja su rađena u duplikatu, a razlike između ponovljenih merenja su bile manje od 15 µg za prazne filter i 20 µg za filtere sa uzorcima.

Masena koncentracija PM_{2,5} izražavana je u µg/m³ i izračunavana prema jednačini (1):

$$PM_{2,5} = \Delta m \times 10^6 / V \quad (1)$$

gde je Δm razlika masa filtera sa uzorkom i praznog filtera izražena u gramima, a V je zapremina vazduha uzorkovanog tokom perioda 24 h izražena u m³.



Slika 9. Elektronska analitička vaga (Radwag MYA 5.3Y).

4.3. Određivanje koncentracije elemenata adsorbovanih na PM_{2,5}

Jedna od najčešće korišćenih analitičkih tehnika za određivanje elemenata u tragovima u vazduhu je masena spektrometrija sa indukovano spregnutom plazmom (ICP-MS; eng. *Inductively coupled plasma – mass spectrometry*) (Liang et al. 2015) (**Slika 10**). Ova metoda se koristi za merenje koncentracije elemenata u različitim tipovima uzoraka, a zasniva se na zajedničkom delovanju indukovano spregnute plazme (za jonizaciju uzorka) i masene spektrometrije (za razdvajanje i detekciju jona). Prednosti ICP-MS metode predstavlja mogućnost istovremenog merenja velikog broja elemenata, velika osetljivost i specifičnost (niska granica detekcije), brza analiza (do nekoliko minuta), mogućnost merenja izotopa i izotopskih odnosa određenih elemenata.



Slika 10. Maseni spektrometar sa indukovano spregnutom plazmom (ICP-MS).

Filteri sa uzorcima PM_{2,5} ispirani su u epruvetama sa 10 ml 5% HNO₃, a potom rastvarani u sistemu za digestiju (HotBlock, Environmental Express) naredna 2 i po sata na 100±0,5 °C. Nakon digestije, uzorci su centrifugirani 15 min na 2000 g, a supernatant je korišćen za dalju analizu elemenata. Koncentracije elemenata prisutnih na PM_{2,5} analizirane su ICP-MS prema standardnoj proceduri CEN EN 14902. Analizirano je ukupno 29 elemenata, uključujući aluminijum (Al), antimon (Sb), arsen (As), kalcijum (Ca), bor (B), barijum (Ba), berilijum (Be), kadmijum (Cd), kobalt (Co), hrom (Cr), bakar (Cu), gvožđe (Fe), litijum (Li), kalijum (K), magnezijum (Mg), mangan (Mn), živa (Hg), molibden (Mo), nikl (Ni), olovo (Pb), fosfor (P), selen (Se), natrijum (Na), srebro (Ag), stroncijum (Sr), kalaj (Sn), talijum (Tl), cink (Zn) i vanadijum (V). Dobijene vrednosti koncentracija elemenata su normirane korišćenjem srednje vrednosti za blank i izražavane u ng/m³. Granice detekcije elemenata bile su u opsegu 0,3 - 1,0 ng/m³, sa mernom nesigurnošću manjom od 10%.

4.4. Određivanje koncentracije PAH adsorbovanih na PM_{2,5}

Kako bi se odredila koncentracija PAH adsorbovanih na PM_{2,5}, filteri sa uzorcima su ekstrahovani u 4 ml toluena na ultrazvučnom kupatilu 30 minuta. Ceo postupak je ponovljen dva puta. Dobijeni supernatanti su uparavani na rotacionom uparivaču pod sniženim pritiskom u struji azota skoro do suva, a potom razblaženi do 1 ml heksanom. Ekstrahovani PAH su analizirani gasnom hromatografijom u kombinaciji sa masenom spektrometrijom (Agilent 7890A/5975C) i HP-5ms kapilarnom GC kolonom (30 m × 0,25 mm × 0,25 mm, Agilent Co., USA) (**Slika 11.**). U uzorcima PM_{2,5} su određivane koncentracije 16 prioriternih PAH, uključujući: naftalen (Nap), acenaftilen (Ace), acenaften (Ane), fluoren (Flu), fenantren (Phe), antracen (Ant), fluoranten (Fla), piren (Pyr), krizen (Chy), benzo[a]antracen (BaA), benzo[b]fluoranten (BbF), benzo[k]fluoranten (BkF), benzo[a]piren (BaP), dibenz[a,h]antracen (DahA), benzo[ghi]perilen (BghiP) i indeno[1,2,3-cd]piren (Ind).



Slika 11. Gasni hromatograf sa masenom spektrometrijom (GC-MS).

4.5. Kontrola kvaliteta uzorkovanja i laboratorijskih analiza

Kontrola kvaliteta je primenjena tokom svih eksperimentalnih postupaka, uključujući uzorkovanje PM_{2,5}, merenje filtera i analitičkih merenja, kako bi se greške svele na minimum. Svi navedeni postupci bili su izvedeni prema standardnim i/ili validiranim procedurama, u cilju dobijanja tačnih, selektivnih i reproduktivnih rezultata.

Merenju mase filtera prethodilo je kondicioniranje u kontrolisanom okruženju, tokom 24 h ($20 \pm 1^\circ\text{C}$ i relativna vlažnost od $50 \pm 5\%$). Iako se analitička vaga automatski kalibriše, primenjena je i eksterna kalibracija pomoću sertifikovanih tegova mase 0,5 g pre i posle merenja svakog 10 filtera. Takođe, prazni i kontrolni filteri su mereni na početku merenja, nakon svakog 20-og izmerenog filtera i na kraju svake serije merenja.

Kontrola kvaliteta analize elemenata sprovedena je u skladu sa standardnom procedurom CEN EN 14902. Serija standarda poznatih koncentracija elemenata (0,01, 0,03, 0,07, 0,10, 0,30, 0,70, 1,0, 3,0, 7,0, 10, 30, 70, 100 i 300 ng/mL) pripremana je rastvaranjem osnovnih standardnih rastvora u 5% HNO₃, a potom korišćena za kalibraciju ICP-MS. Korišćeni su sertifikovani standardi (Accustandard MES-21-5, AG-CAL1-ASL-5, MES-04-5 i ICP-MS-34N-1) za konstruisanje kalibracione krive u šest tačaka (u zavisnosti od nivoa koncentracije određenog elementa). Standardi su mereni na početku ICP-MS sekvence i nakon svakih 30 uzoraka. Korišćenjem standardnog referentnog materijala (SRM) NIST SRM 1648a ili pikova uzorka, određeni su analitički prinos (eng. *recovery*) i relativna standardna devijacija (RSD; eng. *Relative standard deviation*) za sve ispitivane elemente. Srednja vrednost korišćena je za validaciju procedure i bila je u opsegu 81% - 114%, dok je RSD u merenju koncentracije elemenata bila $\leq 18\%$. granica detekcije (LOD; eng. *limit of detection*), granica kvantifikacije (LOQ; eng. *limit of quantification*), linearnost, srednja vrednost pojavitljivosti i preciznost za svaki element su prikazani u **Tabeli 4**. Određivanje LOD je urađeno na osnovu serije ponavljanih merenja praznih filtera i bile su od 0,02 ng/m³ za Ba do 0,16 µg/m³ za K.

Tabela 4. Kalibracija i validacija podataka ICP-MS analize elemenata adsorbovanih na PM_{2,5}.

Element	Jednačina kalibracione prave	R ²	LOD, ng/m ³	SRM/spajk	Sertifikovana/spajk vrednost, mg/kg (%)	Izmerena vrednost, mg/kg (%)	Prinos (%)	RSD (%)
7Li	26,191 x + 380,01	0,9998	0,03	spajk	12,6	10,3	82	17
9Be	10,935 x + 90,001	0,9987	0,13	spajk	133	110	83	15
10B	6618,1 x + 8586,4	0,9999	1,13	SRM 1648a	161 ± 9	184	114	12
23Na	19153 x + 57824	0,9950	1,27	SRM 1648a	4240 ± 60	4706	111	11
24Mg	13648 x + 13107	0,9953	1,40	SRM 1648a	0,813 ± 0,012	0,89	109	8,2
27Al	66072 x + 49475	0,9988	0,77	SRM 1648a	3,43 ± 0,13	3,6	106	8,1
31P	2051,9 x + 218377	0,9986	28,8	spajk	5012	4210	84	13
39K	66532 x + 5798675	0,9998	164	SRM 1648a	1,056 ± 0,049	0,90	85	14
44Ca	4070,8 x + 146290	0,9947	4,55	SRM 1648a	5,84 ± 0,19	6,3	108	9,3
51V	90474 x + 4417,5	1,0000	0,35	SRM 1648a	127 ± 11	124	98	3,5
52Cr	81508 x + 36564	0,9997	1,23	SRM 1648a	402 ± 13	386	96	5,8
55Mn	103385 x + 201037	0,9712	2,69	SRM 1648a	790 ± 44	687	87	9,6
57Fe	1868,2 x + 31286	0,9995	31,2	SRM 1648a	3,92 ± 0,21	4,4	112	18
59Co	69144 x + 250,00	1,0000	0,03	SRM 1648a	17,93 ± 0,68	18,6	104	6,4
60Ni	14192 x + 436,68	0,9996	0,33	SRM 1648a	81,1 ± 6,8	86,0	106	8,3
63Cu	37585 x + 10084	0,9994	0,87	SRM 1648a	610 ± 70	598	98	4,2
66Zn	13355 x + 2563,6	0,9984	0,47	SRM 1648a	4800 ± 270	4512	94	8,7
75As	8201,0 x + 193,33	0,9982	0,33	SRM 1648a	115,5 ± 3,9	105	91	11
82Se	1414,7 x + 163,33	0,9942	0,16	SRM 1648a	28,4 ± 1,1	23,9	84	12
88Sr	132069 x + 1230,1	0,9999	0,05	SRM 1648a	215 ± 17	228	106	7,6
95Mo	11686 x + 776,70	0,9986	0,71	spajk	105	107	102	3,1
107Ag	76880 x + 223,33	0,9994	0,03	SRM 1648a	4,6 ± 0,3	3,8	83	16
111Cd	16340 x + 20,001	0,9986	0,03	SRM 1648a	73,7 ± 2,3	73,0	99	2,8
118Sn	37252 x + 1446,8	0,9988	0,03	spajk	111	94,4	85	12
121Sb	33494 x + 670,02	0,9999	0,07	SRM 1648a	45,4 ± 1,4	40,0	88	8,7
137Ba	24407 x + 360,01	1,0000	0,02	spajk	758	614	81	16
200Hg	9507,5 x + 80,000	0,9961	0,10	SRM 1648a	1,323 ± 0,064	1,1	83	15

Element	Jednačina kalibracione prave	R ²	LOD, ng/m ³	SRM/spajk	Sertifikovana/spajk vrednost, mg/kg (%)	Izmerena vrednost, mg/kg (%)	Prinos (%)	RSD (%)
205Tl	126,00 x + 133,33	0,9996	0,03	spajk	11,9	9,8	82	15
206Pb	40995 x + 373,34	1,0000	0,04	SRM 1648a	0,655 ± 0,033	0,6	96	7,1

Analiza PAH metodom GC-MS (eng. *Gas chromatography – mass spectrometry*) je izvedena pomoću softvera Agilent MassHunter. Uzorci PAH su mereni korišćenjem 10 ng/mL sertifikovanog standarda (Accustandard Z-014G PAH, smeša 16 PAH, 2000 mg/mL rastvorenog u dihlorometan:benzol (50:50)), kao i internih standarda uključujući različite deuterisane PAH. Kalibracione krive su pripremljene za opseg koncentracija PAH između 5-200 ng/mL u *n*-heksanu. Prinos svakog pojedinačnog PAH je određena pomoću SRM NIST SRM 1648a, i srednja vrednost prinosa je bila između 78% (BaA) i 107% (Acy). Vrednost MDL je bila u opsegu 0,01-0,05 ng/m³ (**Tabela 5.**). Koncentracije PAH su normirane u odnosu na slepu probu. Svi korišćeni rastvarači su bili visokog stepena čistoće.

Tabela 5. Kalibracija i validacija podataka GC-MS analize PAH adsorbovanih na PM_{2,5}.

PAH	Jednačina kalibracione krive (ng/mL)	Rt (min)	Q (m/z)	C ₁ (m/z)	C ₂ (m/z)	R ²	MDL (ng/m ³)	Prinos (%)	RSD (%)
Nap	13603 × c + 48060	5.38	128	127	129	0.9991	0.01	102	7.2
Acy	12877 × c + 11453	8.03	152.1	151	153	0.9998	0.01	107	3.5
Ace	8266 × c + -2965	8.49	154	152.1	153	0.9989	0.01	93	7.2
Flu	10156 × c + -119	9.99	166.1	165	167	0.9994	0.01	98	5.5
Phe	14932 × c + 33452	13.94	178.1	179	176	0.9968	0.01	104	9.5
Ant	13802 × c + 386	14.15	178.1	179	89	0.9963	0.01	92	7.9
Flt	16054 × c - 57292	20.98	202.1	101	203	0.9993	0.02	94	7.0
Pyr	19158 × c - 64590	22.35	202.1	203	101	0.9991	0.02	102	8.8
Chr	14487 × c - 83785	28.42	228.1	114	229	0.9988	0.03	103	7.2
BaA	18437 × c - 74043	28.58	228.1	114	229	0.9989	0.03	78	9.3
BbF	6255 × c - 26204	32.23	252	126	253	0.9986	0.03	98	3.2
BkF	12523 × c - 76022	32.31	252	253	126	0.9976	0.04	95	7.4
BaP	7283 × c - 46170	33.27	252.1	253	126	0.9970	0.04	92	13.0
InP	1422 × c - 3232	38.07	276	138	227	0.9983	0.05	79	15.8
DahA	1564 × c - 5252	38.32	278.1	138	276.1	0.9971	0.05	89	10.3
BghiP	2234 × c - 4253	39.38	276.1	138	277	0.9954	0.05	86	14.6

4.6. Meteorološki parametri kvaliteta vazduha

Radi šireg sagledavanja uticaja aerozagađenja na potencijalni zdravstveni rizik učenika, podaci o temperaturi, pritisku, relativnoj vlažnosti vazduha, pravcu i brzini vetra i koncentraciji PM_{2,5} (satni podaci), u periodu kampanje, preuzimani su sa zvaničnog sajta Agencije za zaštitu životne sredine. Podaci o dnevnim količinama padavina preuzimani su sa sajta Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije. Takođe, u istraživanje je bio uključen *Openair* softverski paket na osnovu kojeg je ispitivan trend koncentracija PM_{2,5}, radi boljeg uvida u zagađenje vazduha.

Satne i srednje dnevne vrednosti koncentracije PM_{2,5}, CO₂, HCHO i TVOC merene su primenom kontinualnih detektora (BRAMC BR-SMART-128SE 5-in-1 Air Quality Monitor), koji su bili postavljeni u učionici na prvom spratu zgrade i u prizemlju ispred škole (**Slika 12.**).



Slika 12. Kontinuirani detektori.

4.7. Određivanje izvora elemenata i PAH u PM_{2,5} česticama

4.7.1. Određivanje odnosa unutrašnjeg i spoljašnjeg zagađenja vazduha

Odnos unutar/spolja (I/O; eng. *Indoor/Outdoor*) pruža jasan uvid u dinamiku unutrašnjih i spoljašnjih koncentracija PM_{2,5}, uključujući elemente i PAH. Vrednost I/O manja od 1 ukazuje na dominantnu ulogu spoljašnjih izvora zagađenja, dok vrednosti I/O veće od 1 sugerišu na jači doprinos unutrašnjih izvora zagađenja. Iako I/O odnos predstavlja jednostavan model procene izvora zagađenja, ipak omogućava preliminarnu procenu interakcije PM_{2,5} i njihovih komponenti između unutrašnjeg i spoljašnjeg prostora.

4.7.2. Korelaciona analiza

Korelaciona analiza omogućava određivanje međusobne zavisnosti toksičnih elemenata ili PAH u spoljašnjoj i unutrašnjoj sredini. Korelacija između elemenata ili PAH dodatno pomaže u sagledavanju dominantnog uticaja specifičnih izvora zagađenja na distribuciju elementa ili PAH. Svi podaci su podvrgnuti proverbi normalne distribucije podataka korišćenjem statističkih P-P i Q-Q dijagrama. Imajući u vidu da su koncentracije elemenata i PAH imale normalnu distribuciju, primenjena je Pirsonova korelaciona analiza. Određivani su koeficijenti korelacije, čija vrednost je bila u opsegu od -1 do +1. Vrednost koeficijenta približno 1 ukazuje na jaku korelaciju, odnosno međusobnu vezu između ispitivanih parametara.

4.7.3. Faktorizacija pozitivne matrice

Pozitivna matriks faktorizacija (PMF eng. *Positive Matrix Factorization*) je multivariacioni model kvantitativne analize, koji se primenjuje u različitim naučnim oblastima. Kako bi se odredilo poreklo elemenata i PAH adsorbovanih na PM_{2,5} i uticaja zagađenja vazduha u urbanoj sredini na sastav PM_{2,5} u zatvorenom prostoru u ovoj doktorskoj disertaciji je korišćen PMF receptorski model. Primena PMF model omogućava klasifikaciju uzoraka u različite faktore kako bi se identifikovali izvori zagađenja i njihove stope doprinosa. Primenom metode najmanjih kvadrata izračunava se greška mase svake hemijske komponente u PM_{2,5} čime se definišu glavni izvori zagađenja i njihov doprinos.

PMF model se zasniva na sledećoj jednačini (jednačina 2):

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik}f_{kj} + e_{ij} \quad (2)$$

gde X_{ij} predstavlja koncentraciju i -tog elementa ili PAH u j -tom uzorku PM_{2,5}, g_{ik} je doprinos i -tog elementa ili PAH u k -tom faktoru, f_{kj} predstavlja doprinos za k -ti faktor u masenom udelu u j -tom uzorku PM_{2,5}, a e_{ij} je ostatak između izmerene masene koncentracije i -tog elementa ili PAH u j -tom uzorku PM_{2,5} i njihove analitičke vrednosti.

Cilj PMF modela jeste da se odredi minimalna vrednost funkcije Q koja je uključena u model. Pri čemu Q vrednost se izračunava pomoću sledeće jednačine (3):

$$Q_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik}f_{kj}}{U_{ij}} \right]^2 \quad (3)$$

gde Q_{ij} predstavlja zbir svih rezidua uzorka i njihovih nesigurnosti, a U_{ij} predstavlja nesigurnost i -tog elementa ili PAH u j -tom uzorku PM_{2,5}, i izračunava na osnovu limita detekcije metode (MDL) korišćenjem sledećih jednačina (4,5):

$$Unc = \frac{5}{6} \times MDL \quad (4)$$

$$Unc = \sqrt{(\text{error fraction} \times \text{concentration})^2 + (0.5 \times MDL)^2} \quad (5)$$

Određivanje nesigurnosti u PMF modelu posebno je važno kada su koncentracije elemenata i PAH blizu ili niže od MDL.

U ovoj doktorskoj disertaciji korišćen je softver USEPA PMF verzija 5.0, koji primenjuje bilinearni model za razvrstavanje elemenata i PAH po izvorima. Ulaznu matricu su činili koncentracije elemenata ili PAH i odgovarajuće nesigurnosti za svaki pojedinačni parametar, izvedene iz analitičke preciznosti i MDL. Podaci koji su nedostajali bili su zamenjeni polovinom graničnih vrednosti detekcije, dok su ekstremne vrednosti uklanjane tokom procesa predtretmana. Kako bi se odredio optimalan broj faktora, procenjivana su rešenja u rasponu od dva do osam faktora na osnovu minimalne Q vrednosti, interpretabilnosti profila izvora i fizičke verodostojnosti. Parametri rotacione sile (*F-peak*) su podešeni u opsegu od -1,0 do +1,5 kako bi se smanjila dvosmislenost rotacije. Tokom procesa optimizacije praćena je Q vrednost, koja predstavlja odnos posmatranih i modelovanih nesigurnosti podataka. Specifične Q vrednosti za svaki faktor za elemente na PM_{2,5} date su u (**Tabeli 6.**). Procena greške uzima u obzir nesigurnosti povezane sa preciznošću merenja i rezolucijom modela. Nesigurnosti su procenjene pomoću pokretanja (*bootstrapping*), pomeranja (*displacement*) i mapiranja nesigurnosti kako bi se osigurala stabilnost odabranih profila faktora.

Tabela 6. Q vrednosti za rešenja faktora za elemente na PM_{2,5} u PMF modelu

	Broj faktora						
	2	3	4	5	6	7	8
Base run	17	15	18	12	15	11	14
Q(robust)	41957	42108	38946	36978	34608	30495	27161
Q(true)	157281	117764	85975	72013	62346	52786	46028
Q(robust)/Q(true)	0.27	0.36	0.45	0.51	0.56	0.58	0.59

4.7.4. Dijagnostički odnos

S obzirom da različiti pirolitički procesi oslobađaju različite količine i opsege PAH, dijagnostički odnos pojedinih PAH se primenjuje za određivanje potencijalnog izvora PAH (Tobiszewski and Namieśnik 2012; Radomirović et al. 2023). Ovaj metod uzima u obzir varijabilnost unutar jednog izvora i sličnost između različitih izvora pojedinih ili više PAH za prognostičko modeliranje porekla PAH.

U ovoj doktorskoj disertaciji dijagnostički odnosi su izračunavani kao binarni odnos najčešće detektovanih PAH (**Tabela 7**).

Tabela 7. Dijagnostički odnosi PAH

Dijagnostički odnos	Petrogeni (nafta i njeni derivati)	Pirogeni (sagorevanje nafte i njenih derivata)	Sagorevanje biomase i uglja	Literatura
Ant/(Ant + Phe)	< 0.1	0.1 - 0.1	> 0.1	(Katsoyiannis and Breivik 2014)
Flu/(Flu + Pyr)	< 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
BaA/(BaA + Chr)	< 0.2	0.2 - 0.35	> 0.35	
InP/(InP + BghiP)	< 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	

4.8. Procena rizika po zdravlje

4.8.1. Određivanje uticaja metala adsorbovanih na PM_{2,5} na zdravlje

Iako postoje različiti putevi izloženosti (inhalacija, ingestija i dermalni put), izlaganje putem udisanja predstavlja glavni put izloženosti PM_{2,5} iz vazduha. Izloženost učenika nekancerogenim i kancerogenim elementima izračunavana je kao prosečna dnevna doza za svaki element. Koeficijent opasnosti (HQ; eng. *Hazard Quotient*) je određivan za nekancerogene efekte elemenata pomoću jednačine (6):

$$HQ = EC/(RfC \times 1000) \quad (6)$$

gde EC predstavlja koncentraciju elemenata (µg/m³), dok RfC predstavlja inhalacionu toksičnost teškog metala (µg/m³). Toksikološki parametri elemenata su preuzimani iz baze Risk Assessment Information System (RAIS 2024) (**Tabela 8**).

Tabela 8. Parametri inhalacionog izlaganja elementima

Element	Nekancerogeni	Kancerogeni
	RfC (mg/m ³)	IUR (µg/m ³)
Al	5.0×10 ⁻³	
As	1.5×10 ⁻⁵	4.3×10 ⁻³
Ba	5.0×10 ⁻⁴	
Be	2.0×10 ⁻⁵	2.0×10 ⁻⁵
Cd	1.0×10 ⁻⁵	1.8×10 ⁻³
Co	6.0×10 ⁻⁶	9.0×10 ⁻³
Cr	1.0×10 ⁻⁴	8.4×10 ⁻²
Hg	3.0×10 ⁻⁴	
Mn	5.0×10 ⁻⁵	
Mo	2.0×10 ⁻³	
Ni	1.4×10 ⁻⁵	2.4×10 ⁻⁴
Pb	5.0×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻⁵
Sb	3.0×10 ⁻⁴	
Se	2.0×10 ⁻²	
V	1.0×10 ⁻⁴	

IUR – inhalacioni rizik (rizik od inhalacione jedinice); RfC - referentna koncentracija;

Kako bi se procenio kumulativni rizik usled izloženosti elementima, određivan je indeks opasnosti (HI; eng. *Hazard Index*), koji predstavlja zbir HQ vrednosti različitih elemenata. U slučaju da je vrednost HI manja od 1, rizik od nekancerogenih efekata elemenata je prihvatljiv, dok vrednost HI veća od 1 ukazuje na štetne posledice po zdravlje usled izloženosti elementima. Veće vrednosti HQ linearno povećavaju vrednost HI, odnosno linearno se povećava rizik od nekancerogenih efekata (USEPA 2001).

Kancerogeni rizik (CR; eng. *Carcinogenic Risk*) usled izloženosti teškim metalima putem inhalacije izračunavan je pomoću jednačine (7):

$$CR = IUR \times EC \quad (7)$$

gde IUR (eng. *Inhalation unit risk*) predstavlja rizik od inhalacije ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), dok EC predstavlja koncentraciju elemenata ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Ukupan rizik od kancera (TCR) je izračunavan kao zbir pojedinačnih CR. Kada je vrednost TCR ispod 10^{-6} rizik se smatra zanemarljivim, dok se vrednosti TCR u opsegu od 10^{-6} do 10^{-4} smatraju prihvatljivim. Međutim, ukoliko je TCR veći od 10^{-4} to ukazuje na visok rizik od kancera usled izlaganja teškim metalima putem inhalacije.

4.8.2. Određivanje uticaja PAH adsorbovanih na PM_{2,5} na zdravlje

Rizik po zdravlje usled izloženosti PAH putem inhalacije procenjivan je određivanjem ekvivalentne toksičnosti (TEQ; eng. *Toxic equivalent quantities*) i rizika od karcinoma pluća tokom života (LLCR; eng. *Lifetime lung cancer risk*). Vrednost TEQ predstavlja ekvivalent toksičnosti određenog PAH u odnosu na koncentraciju BaP, kao PAH koji ima najveći kancerogeni potencijal.

Koncentracija TEQ svakog PAH je izračunavana prema jednačini (8):

$$TEQ = \sum TEQ_i = \sum_1^i (C_i \times TEF_i) \quad (8)$$

gde C_i predstavlja koncentraciju i -tog PAH izraženu u ng/m^3 , TEF_i je faktor ekvivalentne toksičnosti i -tog PAH, kao ekvivalentne koncentracije BaP (**Tabela 9**).

Tabela 9. Faktor ekvivalentne toksičnosti za PAH.

PAH	TEF (mg/m^3)
Ace	0.001
Acy	0.001
Ant	0.01
BaA	0.1
BaP	1
BbF	0.1
BghiP	0.01
BkF	0.1
Chr	0.01
DahA	1
Fla	0.001
Flu	0.001
InP	0.1
Nap	0.001
Phe	0.001
Pyr	0.001

Verovatnoća pojave karcinoma usled izloženosti PAH izračunavana je pomoću jednačine (9):

$$LLCR = \sum TEQ_i \times UR_{BaP} \quad (9)$$

gde UR_{BaP} predstavlja faktor rizika od karcinoma usled izloženosti putem inhalacije ($8.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ ng}^{-1}$) (WHO. 2010).

4.8.3. Monte Karlo simulacija (MCS)

Monte Karlo simulacija (MCS; eng. *Monte Carlo simulation*) je pouzdan statistički alat za procenu rizika. Efikasnost metode ogleda se u proceni više faktora rizika uz smanjenje nesigurnosti (Li et al. 2024; Miletić et al. 2024). Iterativni analitički pristup omogućava sveobuhvatnu analizu mogućih scenarija, generisanjem ponovljenih uzoraka iz definisanih distribucija verovatnoće, što je posebno korisno u oblastima kao što je procena zdravstvenog rizika (Vesković et al. 2024). Kako bi se poboljšala tačnost i preciznost procene zdravstvenog rizika učenika usled izloženosti elementima i PAH adsorbovanim na $PM_{2,5}$, primenjen je MSC (softver Oracle Crystal Ball). Pored toga, korišćena je kombinacija PMF i MCS modela za procenu nekancerogenih i kancerogenih rizika za učenike povezane sa uticajem elemenata i PAH koji potiču iz svakog pojedinačnog izvora zagađenja.

Varijabilnost ulaznih parametara sa potencijalnim uticajem na zdravlje određivana je izvođenjem 10000 iteracija (simulacija) sa nivoom pouzdanosti od 95%. Kumulativna distribucija na 95-om procentu je korišćena za određivanje gornje granične vrednosti za izloženost elementima ili PAH. Uvođenje dodatne dimenzije u standardnu MCS (jednodimenzionalna MCS (1D MCS)) dodatno poboljšava preciznost i tačnost modela procene rizika. Ovaj napredni pristup, poznat kao dvodimenzionalna MCS (2D MCS), uključuje spoljnu petlju (*outer loop*) za rešavanje nesigurnosti i unutrašnju petlju (*inner loop*) koja uzima u obzir varijabilnost (Pang et al. 2024). Raspodela varijabli unutar petlji je izvršena analizom osetljivosti 1D MCS. Varijable sa najvećim uticajem na rizik su klasifikovane kao neizvesne i raspoređene su u spoljnu petlju, dok su preostale varijable obrađivane u unutrašnjoj petlji. Takođe, nesigurne varijable unutar 2D MCS bile su fiksirane na 100 vrednosti odabranih iz njihovih distribucija, dok su promenljive varijable nasumično uzorkovane 1000 puta za svaku fiksnu vrednost neizvesnih varijabli. Ovaj postupak je generisao 100000 potencijalnih ishoda rizika predstavljenih sa 100 distribucija verovatnoće. Rezultati su predstavljeni kao proseki svih ishoda.

4.9. Statistička obrada podataka

Metode deskriptivne statistike korišćene su za osnovnu analizu dobijenih podataka. Određivane su vrednosti mere centralne tendencije i varijabiliteta, uključujući standardnu grešku (SE), minimum i maksimum. Podaci su analizirani korišćenjem računarskih programa SPSS i Microsoft Office Excel.

5. REZULTATI I DISKUSIJA

5.1. Masena koncentracija PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru

Međusobna zavisnost PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru u školama je prethodno izučavana u brojnim studijama (Oliveira et al. 2019; Sadrizadeh et al. 2022; Branco et al. 2024). Zaključeno je da prisustvo PM_{2,5} u učionici može biti rezultat različitih faktora, ali ipak dominantan uticaj imaju spoljašnji izvori, imajući u vidu da PM_{2,5} iz spoljašnje sredine lako prodiru u unutrašnjost učionice u školama sa prirodnom ventilacijom.

Uporedni prikaz prosečnih 24 časovnih masenih koncentracije PM_{2,5} u zatvorenim i otvorenim prostorima u školama, u studijama sprovedenim širom sveta zajedno sa rezultatima dobijenim u ovoj doktorskoj disertaciji su prikazani u **Tabeli 10**.

Tabela 10. Koncentracije PM_{2,5} u školama u različitim zemljama.

Lokacija škole	Datum	PM _{2,5} (µg/m ³)		Literatura
		Unutar	Spolja	
SAD, Ohajo	Feb 1999-Aug 2000	15.6-17.3	12.9-13.6	(John et al. 2007)
Portugalija, Lisabon	May-Nov 2009	10	3-10	(Almeida et al. 2011)
Francuska. Nord-Pas-de Calais region	May 2009-Jul 2009	11.9–63.5	16.3–38.1	(Tran et al. 2012)
Poljska, Vroclav	Dec 2009-Oct 2010	8.9-86.6	8.0-67.7	(Zwoździak et al. 2013)
Španija, Barselona,	Jan-Jun 2012, Sep 2012-Feb 2013	13–84	10–111	(Rivas et al. 2014)
Poljska, Gornja Silesija	Dec 2013-May 2014	73.90	38.36	(Mainka et al. 2015)
Čile, Kanaral	Dec 2012-Jul 2013	/	/	(Mesías Monsalve et al. 2018)
Kina, Nanjing	Oct 2015-Jun 2016	3.5-64.3	15.1-148.6	(Bi et al. 2018)
Kina, Jinan	Jan–Dec 2016	NA	21.0-319.0	(Sui et al. 2020)
Malezija, Kuala Lumpur	Sep. 2017 Feb. 2018	4.5-26	4.5-23	(Othman et al. 2019)
SAD	2009-2013	0.8–16.9	3.3–16.6	(Carrion-Matta et al. 2019)
Novi Zeland, Velington	Oct 2016	1.0–10.9	/	(Bennett et al. 2019)
Portugalija, Lisabon	Oct 2017-Jan 2018	9.4–56.1	8.6–15.8	(Martins et al. 2020)
Vijetnam, Hanoj	Nov 2019-Jan 2020	2–101	56.7–198	(Tran et al. 2020)
Južna Koreja, Seul	Oct-Dec 2019	5.9 - 41.3	7.7 - 133.2	(Heo et al. 2021)
Malezija, Kuala Lumpur	May-Oct 2016	4.2-25.0	8.3–37.5	(Alias et al. 2021)
Malezija, Kuala Lumpur	/	42.0±23.1	39.9±21.9	(Othman et al. 2022)
Liban, Bejrut	/	20-170	20-180	(Alameddine et al. 2022)
Kina, Sian	Mar-May 2012	60.4-283.7	42.4–257.7	(Wang et al. 2023)
Srbija, Beograd (vrtić)	Mar-May 2010	16.5-63.2	14.63-97.60	(Živković et al. 2023)
Srbija, Beograd	Feb-Apr 2024	5.3-47.5	8.2-83.1	Ova doktorska disertacija

Tokom celog perioda istraživanja, koncentracije PM_{2,5} u spoljašnjoj sredini izmerene na obližnjoj referentnoj stanici za praćenje kvaliteta vazduha Agencije za zaštitu životne sredine bile su u opsegu 5,87-57,1 µg/m³, dok su merenja u okviru ove doktorske disertacije pokazala da su koncentracije PM_{2,5} na otvorenom bile u opsegu od 8,22-83,1 µg/m³. Sličnu razliku pokazali su i drugi autori (Heo et al. 2021). Takođe, pokazano je da je dnevna prosečna masena koncentracija PM_{2,5} u dvorištu škole bila viša za 27% u poređenju sa vrednostima u učionici tokom celog perioda uzorkovanja.

Tokom grejne sezone, prosečna koncentracija PM_{2,5} bila je 27,4±8,08 µg/m³ u učionici (opseg je bio 13,6 do 47,5 µg/m³) i 31,5±11,9 µg/m³ u dvorištu škole (opseg je bio 9,8-64,9 µg/m³). Sa druge strane, niže vrednosti zabeležene su tokom negrejne sezone. Prosečna dnevna koncentracija PM_{2,5} bila je 21,7±8,87 µg/m³ u zatvorenom prostoru (opseg je bio 5,33-47,2 µg/m³) i 35,6±16,2 µg/m³ na otvorenom (opseg je bio 8,22 µg/m³). Takođe, rezultati su pokazali da je prosečna masena koncentracija PM_{2,5} u spoljašnjoj sredini bila znatno viša (za 45%) nego u zatvorenom prostoru tokom dana vikenda, dok radnim danima kada su učenici bili u učionici, prosečna masena koncentracija PM_{2,5} bila je viša u spoljašnjoj sredini za samo 18% u poređenju sa vrednostima u učionici. Prosečne koncentracije PM_{2,5} u zatvorenom prostoru od 24,5±16,9 µg/m³ za ceo period bile su veće od preporučene dnevne vrednosti od 15 µg/m³ koju definiše novi standard SZO (Zhao et al. 2022) (prethodna granica za PM_{2,5} je bila 25 µg/m³ (WHO. 2006)).

Prethodne studije sprovedene u Srbiji su pokazale da su koncentracije PM_{2,5} u učionicama bile u opsegu 8,5-47,1 µg/m³ u manjim industrijskim gradovima i ruralnim zonama (Lazović et al. 2014), 15,3-68,6 µg/m³ u većim gradovima sa intenzivnim saobraćajem (Kovačević et al. 2015) i 26,9-63,9 µg/m³ u manjim gradovima (Jovanović et al. 2014).

Rezultati ukazuju da su koncentracije PM_{2,5} u učionicama bile slične ili više u poređenju sa vrednostima dobijenim u ovoj doktorskoj disertaciji. Brojne studije sprovedene u školama širom sveta zabeležile su različite masene koncentracije PM_{2,5} (**Tabela 10**). Većina studija iz Evrope i Azije, osim onih u gradovima sa teškom industrijom, pokazale su relativno slične trendove koncentracije PM_{2,5}, dok su studije iz SAD i Novog Zelanda, kao i pojedine iz Evrope pokazale niže koncentracije PM_{2,5}. Međutim, ove razlike se mogu pripisati različitim pristupima u istraživanju, pre svega dužini studije i godišnjim dobima istraživanja, kao i faktorima životne sredine i karakteristikama škole.

5.1.1. Distribucija PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru

Određivanje odnosa I/O omogućava procenu raspodele PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru. Rezultati prethodnih studija su pokazali različite trendove I/O za PM_{2,5}, koji su bili u opsegu 0,4-1,4 (Jovanović et al. 2014; Kovačević et al. 2015; Carrion-Matta et al. 2019; Othman et al. 2019; Heo et al. 2021) ili su vrednosti bile još veće (Zwoździak et al. 2013; Bi et al. 2018). U ovoj disertaciji prosečne vrednosti I/O odnosa koncentracija PM_{2,5} su bile 0,82 za ceo period, 0,96 u grejnoj sezoni i 0,69 tokom negrejne sezone (**Tabela 11**), što ukazuje na dominantan uticaj spoljašnjih izvora PM_{2,5} (Wang et al. 2023).

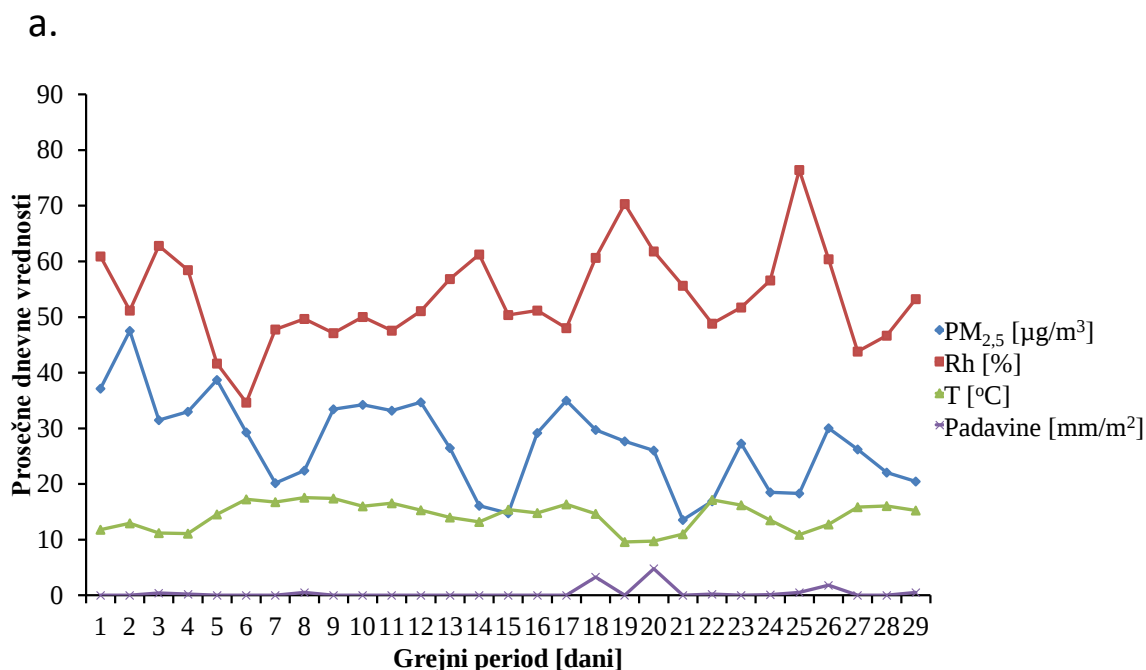
Tabela 11. Odnos unutrašnjih i spoljašnjih koncentracija PM_{2,5}.

PM _{2,5} I/O odnos	Ukupno			Grejni period			Negrejni period		
	Ukupno	Radni dani	Vikend	Ukupno	Radni dani	Vikend	Ukupno	Radni dani	Vikend
Srednja vrednost	0.82	0.93	0.61	0.96	1.10	0.71	0.70	0.79	0.51
SE	0.05	0.07	0.07	0.07	0.09	0.07	0.07	0.09	0.11
Minimum	0.25	0.32	0.25	0.43	0.66	0.43	0.25	0.32	0.25
Maksimum	2.19	2.20	1.42	2.15	2.15	1.19	2.20	2.20	1.42

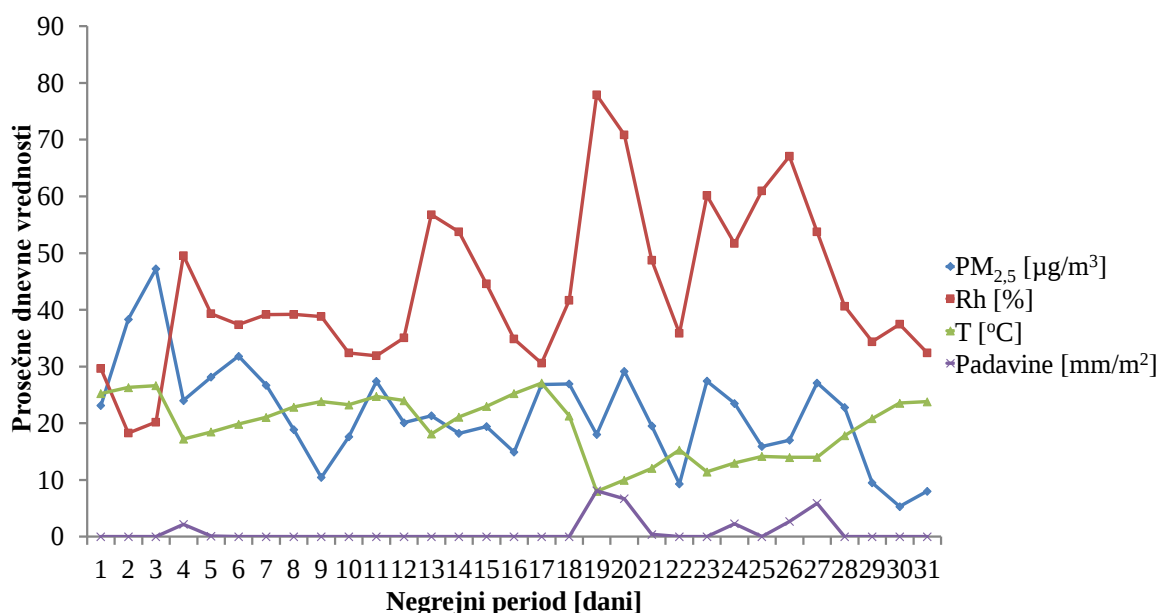
Kako bi se dodatno analizirala dinamika PM_{2,5}, određivani su I/O odnosi PM_{2,5}, tokom radnih dana kada su učenici bili prisutni u učionici i tokom dana vikenda kada učenici nisu bili prisutni. Dobijeni rezultati su pokazali da je I/O odnos PM_{2,5} bio veći radnim danima nego tokom dana vikenda kada su učionice bile prazne i to kako tokom grejnog perioda, tako i tokom i negrejnog perioda. Ovi rezultati ukazuju da ljudske aktivnosti (kretanje učenika i nastavnika) i otvaranje prozora i vrata uticale na distribuciju PM_{2,5}, što potvrđuju rezultati i drugih studija (Amato et al. 2014; Morawska et al. 2017; Wang et al. 2023). Takođe, dodatne analize su pokazale jaku pozitivnu korelaciju između koncentracija PM_{2,5} u učionici i spoljašnjoj sredini, sa koeficijentom korelacije većim od 0,90.

5.1.2. Uticaj meteoroloških uslova na distribuciju PM_{2,5}

Meteorološki uslovi utiču na dinamiku PM_{2,5} u spoljašnjoj sredini, a samim tim i na koncentraciju PM_{2,5} u unutrašnjem prostoru, kao i na izloženost učenika u školama (Baloch et al. 2020; Sadrizadeh et al. 2022). Kako bi se procenio uticaj meteorologije na dinamiku PM_{2,5}, analizirana je međusobna povezanost koncentracije PM_{2,5} sa količinom padavina, temperaturom i vlažnosti vazduha tokom grejne i negrejne sezone (**Slike 13 i 14**).

**Slika 13.** Zavisnost koncentracije PM_{2,5} od meteoroloških parametara u grejnom periodu.

b.



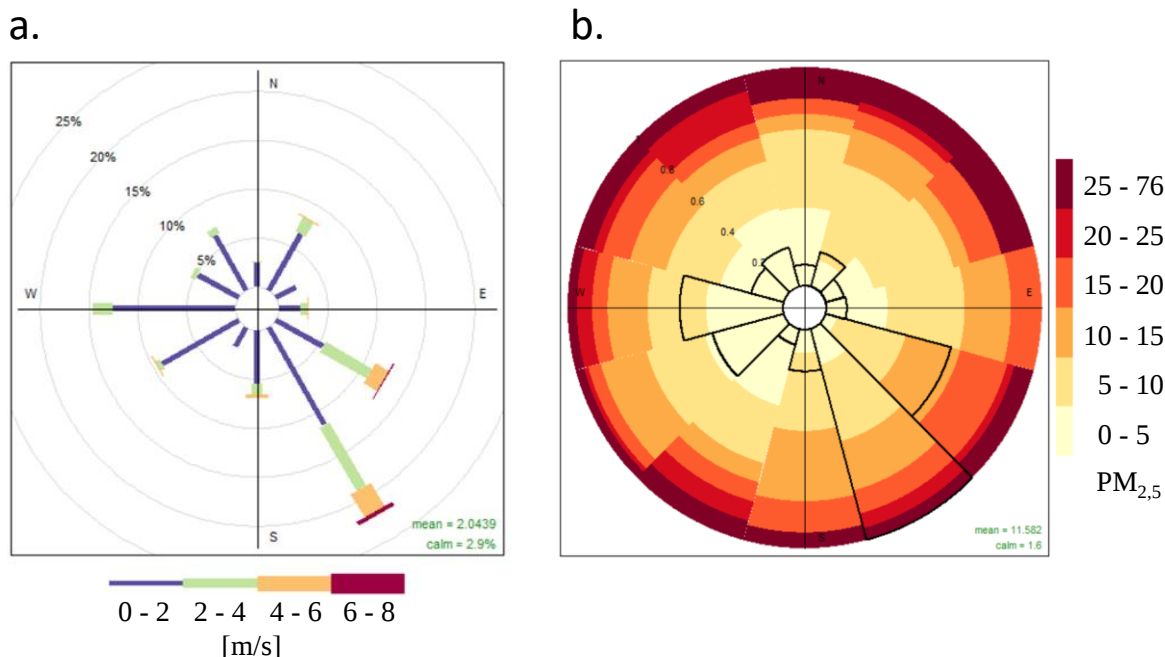
Slika 14. Zavisnost koncentracije $PM_{2,5}$ od meteoroloških parametara u negrejnem periodu.

Dobijeni rezultati ukazuju da tokom celokupne kampanje sakupljanja uzoraka karakterisao je sušni period. Uprkos maloj količini padavina, pokazano je da je koncentracija $PM_{2,5}$ smanjena u danima nakon padavina tokom oba perioda uzorkovanja.

U grejnom periodu, uzorkovanje $PM_{2,5}$ je urađeno od 16. februara do 17. marta 2024. godine kada su temperature vazduha u spoljašnjoj sredini bile u opsegu 6-22 °C, a srednje dnevne temperature su bile bez većih kolebanja. Nasuprot tome, u negrejnoj sezoni, koja je trajala od 30. marta do 30. aprila 2024. godine, temperature vazduha su se kretale u rasponu od 6-31 °C i zabeležene su značajne promene srednjih dnevnih temperatura. Uočena je jaka negativna povezanost između koncentracija $PM_{2,5}$ i temperature, što je posebno evidentno u negrejnem periodu. Sa druge strane, povećana koncentracija $PM_{2,5}$ tokom grejne sezone kada su temperature bile niže može biti posledica povećanog sagorevanja različitih goriva za grejanje stanovništva (Liu et al. 2023; Zender-Świercz et al. 2024). Takođe, sličan trend u negrejnoj sezoni može biti posledica većih emisija iz saobraćaja na nižim temperaturama (Liu et al. 2023; Zender-Świercz et al. 2024).

Koncentracije i distribucija $PM_{2,5}$ u vazduhu u velikoj meri zavise od vlažnosti vazduha (Zender-Świercz et al. 2024). Povećana vlažnost dovodi do higroskopskog rasta PM, što na kraju izaziva sedimentaciju većih PM i uklanjanje manjih PM iz vazduha Braunovom difuzijom (Zhao et al. 2021; Zender-Świercz et al. 2024). Rezultati ukazuju da vlažnost ima mnogo veći uticaj na koncentraciju $PM_{2,5}$ od temperature, kako u grejnom periodu, tako i u negrejnem periodu. Takođe, temperatura i vlažnost vazduha su bile izrazito negativno korelisane ($R=-0,87$).

Vetar ima važnu ulogu u disperziji $PM_{2,5}$, što je posebno važno kada vetrovi duvaju ka područjima sa visokim emisijom zagađujućih supstanci (Huang et al. 2021; Ray et al. 2024). Takođe, analiziran je uticaj vetra na disperziju $PM_{2,5}$ u regionu škole (**Slika 15**).



Slika 15. Ruža vetrova (a) i disperzija PM_{2,5} normalizovana po svakom sektoru vetra.

Lokaciju škole karakteriše relativno ravna topografija, bez prirodnih prepreka. Zgrada se nalazi u dolini dve velike reke, Save i Dunava. Kako bi se prikazao dominantan pravac i smer vetra, kao i njegov uticaj na PM_{2,5} primenjen je OpenAir model. Dobijeni dijagram ruže vetrova ukazuje na relativno stabilan obrazac vetrova, pri čemu su brzine vetra bile u opsegu 0,05-6,83 m/s, dok je prosečna brzina vetra bila 2,04 m/s. Preovlađujući smer vetra bio je iz pravca jugoistoka ka severozapadu, što odgovara vetru Košava. Dodatno, uticaj vetra na koncentraciju PM_{2,5} određivan je kao prosečna koncentracija PM_{2,5} za svaku jedinicu brzine vetra. Prosečna koncentracija PM_{2,5} od 11,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ za različite pravce vetra ukazuje na umeren uticaj vetra na disperziju PM_{2,5} tokom perioda uzorkovanja. Pored toga, jugoistočni vetar, Košava, je uticao na smanjenje koncentracije PM_{2,5}, na šta ukazuju i prethodna istraživanja (Rajšić et al. 2004).

5.2. Koncentracija elemenata prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru

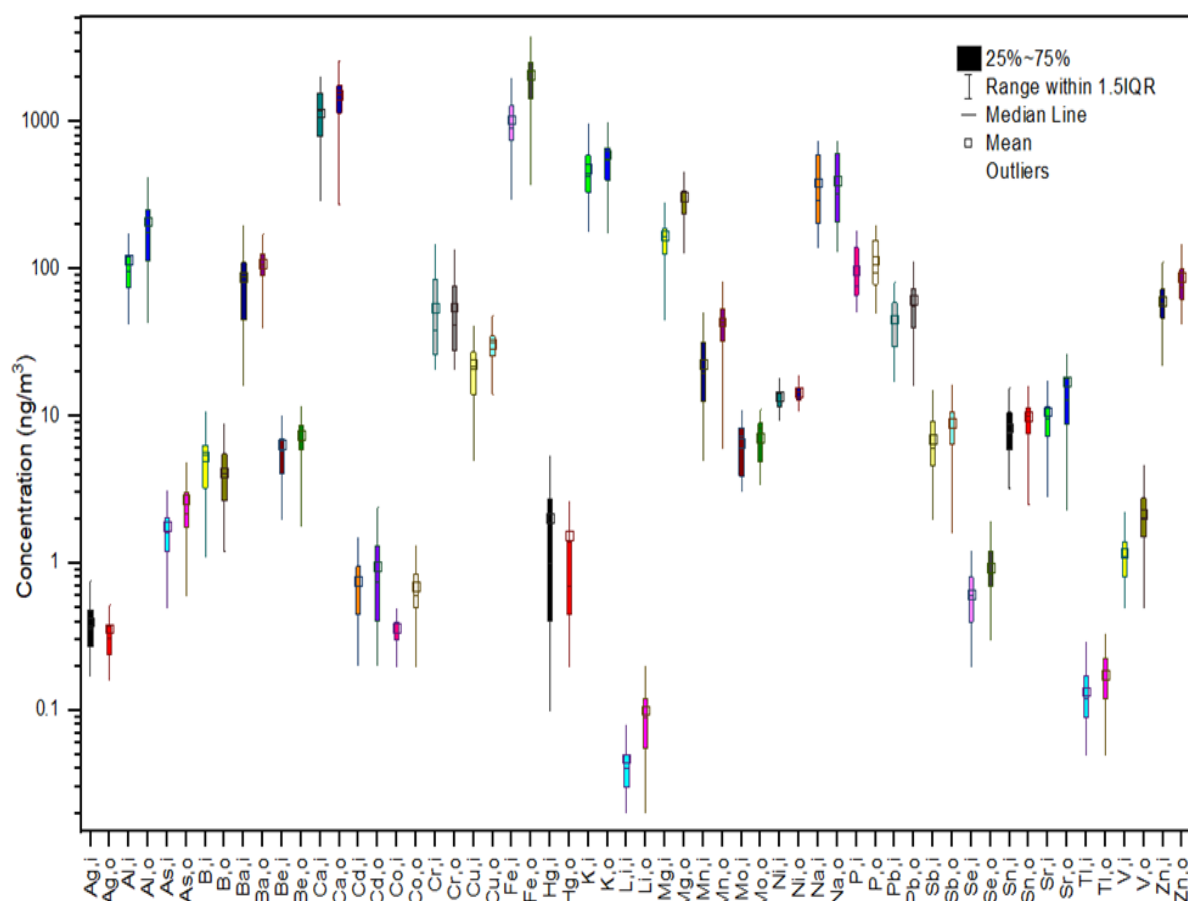
Elementi prisutni na PM_{2,5} uglavnom vode poreklo iz različitih izvora, pri čemu dominantan udeo imaju saobraćaj, industrijska proizvodnja, energetske sektori, kao i prirodni izvori poput zemlje i prašine (Todorović et al. 2020; Luo et al. 2024; Taye et al. 2024). Elementima obogaćene PM_{2,5} dospevaju u unutrašnji prostor škole infiltracijom spoljašnjeg vazduha ili mogu biti unesene u učionicu putem odeće, obuće i ličnih stvari učenika i nastavnika (Oliveira et al. 2019). U **Tabeli 12** su prikazne prosečne dnevne koncentracije ukupnih elemenata prisutnih na PM_{2,5} u školama širom sveta, uključujući i rezultate ove doktorske disertacije.

Analiza elemenata prisutnih na PM_{2,5} je pokazala da su prosečne koncentracije ukupnih elemenata bile 0,131 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ u zatvorenom prostoru i 0,197 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ na otvorenom. Ovi rezultati ukazuju da vazduh u zatvorenom prostoru imao približno 1,5 puta manju količinu elemenata vezanih za PM_{2,5} u poređenju sa vrednostima iz spoljašnje sredine.

Tabela 12. Koncentracija elemenata prisutnih na PM_{2,5} u školama širom sveta.

Lokacija škole	Datum uzorkovanja	Elementi (µg/m ³)		Literatura
		Unutar	Spolja	
SAD, Ohajo	Feb 1999-Avg 2000	1.25-1.48	0.72-1.00	(John et al. 2007)
Portugalija, Lisabon	Maj-Nov 2009	5.14	3.36	(Almeida et al. 2011)
Francuska, Nord-Pas-de-Calais region	Maj 2009-Jul 2009	0.17-4.20	0.33-2.80	(Tran et al. 2012)
Poljska, Vroclav	Dec 2009-Okt 2010	9.80w 1.90s	5.20w 1.50s	(Zwoździak et al. 2013)
Španija, Barselona,	Jan-Jun 2012, Sep 2012-Feb 2013	0.18	0.19	(Rivas et al. 2014)
Poljska, Gornja Silesija	Dec 2013-Maj 2014	0.84–1.04	0.43-0.57	(Mainka et al. 2015)
Čile, Kanaral	Dec 2012-Jul 2013	10.30 4.10	8.30 4.20	(Mesías Monsalve et al. 2018)
Kina, Nanjing	Oct 2015-Jun 2016	NA	0.03-0.25	(Bi et al. 2018)
Kina, Jinan	Jan–Dec 2016		~ 0.30	(Sui et al. 2020)
Malezija, Kuala Lumpur	Sep 2017 Feb 2018	0.88	2.98	(Othman et al. 2019)
SAD	2009-2013	/	/	(Carrion-Matta et al. 2019)
Novi Zealand, Velington	Okt 2016	0.00-11.10	0.00-4.60	(Bennett et al. 2019)
Portugalija, Lisabon	Okt 2017-Jan 2018	6.10	12.00	(Martins et al. 2020)
Vijetnam, Hanoj	Nov 2019-Jan 2020	/	/	(Tran et al. 2020)
Južna Koreja, Seul	Okt-Dec 2019	1.28-10.86	2.50-9.99	(Heo et al. 2021)
Malezija, Kuala Lumpur	Maj-Okt 2016	0.32-0.63	0.31-0.57	(Alias et al. 2021)
Malezija, Kuala Lumpur	/	/	/	(Othman et al. 2022)
Liban, Bejrut	/	/	/	(Alameddine et al. 2022)
Kina, Sian	Mar-Maj 2012	4.60-41.70	3.40–35.30	(Wang et al. 2023)
Srbija, Beograd (vrtić)	Mar-Maj 2010	0.25	0.26	(Živković et al. 2023)
Srbija, Beograd	Feb-Apr 2024	2.0×10 ⁻⁵ - 3.69	2.0×10 ⁻⁵ - 4.04	Ova doktorska disertacija

Udeo svakog pojedinačnog elementa prisutnog na PM_{2,5}, u učionici i dvorištu škole prikazan je na **Slici 16**. Pokazano je da su Ca i Fe bili najviše zastupljeniji elementi u zatvorenom (1,15 i 1,04 µg/m³) i na otvorenom (1,52 i 2,09 µg/m³) prostoru. Sledeći elementi u nizu prema zastupljenosti bili su K, Na, Mg, Al, P i Ba, kako u zatvorenom tako i na otvorenom prostoru. Sa druge strane, elementi sa najnižim izmerenim koncentracijama bili su Tl i Li. Isti trend koncentracija najzastupljenijih elemenata adsorbovanih na PM_{2,5}, u školi i spoljašnjoj sredini ukazuje na zajedničko poreklo PM_{2,5}.



Slika 16. Koncentracije elemenata vezanih na PM_{2,5} u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).

Povišene koncentracije Ca i Fe u PM_{2,5} karakteristične su za urbana područja i potiču od zemljišta i prašine. Takođe, resuspenzija prašine i PM usled aktivnosti učenika i nastavnika dodatno povećavaju koncentraciju elemenata u zatvorenom prostoru (Martins et al. 2020; Zhang et al. 2021).

Među teškim metalima, prosečne koncentracije u zatvorenom prostoru bile su slične onima na otvorenom pri čemu je redosled prema zastupljenosti bio sledeći: Zn>Cr>Pb>Cu>Mn>Ni. Prosečna koncentracija As u zatvorenom prostoru od 1,79 ng/m³ bila je niža od godišnjeg standarda propisanog u EU od 6 ng/m³ (Guerreiro et al. 2014). Rezultati drugih studija ukazuju da koncentracija As u zatvorenom prostoru varira od veoma niske do čak 81,5 ng/m³ (Rivas et al. 2014; Othman et al. 2019; Martins et al. 2020; Wang et al. 2023; Živković et al. 2023). Pored toga, prosečne dnevne koncentracije Ni (13,6 ng/m³), Cd (0,75 ng/m³) i Pb (0,045 µg/m³) bile su niže od godišnjih standarda koje propisuje EU od 20 ng/m³, 5 ng/m³ i 0,5 µg/m³.

U poređenju sa referentnim vrednostima za teške metale koje preporučuje SZO (Pb=500, Cr=0,25, Mn=150, Ni=2,5, V=1000, ng/m³), koncentracije Pb (45,4 ng/m³), Mn (22,4 ng/m³) i V (1,17 ng/m³) u učionici bile su ispod preporučenih vrednosti. Nasuprot tome, koncentracije Cr (7,77 ng/m³ (procenjeno kao 1/7 Cr)) i Ni (13,6 ng/m³) premašile su preporučene granične vrednosti od strane SZO, što je takođe pokazano i u drugim školama smeštenim u urbanim sredinama (Daraei et al. 2023; Sannoh et al. 2024).

U daljem radu izučavan je uticaj sezonskih promena na sadržaj elemenata na PM_{2,5}. Srednje koncentracije ukupnih elemenata u grejnoj sezoni bile su 0,115 µg/m³ u zatvorenom prostoru (u opsegu 0,00002-1,83 µg/m³) i 0,171 µg/m³ na otvorenom prostoru (u opsegu 0,00002-2,86 µg/m³), dok su u negrejnoj sezoni ukupne koncentracije iznosile 0,1461 µg/m³ u zatvorenom prostoru (u opsegu 0,00002-3,69 µg/m³) i 0,220 µg/m³ na otvorenom prostoru (0,00003-4,038). Koncentracije najzastupljenijih elemenata bile su slične u grejnom i negrejnom periodu (**Tabela 13**).

Tabela 13. Koncentracija elemenata prisutnih na PM_{2,5} u grejnom i negrejnom periodu u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).

Element	Grejni period			Negrejni period		
	Srednja vrednost [ng/m ³]	Minimum [ng/m ³]	Maksimum [ng/m ³]	Srednja vrednost [ng/m ³]	Minimum [ng/m ³]	Maksimum [ng/m ³]
Ag,i	0,45	0,17	0,99	0,36	0,17	0,75
Ag,o	0,43	0,16	1,36	0,29	0,18	0,47
Al,i	92,7	46	157	137	42	622
Al,o	150	43	299	267	45	960
As,i	1,9	0,5	6	1,7	0,7	8,4
As,o	3,1	0,6	15,7	2,4	0,8	8,4
B,i	6,7	4,8	14,3	4	1,1	15,6
B,o	5,4	3,4	8,9	2,9	1,2	7,8
Ba,i	103	66	254	74	16	342
Ba,o	120	69	212	99,5	18	203
Be,i	6,74	4,1	12,7	6,11	2	32,6
Be,o	6,91	3,7	10,7	7,86	1,8	24,6
Ca,i	1087	290	1829	1208	317	1995
Ca,o	1340	190	2066	1680	273	4038
Cd,i	0,9	0,2	2,3	0,6	0,2	1,5
Cd,o	1,2	0,2	3,1	0,7	0,2	1,9
Co,i	0,3	0,1	0,7	0,4	0,2	1
Co,o	0,5	0,2	1,2	0,8	0,4	1,7
Cr,i	30,9	21,1	94,1	76,3	24,2	145
Cr,o	30,2	21,2	56,3	77,8	29,1	134
Cu,i	26,4	16,0	40,2	19,4	5,2	109
Cu,o	33,9	20,3	58,1	27,8	8,1	44
Fe,i	750	291	1427	1306	550	3687
Fe,o	1705	369	2856	2443	1064	3855
Hg,i	2,2	0,4	6,3	1,9	0,1	12,6
Hg,o	1,9	0,2	9,3	1,2	0,2	9,5
K,i	583	272	1165	386	179	829
K,o	718	212	2642	488	175	977
L,i,i	0,04	0,02	0,07	0,06	0,02	0,22

Element	Grejni period			Negrejni period		
	Srednja vrednost [ng/m ³]	Minimum [ng/m ³]	Maksimum [ng/m ³]	Srednja vrednost [ng/m ³]	Minimum [ng/m ³]	Maksimum [ng/m ³]
Li,o	0,07	0,02	0,14	0,13	0,03	0,39
Mg,i	136	45	198	201	80	507
Mg,o	254	38	439	360	84	1024
Mn,i	26,2	6	50	18,8	5	62
Mn,o	45,0	10	70	42,4	6	88
Mo,i	8,2	6,5	10,8	5,0	3,1	9,8
Mo,o	8,9	7,3	11,1	5,5	3,4	9,9
Ni,i	12,4	9,3	29,9	14,7	11,1	29
Ni,o	13,3	10,6	21,3	15,6	12,9	21
Na,i	227	139	399	537	194	738
Na,o	234	132	454	557	163	727
P,i	70	51	91	124	61	180
P,o	77	50	117	149	65	195
Pb,i	55	18	138	36	17	105
Pb,o	78	16	320	47	22	74
Sb,i	8,6	2	15,1	5,4	2,4	10
Sb,o	10,5	1,6	21,9	7,4	3,3	13,2
Se,i	0,7	0,2	1,2	0,5	0,2	1,1
Se,o	1,0	0,3	1,9	0,8	0,3	1,7
Sn,i	10,1	6,6	15,5	6,6	3,2	22,1
Sn,o	11,2	6,3	19,7	8,8	2,5	15,3
Sr,i	9,2	2,8	28,4	12,1	3,1	37,9
Sr,o	15,4	2,3	122,0	19	3,2	83,7
Tl,i	0,16	0,05	0,29	0,11	0,05	0,33
Tl,o	0,21	0,05	0,51	0,14	0,06	0,31
V,i	1,1	0,5	2,2	1,2	0,6	2,9
V,o	2,0	0,5	4	2,3	0,7	5,1
Zn,i	67,8	37	113	54,1	22	116
Zn,o	101	42	381	76,3	50	118

5.2.1. Distribucija elemenata prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru

Radi boljeg sagledavanja međusobne zavisnosti elemenata prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjosti škole i spoljašnjoj sredini određivan je I/O odnos masenih koncentracija elemenata. Dobijeni rezultati ukazuju da su srednje vrednosti I/O odnosa većine elemenata bile ispod ili oko 1 (u opsegu od 0,55-0,97), što ukazuje da elementi prisutni na PM_{2,5} prvenstveno potiču iz spoljašnjih izvora (**Tabela 14**).

Tabela 14. Odnos koncentracija elemenata prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).

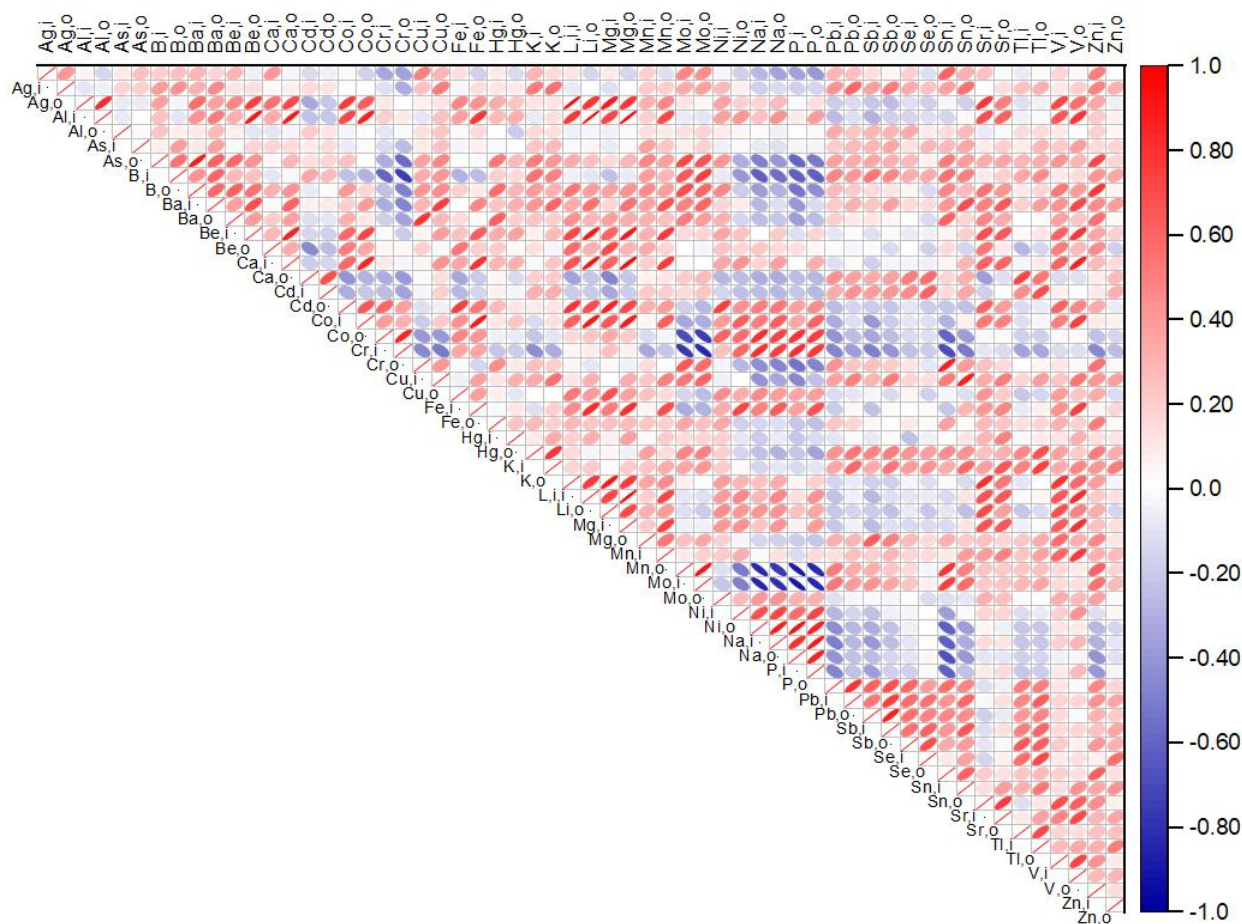
I/O odnos	Srednja vrednost	SE	Minimum	Maksimum
Ag	1,27	0,08	0,43	2,69
Al	0,68	0,06	0,21	2,44
As	0,84	0,11	0,08	6,46
B	1,39	0,10	0,30	4,08
Ba	0,82	0,05	0,19	1,99
Be	0,95	0,08	0,27	4,79
Ca	0,97	0,12	0,25	5,91
Cd	0,92	0,05	0,33	2,50
Co	0,57	0,03	0,20	1,20
Cr	1,03	0,06	0,43	3,48
Cu	0,75	0,06	0,23	3,41
Fe	0,55	0,05	0,19	2,18
Hg	2,83	0,42	0,06	12,60
K	0,88	0,04	0,36	2,02
Li	0,58	0,05	0,18	2,00
Mg	0,65	0,06	0,21	2,71
Mn	0,57	0,05	0,12	2,33
Mo	0,90	0,02	0,66	1,44
Ni	0,95	0,03	0,55	2,03
Na	1,00	0,03	0,27	1,62
P	0,88	0,02	0,39	1,44
Pb	0,79	0,04	0,38	1,50
Sb	0,80	0,02	0,43	1,32
Se	0,70	0,04	0,25	2,33
Sn	0,86	0,04	0,37	1,19
Sr	0,86	0,09	0,23	3,50
Tl	0,81	0,03	0,47	2,06
V	0,59	0,03	0,29	1,29
Zn	0,78	0,04	0,13	1,66

Posebno nizak I/O odnos procenjen je za Co (0,57), Fe (0,55), Li (0,58), Mn (0,57) i V (0,59), što ukazuje na visoke koncentracije ovih elemenata u spoljašnjim PM_{2,5}, što se može pripisati nekim građevinskim radovima (Lu et al. 2005).

Osim I/O odnosa Na (0,99) i Cr (1,03), koji su iznosili 1, primetno veći I/O odnosi su procenjeni za Ag (1,27), B (1,40) i Hg (2,83), što implicira da zagađivači u zatvorenom prostoru imaju veći efekat od spoljašnjih izvora. Važno je da su koncentracije žive u zatvorenom prostoru bile značajno niže od preporučene granice (WHO 2003).

5.2.2. Zavisnost koncentracija elemenata prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru

Pirsonov koeficijent korelacije je korišćen za određivanje odnosa između unutrašnjih i spoljašnjih koncentracija elemenata (Slika 17).



Slika 17. Korelacija između elemenata prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).

Jaka pozitivna korelacija ($R > 0,90$) pokazana je između unutrašnjih i spoljašnjih koncentracija Mo i Na. Relativno visok koeficijent korelacije, u opsegu 0,79 - 0,89, imali su Al, K, P, Pb i Sb u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru. Nešto niža korelacija ($R = 0,62-0,77$) zabeležena je kod Cd, Co, Li, Mg, Se, Sr, Tl i V u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru. Jaka pozitivna korelacije ($R > 0,90$) za Al, Be, Ca, Li i Mg i Co, Fe, Li i Mg u spoljašnjoj sredini ukazuju na uobičajene izvore emisija, kao što su zemljana prašina i saobraćaj. Međutim, slaba korelacija između glavnih elemenata zemljine kore poput Ca, Fe, Na i K ukazuje na različite izvore emisije (Lopez et al. 2023).

5.3. Koncentracija PAH prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru

Povećana potrošnja fosilnih goriva i drugi procesi sagorevanja suočavaju velike gradove širom sveta sa istim ekološkim problemom, kao što je visoka koncentracija PAH u vazduhu (Patel et al. 2020; Xu et al. 2024).

U ovoj doktorskoj disertaciji određivane su koncentracije šesnaest prioriternih PAH prisutnih na PM_{2,5} u zatvorenom i na otvorenom prostoru. Prosečne koncentracije ukupnih PAH (Σ PAH) prisutnih na PM_{2,5} bile su $9,6 \pm 2,4$ ng/m³ u zatvorenom prostoru i $11,3 \pm 3,9$ ng/m³ na otvorenom tokom perioda uzorkovanja.

Dobijeni rezultati ukazuju da su koncentracija Σ PAH bile veće u spoljašnjoj sredini nego u zatvorenom prostoru, što je u skladu sa distribucijom PM_{2,5}. Iako su mnogobrojne studije izučavale koncentracije PAH u školama, mali broj je određivao PAH prisutne na PM_{2,5} (**Tabela 15**).

Tabela 15. Koncentracije PAH prisutnih u PM_{2,5} u školama širom sveta.

Lokacija škole	Datum uzorkovanja	Analitička metoda	Broj PAH	Unutar Σ PAHs (ng/m ³)	Spolja Σ PAHs (ng/m ³)	Literatura
SAD, Južna Kalifornija	2002-2003	HPLC-FLD	15	/	0.42-1.78	(Eiguren-Fernandez et al. 2007)
Italija, Rim	Apr-Maj 2012 Jul-Nov 2012	GC-MS	8	0.21-1.32 1.6-16	0.36-2.56 4.2-18.5	(Gatto et al. 2014)
Litvanija, Kaunas	Zima, 2011/2012	GC-MS	15	20.3-131	40.7-121	(Krugly et al. 2014)
Italija, Rim	Nov-Dec 2011 Maj-Jun 2012	GC-MS	8	1.8-8.3	6.3-17.9	(Romagnoli et al. 2014)
Francuska, Strasbur	Okt-Nov 2013	HPLC-FLD-PAD	16	0.27	/	(Liaud et al. 2014)
Portugal, Porto (vrtić)	Feb-Apr 2011	HPLC-FLD-PAD	18	3.0-7.6	4.0-13	(Oliveira et al. 2015)
Kina, Si'an	Maj 2012	GC-MS	16	53.2 $\pm$ 21.8	72.9 $\pm$ 35.7	(Xu et al. 2015)
Kina, Peking	Nov 2013	GC-MS	14	/	36.8-388	(Xu et al. 2015)
Italija, Rim	Mar 2013	GC-MS	11	2.79 $\pm$ 1.36	/	(Romagnoli et al. 2016)
Portugalija, 1. Porto, 2. Čavez (vrtić)	Apr-Jun 2013	HPLC-FLD-PAD	18	1.18-2.23 2.60-7.77	0.74-4.27 2.70-10.50	(Oliveira et al. 2016)
Kina, Si'an	Mar 2012	GC-MS	25	50.3-112	49.6-140	(Wang et al. 2017)
Italija, Taranto	Dec 2014	GC-MS	8	1.51-2.36	/	(Di Gilio et al. 2017)
Poljska, 1. Dabrova Gornica 2. Zlatni Potok	Apr-Maj 2010 Mar-Apr 2010	HPLC-FLD	15	14.6-72.9 25.0-89.5	18.0-118 22.8-108	(Błaszczuk et al. 2017)
Portugalija, Porto	Jan-Apr 2014	HPLC-FLD-PAD	18	2.8-54	6.4-48	(Oliveira et al. 2017)

Lokacija škole	Datum uzorkovanja	Analitička metoda	Broj PAH	Unutar Σ PAHs (ng/m ³)	Spolja Σ PAHs (ng/m ³)	Literatura
Kina, Peking	Jan 2015 Sep 2015	HPLC-FLD-PAD	11	0.25 3.61	0.40 5.12	(Zhang et al. 2020)
Kina, Peking	Okt 2016-Mar 2017	UPLC-H-Class	12	8.0-83.0	6.5-108.4	(Ouyang et al. 2020)
Vijetnam, Hanoj	Mar-Apr 2018	GC-MS	15	38.7	93.3	(Ha et al. 2020)
Francuska, Mobež	Apr-Maj 2014	HPLC-FLD	16	0.37	0.34	(Liaud et al. 2021)
Malezija, Klang Valley		GC-MS	16	5.58±4.72 3.69±3.19	5.76±2.20 3.72±2.53	(Hisamuddin et al. 2022)
Srbija, Beograd (vrtić)	Mar-Maj 2010	GC-MS	16	3.68±2.50	5.5±3.54	(Živković et al. 2023)
Srbija, Beograd	Feb-Apr 2024	GC-MS	16	5.52-16.59	6.06-27.43	Ova doktorska disertacija

Većina ovih studija je izučavala PAH u školama u visoko urbanizovanim područjima. Širom sveta zabeležene su različite koncentracije Σ PAH, koje su bile u opsegu 0,21-131 ng/m³ u zatvorenom prostoru i 0,36-388 ng/m³ na otvorenom prostoru. Uzimajući u obzir značajne varijacije u dizajnu studija, pre svega u broju određivanih PAH, razlikama u uzorkovanju, dostupnosti podataka za unutrašnji i spoljašnji prostor, kao i specifičnostima školske zgrade i okruženja škole, poređenje koncentracija Σ PAH je teško izvodljivo.

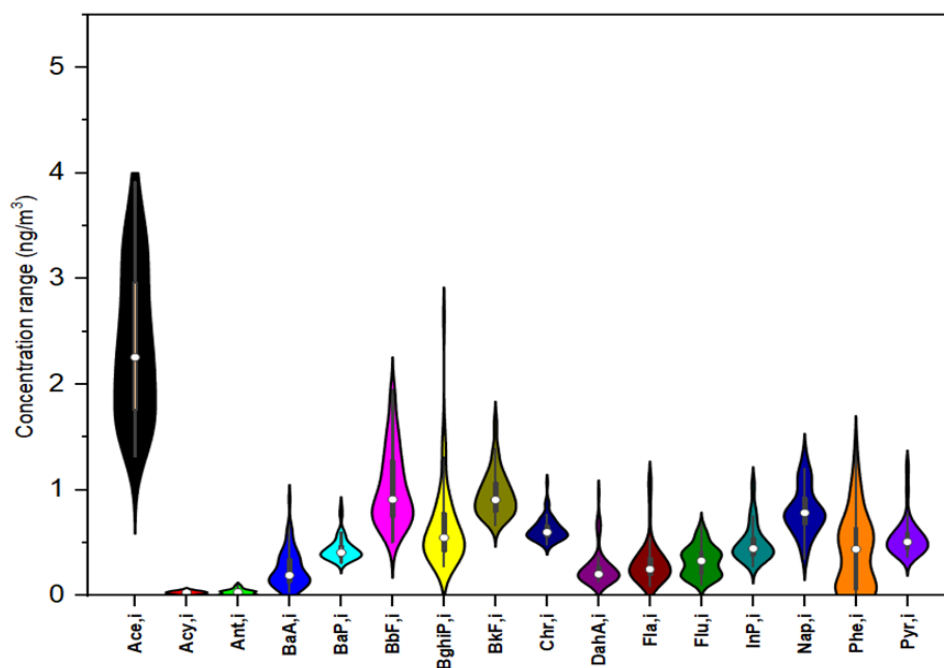
Jedna od sličnosti pokazana u svim studijama jesu veće koncentracije Σ PAH u spoljašnjoj sredini, što ukazuje na veći značaj spoljašnjih izvora PAH.

Pored toga, ranija istraživanja sprovedena u obrazovnim ustanovama u Srbiji su izučavala koncentraciju Σ PAH u ukupnom vazduhu (čestična i gasna faza) u školi (Živković et al. 2015), PAH vezanih za PM₁₀ u školi (Jovanović et al. 2014) i PAH prisutnih na PM_{2,5} u vrtiću (Živković et al. 2023). Shodno tome, poređenje rezultata za PAH prisutne na PM_{2,5} u ovoj doktorskoj tezi sa ranijim lokalnim studijama nije relevantno. Ipak, poređenjem koncentracija Σ PAH prisutnih na PM_{2,5} u spoljašnjoj sredini sa relativno sličnim uslovima, pokazane su značajno veće koncentracije (11,3±3,9 ng/m³) u odnosu na koncentracije Σ PAH (5,5±3,54 ng/m³) opisanih u jednoj ranijoj studiji (Živković et al. 2023), što sugerise na negativnu evolutivnu prirodu zagađenja vazduha u Beogradu, s obzirom da je razlika u uzorkovanju PM_{2,5} veća od jedne decenije.

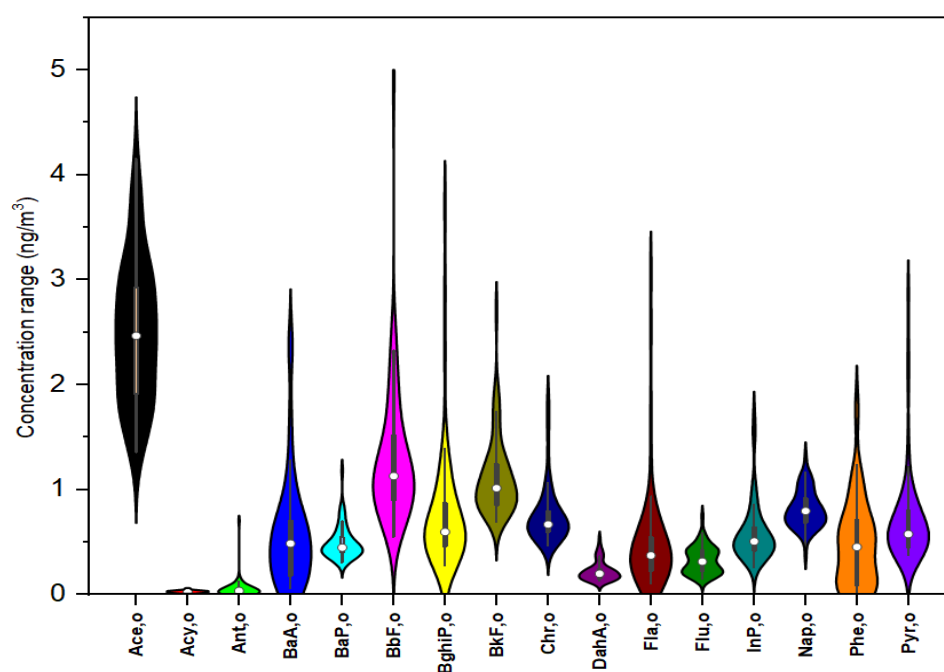
Dalja analiza PAH prisutnih na PM_{2,5} bila je usmerena ka određivanju koncentracije pojedinačnih PAH (**Slika 18 i Slika 19**) i udela na osnovu broja aromatičnih prstenova (**Slika 20**), imajući u vidu da su oba ova parametra usko povezana sa njihovim toksikološkim svojstvima.

Pokazano je da su Ace, BbF i BkF bili najzastupljeniji PAH u zatvorenom i na otvorenom prostoru. Udeo Ace, BbF i BkF u Σ PAH iznosio je 24%, 10% i 10% u učionici, dok je u spoljašnjoj sredini njihov doprinos u Σ PAH bio 22%, 11% i 10%. Prosečna koncentracija BaP je bila 0,44 ng/m³ u unutrašnjem prostoru i 0,49 ng/m³ na otvorenom prostoru. Izmerene koncentracije BaP su bile niže od preporučene godišnje vrednosti od 1 ng/m³ koju je predložila Evropska unija, ali su bile više od gornje granice od 0,12 ng/m³ na godišnjem nivou, koju definiše standard SZO (Guerreiro et al. 2014).

Važno je napomenuti, da je uzorkovanje PM_{2,5} rađeno tokom tri meseca gde nisu uključeni letnji meseci, tokom kojih su obično niže koncentracije PM i PAH, tako da je teško aproksimovati vrednosti koncentracija BaP na godišnjem nivou.



Slika 18. Koncentracije PAH prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem prostoru.



Slika 19. Koncentracije PAH prisutnih na PM_{2,5} spoljašnjoj sredini.

Ispitivan je uticaj sezonskih varijacija na koncentracije PAH (**Tabela 16**). U grejnom periodu koncentracije Σ PAH ($11,1 \pm 2,3$ ng/m³ u zatvorenom i $12,5 \pm 4,2$ ng/m³ na otvorenom)

su bile veće u poređenju sa koncentracijama Σ PAH u negrejnem periodu ($8,2 \pm 1,6$ ng/m³ u zatvorenom i $9,9 \pm 3,0$ ng/m³ na otvorenom). Ovaj sezonski trend sa većom koncentracijom PAH tokom perioda grejanja je pokazan i u drugim studijama (Chen et al. 2017; Vo et al. 2024). Takođe, prosečne koncentracije pojedinačnih PAH su bile veće u grejnom periodu u poređenju sa vrednostima u negrejnem periodu, osim kod DahA što se može dovesti u vezu sa povećanom frekvencijom iz saobraćaja (Zheng et al. 2018).

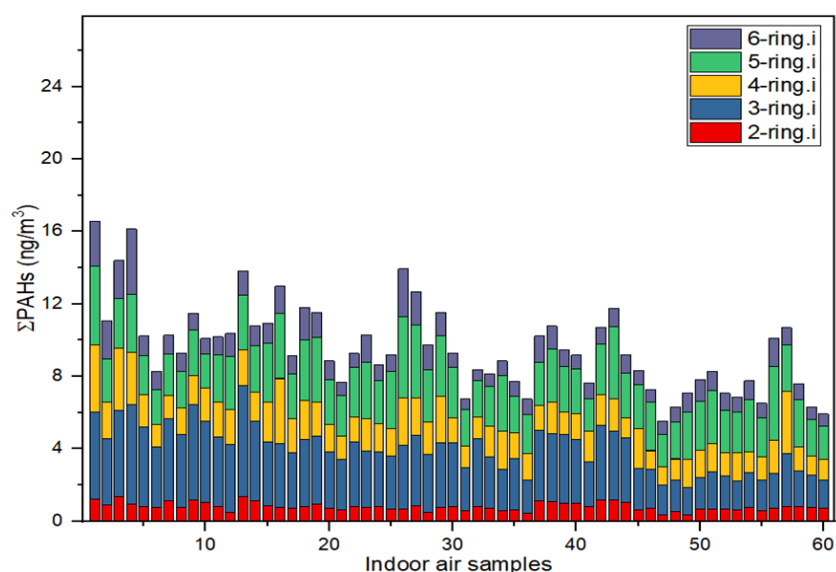
Tabela 16. Koncentracija PAH prisutnih na PM_{2,5} u grejnom i negrejnem periodu u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).

PAH	Grejni period			Negrejni period		
	Srednja vrednost [ng/m ³]	Minimum [ng/m ³]	Maksimum [ng/m ³]	Srednja vrednost [ng/m ³]	Minimum [ng/m ³]	Maksimum [ng/m ³]
Ace,i	2,68	1,90	3,92	2,12	1,31	3,60
Ace,o	2,66	1,88	3,83	2,36	1,36	4,16
Acy,i	0,04	0,02	0,06	0,02	0,00	0,06
Acy,o	0,04	0,02	0,06	0,03	0,01	0,06
Ant,i	0,05	0,03	0,10	0,02	0,00	0,09
Ant,o	0,06	0,02	0,15	0,04	0,00	0,70
BaA,i	0,34	0,10	0,91	0,17	0,03	0,48
BaA,o	0,77	0,19	2,43	0,44	0,06	2,38
BaP,i	0,49	0,36	0,85	0,39	0,31	0,59
BaP,o	0,55	0,36	1,18	0,44	0,30	0,81
BbF,i	1,15	0,65	1,95	0,90	0,50	1,86
BbF,o	1,45	0,59	4,89	1,16	0,55	2,52
BghiP,i	0,84	0,40	2,64	0,46	0,28	0,95
BghiP,o	1,04	0,41	3,71	0,55	0,28	1,39
BkF,i	1,05	0,74	1,66	0,88	0,66	1,39
BkF,o	1,25	0,76	2,70	1,00	0,69	1,98
Chr,i	0,68	0,53	1,07	0,58	0,49	0,74
Chr,o	0,85	0,58	1,88	0,67	0,47	1,57
DahA,i	0,19	0,13	0,34	0,33	0,14	0,97
DahA,o	0,18	0,13	0,28	0,27	0,13	0,53
Fla,i	0,39	0,18	1,11	0,24	0,09	0,96
Fla,o	0,58	0,20	1,80	0,45	0,10	3,10
Flu,i	0,44	0,30	0,67	0,22	0,11	0,40
Flu,o	0,42	0,18	0,75	0,24	0,15	0,53
InP,i	0,56	0,32	1,07	0,44	0,28	0,72
InP,o	0,67	0,36	1,72	0,52	0,26	1,05
Nap,i	0,86	0,48	1,33	0,75	0,35	1,18
Nap,o	0,81	0,55	1,12	0,82	0,38	1,31
Phe,i	0,70	0,34	1,40	0,16	0,00	0,97

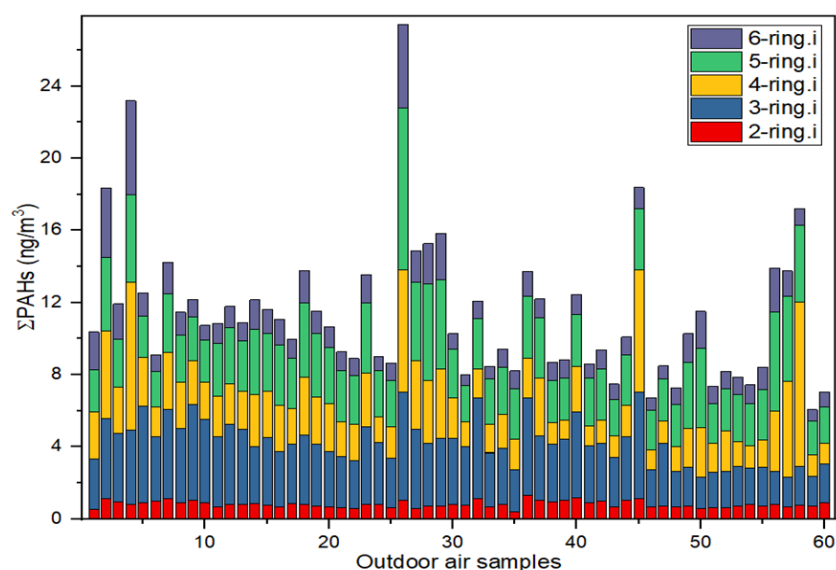
PAH	Grejni period			Negrejni period		
	Srednja vrednost [ng/m ³]	Minimum [ng/m ³]	Maksimum [ng/m ³]	Srednja vrednost [ng/m ³]	Minimum [ng/m ³]	Maksimum [ng/m ³]
Phe,o	0,72	0,32	1,84	0,27	0,01	1,68
Pyr,i	0,60	0,42	1,19	0,51	0,37	1,24
Pyr,o	0,77	0,43	2,04	0,67	0,37	2,87

S obzirom na tendenciju veće toksičnosti PAH sa većim brojem aromatičnih prstenova, izučavani PAH prisutnih na PM_{2,5} su klasifikovani u pet grupa na osnovu broja prstenova i to od 2 do 6 prstenova, a potom je određivan njihov udeo u ΣPAH. Dobijeni rezultati ukazuju na značajne varijacije u distribuciji PAH grupisanih na osnovu broja prstenova tokom uzorkovanja PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru (**Slika 20**).

a.



b.



Slika 20. Prstenasta analiza PAH vezanih za PM_{2,5} (a) u unutrašnjem prostoru i (b) spoljašnjoj sredini.

Pokazano je da su PAH sa dva prstena bili najmanje zastupljeni PAH u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini. Suprotno tome, PAH sa tri i pet aromatičnih prstenova su bili najzastupljeniji, u oba okruženja. Sledeći u nizu prema zastupljenosti bili su PAH sa četiri, a potom PAH sa šest prstenova unutra i spolja. Imajući u vidu da su glavni izvori PAH u unutrašnjem prostoru procesi kuvanja i grejanja, a kako u školi, pre svega u učionici u kojoj su uzorkovane PM_{2,5}, ovi procesi nisu prisutni i da je trend raspodele PAH prema broju prstenova isti u oba okruženja, sve zajedno ukazuje da su glavni izvori PAH detektovani na PM_{2,5} u učionici poreklom iz spoljašnje sredine (Oliveira et al. 2019).

5.3.1. Distribucija PAH prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru

Vrednosti I/O odnosa koncentracija PAH u unutrašnjoj sredini i spoljašnjem prostoru su uglavnom bile niže ili blizu jedan, što ukazuje na veći udeo izvora PAH iz spoljašnje sredine (Tabela 17). Većina PAH sa većim brojem aromatičnih prstenova, osim DahA, imali su I/O odnos manji od jedan, ukazujući na visoke koncentracije PAH prisutne na PM_{2,5} u spoljašnjoj sredini. Pored Acy, Ant, Flu i Nap čije su I/O odnosi bili oko 1, značajno veća vrednost I/O odnosa zabeležena je za DahA (1,18) i Phe (1,24), što može biti posledica povećane emisije iz saobraćaja i akumulacije u PM_{2,5} u učionici imajući u vidu blizinu visoko frekventnih saobraćajnica, čemu dodatno doprinosi neki izvor u unutrašnjem prostoru poput različitih aktivnosti učenika (Morawska et al. 2017; Oliveira et al. 2019; Wang et al. 2020).

Tabela 17. Odnos koncentracija PAH prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).

I/O odnos	Srednja vrednost	SE	Minimum	Maksimum
Ace	0,97	0,03	0,38	1,49
Acy	1,06	0,07	0,00	3,00
Ant	1,01	0,16	0,00	9,00
BaA	0,70	0,09	0,04	4,14
BaP	0,93	0,03	0,60	1,93
BbF	0,88	0,05	0,40	2,55
BghiP	0,90	0,03	0,47	1,48
BkF	0,90	0,03	0,47	1,84
Chr	0,88	0,02	0,47	1,22
DahA	1,18	0,06	0,50	2,69
Fla	0,88	0,08	0,04	2,62
Flu	1,04	0,05	0,30	3,33
InP	0,89	0,03	0,50	1,36
Nap	1,02	0,04	0,33	2,18
Phe	1,24	0,21	0,00	9,70
Pyr	0,89	0,04	0,18	1,70

5.3.2. Zavisnost koncentracija PAH prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru

Uzajamna povezanost PAH prisutnih na PM_{2,5} u zatvorenom prostoru i spoljašnjoj sredini ispitivana je primenom Pirsonove korelacije (**Tabela 18**). Jaka korelacija sa koeficijentima korelacije preko 0,90, i umereno jaka korelacija sa koeficijentima u opsegu od 0,80 do 0,89 je pokazana za više PAH u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini.

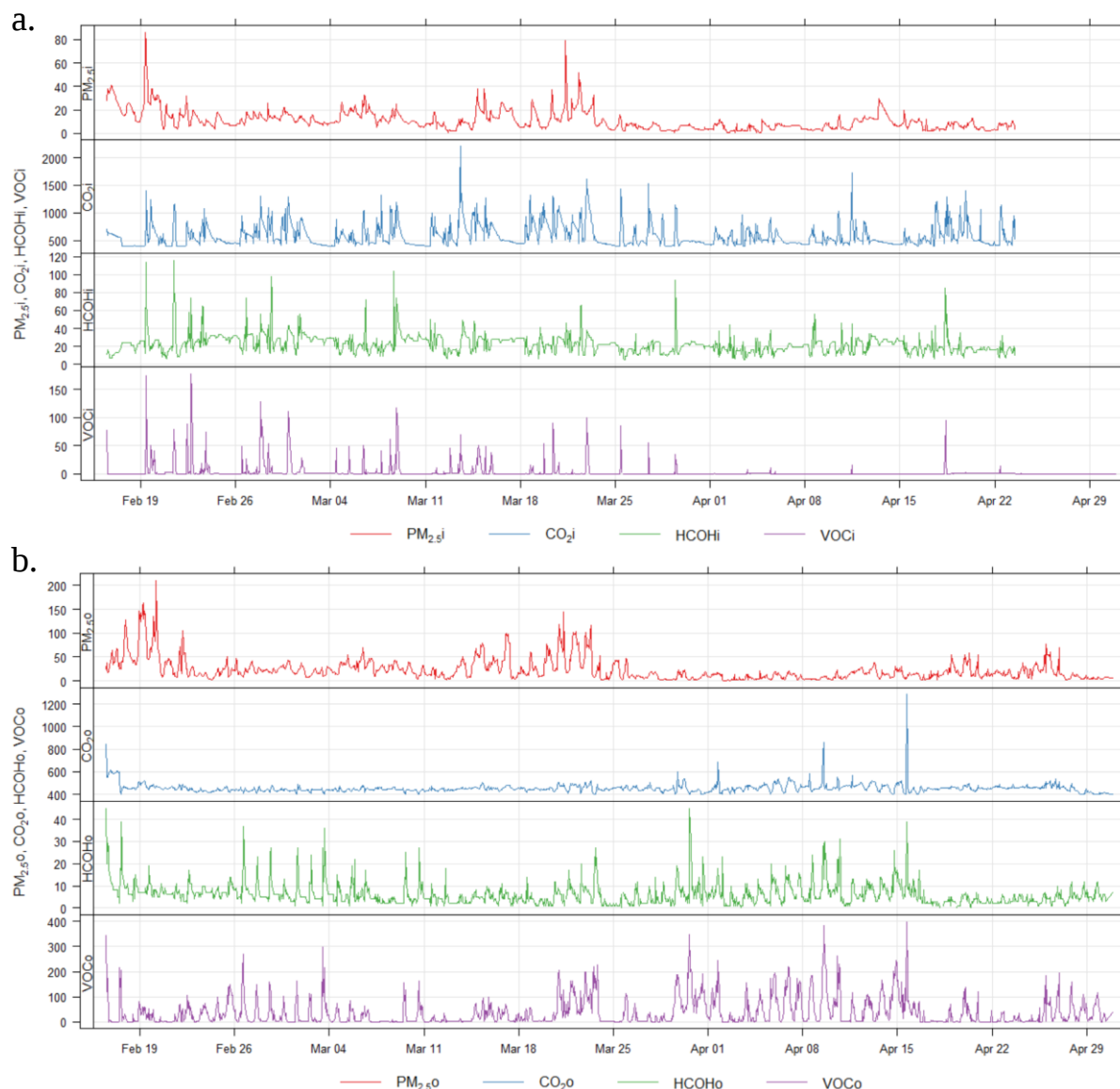
Ovi rezultati ukazuju na to da su koncentracije velikog broja PAH prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru međusobno zavisne. Imajući u vidu ove rezultate i nedostatak značajnih pirolitičkih procesa u školi, prisutvo PAH na PM_{2,5} u učionici većim delom je uzrokovano spoljašnjim izvorima, na šta ukazuju i literaturni podaci (Ouiang et al., 2020; Zhang et al., 2020). Takođe, slabije korelacije uočene za određene PAH mogu se objasniti različitim izvorima emisije koji doprinose varijabilnosti sadržaja PM_{2,5} njihovim koncentracijama.

Tabela 18. Korelacija između PAH prisutnih na PM_{2,5} u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).

	Ace,i	Ace,o	Acy,i	Acy,o	Ant,i	Ant,o	BaA,i	BaA,o	BaP,i	BaP,o	BbF,i	BbF,o	BghiP,i	BghiP,o	BkF,i	BkF,o	Chr,i	Chr,o	DahA,i	DahA,o	Fla,i	Fla,o	Flu,i	Flu,o	InP,i	InP,o	Nap,i	Nap,o	Phe,i	Phe,o	Pyr,i
Ace,o	0.603																														
Acy,i	0.747	0.37																													
Acy,o	0.651	0.691	0.531																												
Ant,i	0.425	0.2	0.589	0.456																											
Ant,o	-0.016	0.43	0.013	0.155	0.115																										
BaA,i	0.013	-0.02	0.298	0.053	0.229	-0.002																									
BaA,o	0.12	0.019	0.085	0.276	0.361	0.137	0.147																								
BaP,i	0.246	-0.044	0.462	0.294	0.412	0.07	0.564	0.462																							
BaP,o	0.002	-0.034	0.122	0.26	0.318	0.188	0.168	0.826	0.568																						
BbF,i	0.115	-0.167	0.368	0.113	0.31	0.017	0.611	0.378	0.857	0.502																					
BbF,o	-0.048	-0.003	0.038	0.238	0.195	0.192	0.126	0.796	0.483	0.929	0.424																				
BghiP,i	0.31	0.035	0.435	0.337	0.419	0.051	0.266	0.336	0.727	0.313	0.476	0.199																			
BghiP,o	0.251	0.118	0.274	0.415	0.349	0.167	0.174	0.768	0.559	0.828	0.399	0.692	0.553																		
BkF,i	0.284	-0.002	0.455	0.262	0.394	0.088	0.614	0.39	0.93	0.507	0.892	0.425	0.557	0.447																	
BkF,o	0.026	0.001	0.112	0.259	0.318	0.213	0.154	0.826	0.554	0.975	0.499	0.932	0.264	0.775	0.504																
Chr,i	0.283	0.005	0.486	0.262	0.496	0.073	0.628	0.455	0.93	0.458	0.774	0.35	0.746	0.515	0.86	0.442															
Chr,o	0.129	0.035	0.175	0.298	0.406	0.176	0.157	0.877	0.51	0.891	0.397	0.771	0.44	0.901	0.406	0.875	0.497														
DahA,i	0.434	0.169	0.305	0.071	-0.297	-0.205	-0.141	-0.224	-0.097	-0.244	-0.101	-0.162	-0.095	-0.177	-0.072	-0.228	-0.095	-0.211													
DahA,o	0.232	0.439	0.031	0.167	-0.473	-0.056	-0.107	-0.249	-0.272	-0.26	-0.253	-0.144	-0.178	-0.205	-0.233	-0.248	-0.257	-0.222	0.598												
Fla,i	0.114	0.03	0.389	0.077	0.383	-0.018	0.936	0.219	0.544	0.202	0.562	0.139	0.279	0.226	0.582	0.197	0.662	0.253	-0.059	-0.132											
Fla,o	0.098	0.169	-0.044	0.228	0.136	0.102	0.059	0.777	0.218	0.447	0.165	0.471	0.184	0.416	0.19	0.451	0.253	0.516	-0.174	-0.035	0.091										
Flu,i	0.629	0.326	0.768	0.55	0.837	0.105	0.218	0.226	0.469	0.225	0.344	0.077	0.476	0.374	0.455	0.202	0.517	0.272	-0.167	-0.358	0.3	0.086									
Flu,o	0.359	0.504	0.435	0.63	0.528	0.2	0.093	0.339	0.271	0.432	0.193	0.364	0.108	0.449	0.296	0.427	0.205	0.37	-0.264	-0.188	0.13	0.295	0.623								
InP,i	0.286	-0.01	0.404	0.297	0.349	0.004	0.277	0.383	0.767	0.363	0.53	0.278	0.955	0.549	0.58	0.319	0.78	0.471	0.024	-0.104	0.306	0.218	0.397	0.077							
InP,o	0.121	0.09	0.143	0.346	0.185	0.178	0.124	0.711	0.52	0.827	0.352	0.745	0.497	0.914	0.394	0.762	0.452	0.824	-0.07	-0.081	0.171	0.346	0.198	0.352	0.551						
Nap,i	0.846	0.327	0.724	0.472	0.434	-0.126	0.045	0.06	0.244	-0.087	0.15	-0.13	0.328	0.099	0.287	-0.084	0.332	0.031	0.502	0.195	0.179	0.055	0.577	0.178	0.354	0.046					
Nap,o	0.347	0.768	0.155	0.525	-0.019	0.438	-0.148	0.054	-0.213	-0.024	-0.3	0.048	-0.118	0.09	-0.187	-0.002	-0.158	0.041	0.234	0.508	-0.096	0.175	0.029	0.352	-0.093	0.185	0.276				
Phe,i	0.467	0.245	0.632	0.466	0.969	0.117	0.372	0.34	0.467	0.298	0.382	0.159	0.455	0.365	0.467	0.295	0.551	0.384	-0.321	-0.463	0.491	0.141	0.874	0.544	0.371	0.183	0.426	-0.034			
Phe,o	0.286	0.56	0.264	0.565	0.484	0.381	0.072	0.417	0.303	0.462	0.221	0.413	0.181	0.434	0.315	0.477	0.247	0.426	-0.349	-0.177	0.105	0.48	0.525	0.846	0.157	0.33	0.086	0.337	0.51		
Pyr,i	0.115	-0.001	0.372	0.06	0.362	-0.029	0.917	0.261	0.579	0.222	0.584	0.163	0.282	0.234	0.61	0.222	0.706	0.278	-0.028	-0.127	0.989	0.133	0.274	0.097	0.327	0.184	0.199	-0.104	0.46	0.079	
Pyr,o	0.084	0.117	-0.049	0.209	0.137	0.085	0.067	0.826	0.25	0.511	0.198	0.519	0.215	0.478	0.213	0.514	0.284	0.593	-0.164	-0.04	0.107	0.988	0.063	0.249	0.255	0.409	0.053	0.151	0.134	0.428	0.154

5.4. Koncentracije PM_{2,5}, CO₂, HCHO i TVOC u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru

Radi boljeg uvida u međusobnu zavisnost kvaliteta vazduha u učionici i u dvorištu škole dodatno su merene koncentracije PM_{2,5}, CO₂, HCHO i TVOC u toku grejnog i negrejnog perioda, primenom kontinualnih detektora. Distribucija dnevnih koncentracija PM_{2,5}, CO₂, HCHO i TVOC tokom celog perioda prikazana je na **Slici 21**.



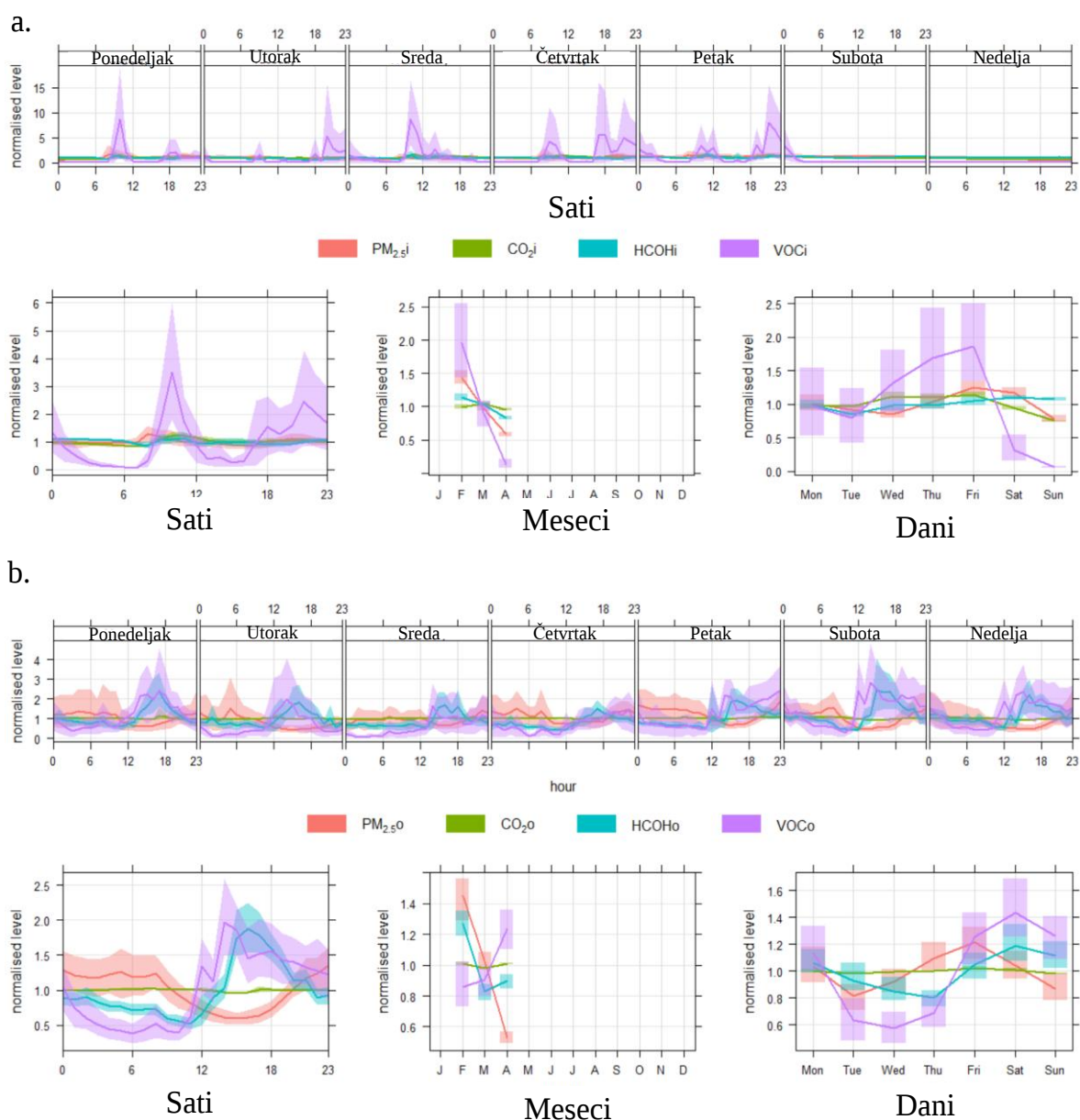
Slika 21. Distribucija dnevnih koncentracija PM_{2,5}, CO₂, HCHO i TVOC tokom celog perioda u unutrašnjem prostoru (a) i spoljašnjoj sredini (b).

Srednje vrednosti koncentracija PM_{2,5} bile su $11,0 \pm 8,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (u opsegu $1\text{--}86 \mu\text{g}/\text{m}^3$) u učionici i $23,0 \pm 22,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (u opsegu $1\text{--}210 \mu\text{g}/\text{m}^3$) u spoljašnjoj sredini. Iako je trend koncentracija PM_{2,5} u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini isti kao i kod gravimetrijskog merenja PM_{2,5}, srednje vrednosti koncentracija PM_{2,5} su bile niže.

Sa druge strane, prosečne koncentracija CO₂ bile su $584 \pm 199 \text{ ppm}$ (u opsegu $400\text{--}2206 \text{ ppm}$) u učionici i $453 \pm 40 \text{ ppm}$ (u opsegu $400\text{--}1286 \text{ ppm}$) u spoljašnjoj sredini, ukazujući na

veći doprinos unutrašnjih izvora, što je pokazano i u drugim studijama (Lazović et al. 2016; Baloch et al. 2020).

Prosečna koncentracija HCHO bila je $22,4 \pm 10,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (u opsegu $5\text{--}116 \text{ ng}/\text{m}^3$) u unutrašnjem prostoru, dok je u spoljašnjoj sredini bila značajno niža i iznosila je $6,1 \pm 5,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (u opsegu $1\text{--}45 \mu\text{g}/\text{m}^3$), što ukazuje da unutrašnji izvori poput materijala i hemikalija koje se koriste u učionici doprinose značajnoj emisiji HCHO. Prethodne studije su pokazale da su koncentracije HCHO u školama bile slične ili niže (Jovanović et al. 2014; Baloch et al. 2020; Hu et al. 2022). Suprotno tome, prosečna koncentracija TVOC u učionici bila je $3,3 \pm 13,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (u opsegu $1\text{--}177 \mu\text{g}/\text{m}^3$), dok je u spoljašnjoj sredini bila $36,7 \pm 53,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (u opsegu $1\text{--}398 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ukazujući na dominantan uticaj spoljašnjih izvora, kao što su emisije iz saobraćaja (Kumar et al. 2023). Kako bi se bolje stekao uvid u distribuciju $\text{PM}_{2,5}$, CO_2 , HCHO i TVOC u daljem radu su analizirane njihove koncentracije kada su učionice bile zauzete i kada su bile bez učenika i nastavnika (Slika 22).



Slika 22. Distribucija satnih, dnevnih i mesečnih koncentracija $\text{PM}_{2,5}$, CO_2 , HCHO i TVOC u unutrašnjem prostoru (a) i spoljašnjoj sredini (b).

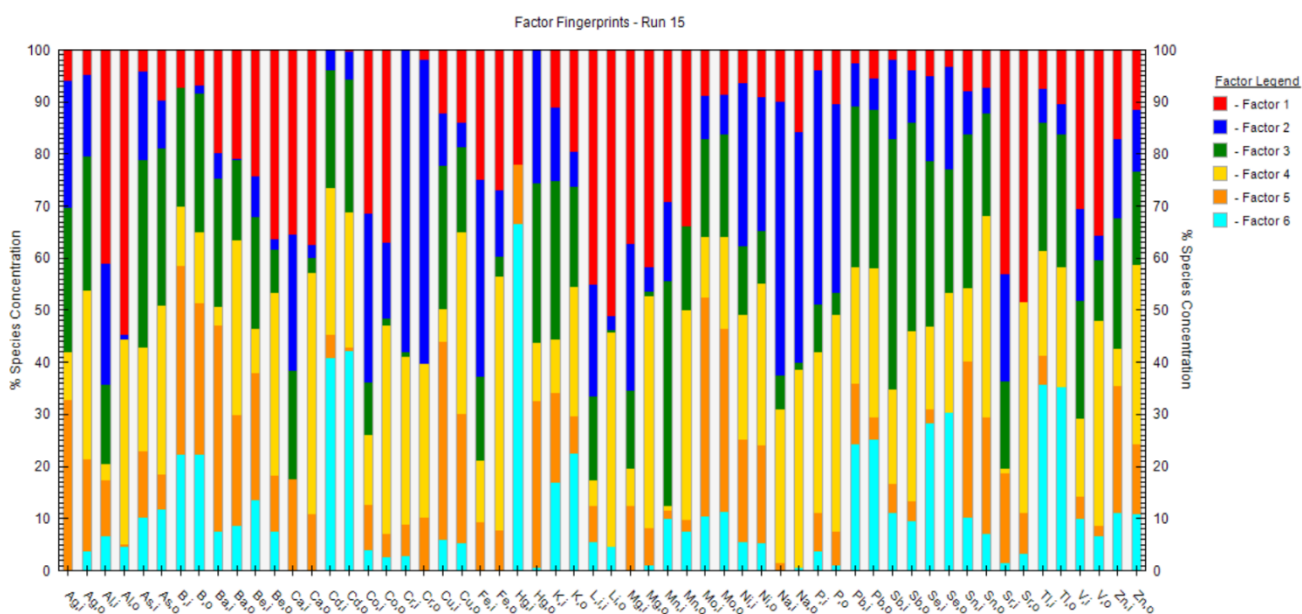
Dobijeni rezultati su pokazali da su koncentracije svih ispitivanih parametara bile na najvišem nivou u toku nastavnih dana, ukazujući na to da aktivnosti učenika i nastavnika, kao i provetravanje učionice značajno utiču na distribuciju aerozagađenja u unutrašnjem prostoru (Morawska et al. 2017).

U prilog tome ukazuju i rezultati koncentracija $PM_{2,5}$, CO_2 , HCHO i TVOC u učionici tokom dana vikenda, koji su bili značajno sniženi u poređenju sa vrednostima tokom radnih dana. Takođe, koncentracije $PM_{2,5}$, CO_2 , HCHO i TVOC u spoljašnjoj sredini imale su sličnu distribuciju tokom radnih dana i dana vikenda, što dodatno ukazuje da na kvalitet vazduha u učionici utiču aktivnosti učenika i zaposlenih u školi.

5.5. Određivanje potencijalnih izvora emisije elemenata prisutnih na $PM_{2,5}$

Određivanje potencijalnih izvora elemenata prisutnih na $PM_{2,5}$ u školi i spoljašnjoj sredini rađeno je primenom PMF modela. Za procenu izvora emisije korišćene su koncentracije svih ispitivanih elemenata.

Određeno je šest primarnih izvora elemenata i to: prašina sa puteva (27%), emisija iz vozila (19%), formiranje sekundarnog aerosola (11%), zemljana prašina (30%), sagorevanje fosilnih goriva (10%) i izvori sagorevanja biomase i uglja (3%) (Slika 23). Takođe, udeo izvora ukazuje na varijacije tokom grejne i negrejne sezone i složenu interakciju između prirodnih i antropogenih faktora (Slika 24).

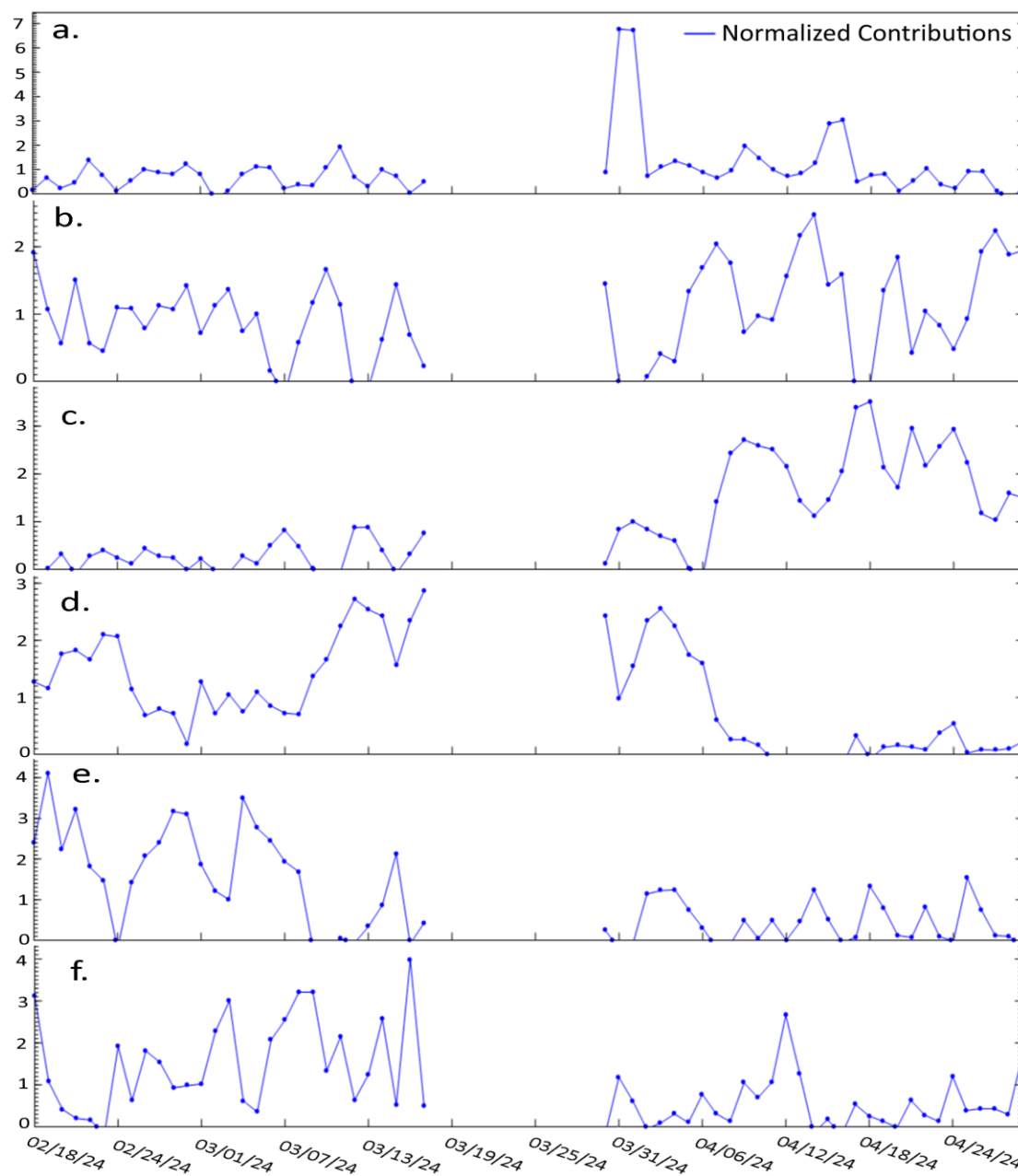


Slika 23. Faktorski profil i doprinos elemenata prisutnih na $PM_{2,5}$ prema izvorima u unutrašnjem prostoru (i) i spoljašnjoj sredini (o).

Prvi izvor (faktor 1) je činio 29,1% udela u ukupnoj masi elemenata u spoljašnjoj sredini i 24,3% ukupne mase elemenata u unutrašnjem prostoru. Karakterišu ga povišeni nivoi elemenata kao što su Ca, Fe, Mg, Al, K, Na i Ba. Prisustvo ovih elemenata na $PM_{2,5}$ ukazuje na spoljašnje izvore kao što su kombinacija zemljane prašine i emisije iz saobraćaja koja se odnosi na habanje kočnica i guma vozila i resuspendovanu prašinu sa saobraćajnica (Carrion-Matta et al. 2019; Jawa et al. 2024).

Sa druge strane, potencijalni izvor ovih elemenata u zatvorenom prostoru predstavlja degradacija materijala od kojih su napravljeni zidovi (kreč i cement) (Carrion-Matta et al. 2019;

Jawaa et al. 2024). Obrazac opterećenja za ovaj faktor je ostao dosledan tokom kampanje uzorkovanja. Iako je doprinos elemenata relativno sličan tokom celog perioda uzorkovanja PM_{2,5}, primetno je blago povećanje doprinosa elemenata tokom negrejnog perioda. Ova sezonska varijacija može biti posledica većih temperatura i niže vlažnosti vazduha zabeleženih tokom negrejnog perioda, što stvara uslove koji pogoduju resuspenziji prašine sa puteva (Aryal and Evans 2023; Shao 2024).



Slika 24. Raspodela izvora elemenata prisutnih na PM_{2,5} u grejnom i negrejnog periodu.

Faktor 2, sa stopama doprinosa od 11,0% u spoljašnjoj sredini i 30,4% u zatvorenom prostoru, određen je kao emisija iz izduvnih gasova vozila. Visoko faktorsko opterećenje elemenatima kao što su Fe, Na, P, Ca, K i Cr, ukazuje na emisiju iz vozila (Vossler et al. 2016). Iako ovi elementi potencijalno mogu da potiču iz različitih izvora, specifična lokacija škole u urbanoj sredini okružena visoko prometnim putevima ukazuje na dominantan doprinos saobraćaja. Sezonska varijacija u doprinosu elemenata ovom faktoru, verovatno je posledica povećanog saobraćaja tokom negrejne sezone. Takođe, elementi poput Ca, Fe i Cr povezani su sa emisijom iz saobraćaja, jer su obimno prisutni u auspuhu automobila usled sagorevanja goriva i habanja motora (Wang et al. 2021). Pored toga, Na i K su među najzastupljenijim elementima u tragovima kočenja i prašini na putevima (Theodoros and Giorgio 2014). Fosfati su značajna komponenta koja se emituje prilikom sagorevanja aditiva za gorivo, sintetičkih ulja i hidrauličnih tečnosti. Istraživanja su pokazala da su više koncentracije ukupnih organskih fosfata u PM u direktnoj korelaciji sa gustinom saobraćaja u urbanim sredinama, naglašavajući značajan doprinos P u emisiji iz vozila (Fabiańska et al. 2019).

Treći faktor određen je kao sekundarno zagađenje sa najvećim doprinosom elemenata poput K, Fe, Ca, Pb, Ba, Zn, Mn i Ni i u manjoj meri V. Sekundarne formacije nastaju kombinacijom različitih procesa, uključujući sagorevanje, izduvne gasove vozila, prašinu puteva i industriju (Suvarapu and Baek 2017). Visok sadržaj Fe i Mn ukazuju na sagorevanje ulja i aditiva za gorivo (Mesías Monsalve et al. 2018; Sui et al. 2020), dok su K, Pb i Zn povezani sa sagorevanjem uglja (Lee et al. 2023). Takođe, V i Ni su indikatori sagorevanja nafte (Carrion-Matta et al. 2019). Evidentna sezonska razlika sa većim doprinosom tokom grejne sezone može biti posledica povoljnih meteoroloških uslova (Balamurugan et al. 2022).

Zemljana prašina je određena kao potencijalni izvor elemenata u faktoru 4. Opterećenje elementima je bilo 43,3% u spoljašnjoj sredini i 10,0% u unutrašnjem prostoru. Ovaj izvor uključuje visoke koncentracije elemenata zemljine kore kao što su Fe, Ca, Na, Mg, K i Al (Suvarapu and Baek 2017; Živković et al. 2023). U urbanim zonama, građevinska industrija i resuspendovana prašina sa različitih terena bez trave su glavni izvori zagađenja ovim elementima (Sannoh et al. 2024). Takođe, zoološki vrt koji se nalazi preko puta škole dodatno doprinosi povećanoj koncentraciji prašine u vazduhu.

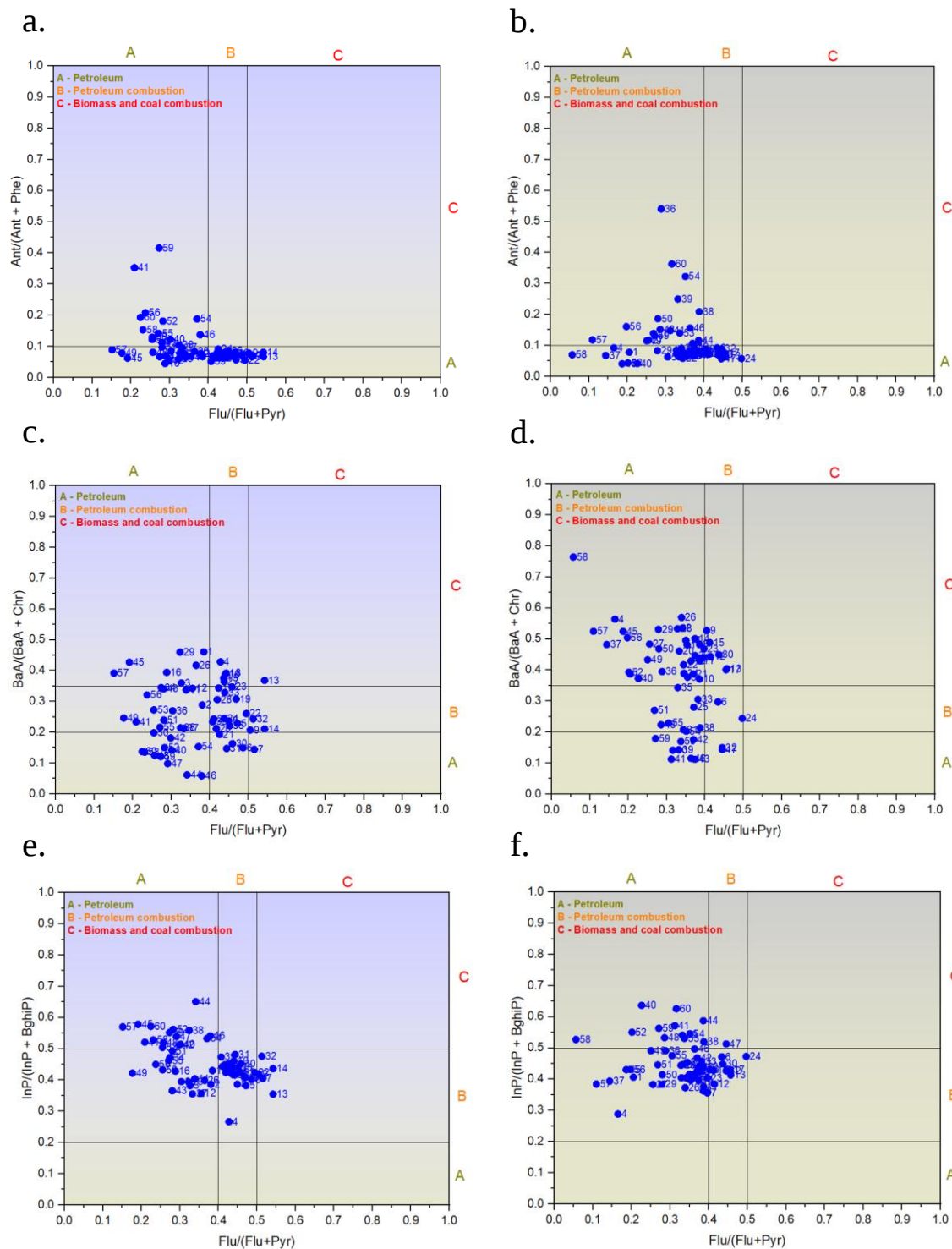
Peti faktor je sličan četvrtom, sa visokim doprinosima Ca, Fe, K, Ba, Mg i Zn. Međutim, zanemarljiv doprinos elemenata kao što su Al, Mn i Na i slaba korelacija između Ca, K i Ba ukazuju na drugi izvor, koji nije zemljana prašina. Pored emisije iz industrije, visoke koncentracije ovih elemenata na PM_{2,5} mogu da vode poreklo od sagorevanja fosilnih goriva (Chen et al. 2019). Iako su zastupljeni u manjoj meri, elementi kao što su Cu, P, Cr, Ni, Mo i Pb takođe ukazuju na procese sagorevanja kao izvore (Chen et al. 2019; Lee et al. 2023). Potencijalni izvori emisije ovih elemenata mogli bi biti toplana zajedno sa individualnim ložištima koja se nalaze relativno blizu škole (Ćirović et al. 2023). Pored toga, jasna sezonska varijacija sa većim opterećenjem u grejanom periodu, dodatno ukazuje na sagorevanje kao izvor određen ovim faktorom.

U faktoru 6 dominantan doprinos imali su K i Pb sa ukupnim opterećenjem od 3,1% u spoljašnjoj sredini i 3,3% u unutrašnjem prostoru. Pokazano je da tokom sagorevanja mešavine biomase i uglja, jedinjenja K iz biomase podstiču oslobađanje Pb [(Yang et al. 2024). Potencijalni izvor predstavljaju individualna ložišta u okolini škole, na šta dodatno ukazuje i izražena sezonska varijacija, sa većim faktorskim opterećenjem tokom grejnog perioda.

5.6. Određivanje potencijalnih izvora emisije PAH prisutnih na PM_{2,5}

U cilju određivanja potencijalnih izvora PAH prisutnih na PM_{2,5}, primenjena su dva modela: dijagnostički odnos PAH i PMF model.

Dijagnostički odnosi se široko primenjuju u cilju određivanja potencijalnih izvora emisije PAH kao što su nafta, sagorevanje nafte i sagorevanje biomase i uglja (Tobiszewski and Namieśnik 2012).



Slika 25. Dijagnostički odnosi analiziranih PAH u zatvorenom prostoru (a, c, e) i spoljašnjoj sredini (b, d, f).

U ovoj disertaciji određivani su dijagnostički odnosi za Ant/(Ant+Phe), BaA/(BaA+Chr), InP/(InP+BghiP) i Flu/(Flu+Pir). Dobijeni indeksi su pokazali relativno slične dijagnostičke odnose analiziranih PAH u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini, što ukazuje da PAH prisutni na PM_{2,5} vode poreklo iz spoljašnje sredine (**Slika 25**).

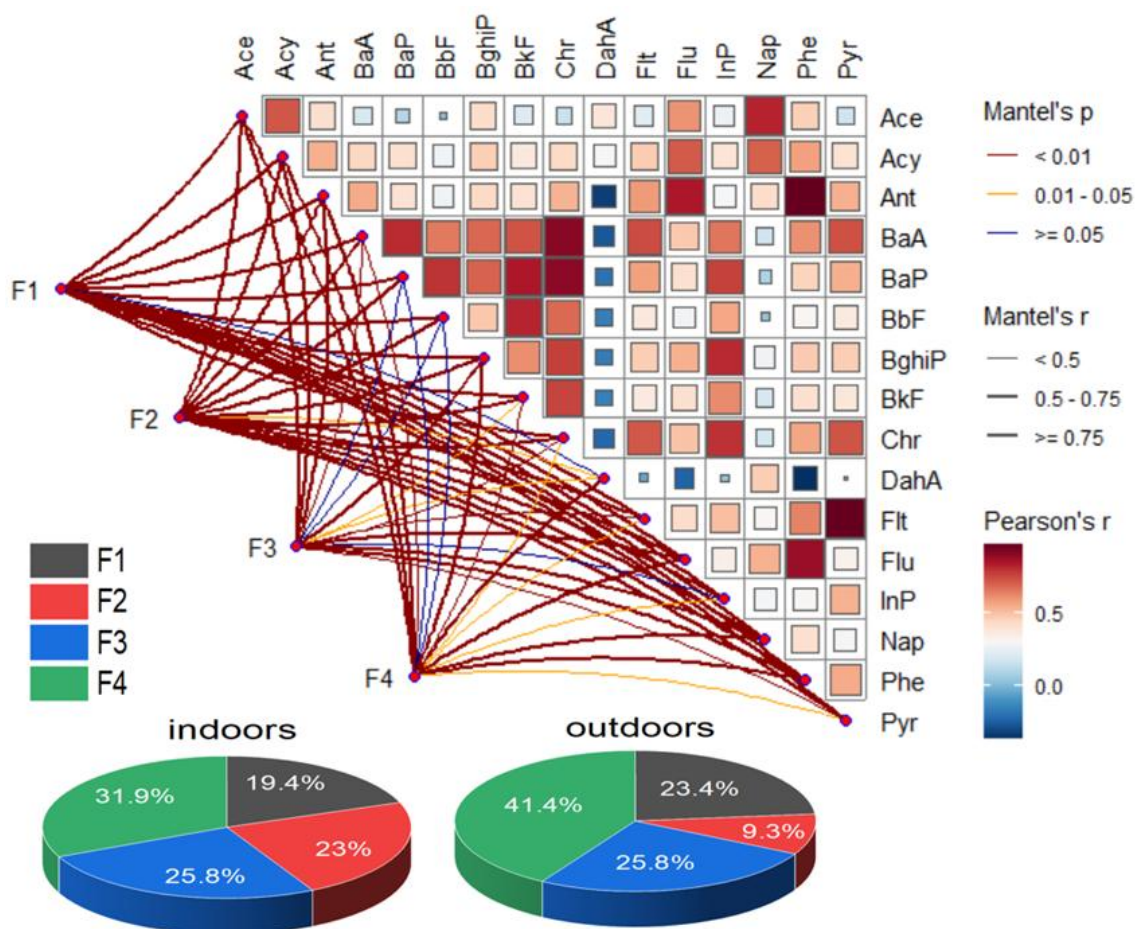
Dijagnostički odnosi za Ant/(Ant+Phe) i Flu/(Flu+Pir) sugerišu petrogeno poreklo (nafta) kao glavne izvore PAH i u manjoj meri pirogeno poreklo (sagorevanje nafte), ukazujući na emisiju iz vozila kao glavni izvor ovih PAH (Flores et al. 2022; Rodríguez-Maroto et al. 2024).

Dijagnostički odnos za BaA/(BaA+Chr) ne upućuju na određeni izvor, imajući u vidu ravnomernu raspodelu među svim potencijalnim izvorima. Ovaj rezultat može se pripisati stopi raspada ovih PAH, što je u skladu sa rezultatima i drugih autora (Kim et al. 2009; Hassanvand et al. 2015; Rodríguez-Maroto et al. 2024).

Uzimajući u obzir dijagnostičke odnose za InP/(InP+BghiP), potencijalni izvori predstavljaju sagorevanje fosilnih goriva ili sagorevanje biomase čija je upotreba poslednjih godina povećana u individualnom grejanju (Flores et al. 2022; Rodríguez-Maroto et al. 2024).

Dijagnostički odnosi ukazuju na mešavinu izvora PAH, što je u skladu sa lokacijom škole, koja je okružena prometnim saobraćajnicama, relativnoj blizini toplane zajedno sa individualnim ložištima.

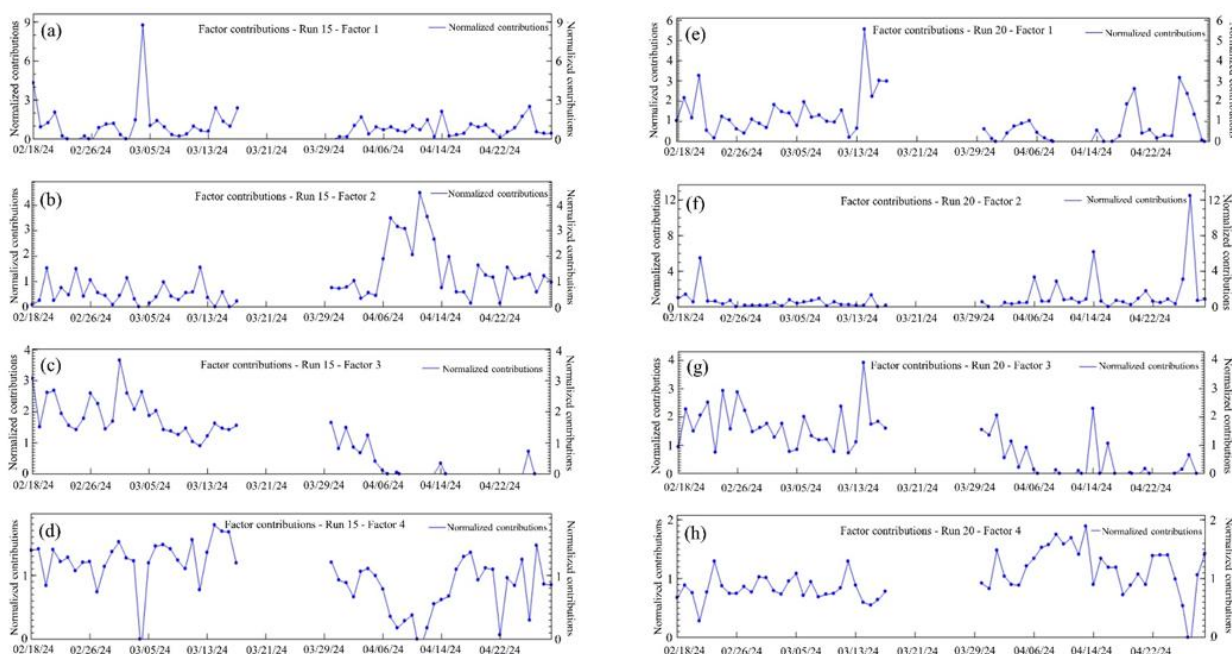
Kako bi se dodatno razjasnilo poreklo PAH prisutnih na PM_{2,5}, određivani su profili i procenat doprinosa izvora pomoću PMF model u grejnom i negrejnem periodu. Određena su četiri potencijalna izvora PAH u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini (**Slika 26 i Slika 27**).



Slika 26. Faktorski profil i doprinos 16 pojedinačnih PAH prisutnih na PM_{2,5} prema izvorima PAH za unutrašnji prostor i spoljašnju sredinu.

Ukupan doprinos PAH u faktoru 1 je iznosio 23,4% u spoljašnjoj sredini i 19,4% u unutrašnjem prostoru. Ovaj faktor karakteriše velika količina PAH kao što su BaA, BghiP, BbF, InP, BaP i BkF. Emisija PAH velike molekulske težine je tipična za vozila koja koriste benzin (Zheng et al. 2018; Amarandei et al. 2024; Xu et al. 2024). Takođe, pokazano je da povećana emisija ovih PAH je karakteristična tokom saobraćajnih gužvi, kada dolazi do nepotpunog sagorevanja goriva (Lin et al. 2019; Famiyeh et al. 2024), što je uobičajena pojava na putevima pored škole.

Faktor 2 karakteriše najveći doprinos Fla, Pir i BaA u spoljašnjoj sredini i DahA, Nap, Aci i Ace u unutrašnjem prostoru. Ukupan doprinos pojedinačnih PAH u Σ PAH bio je 9,3% u dvorištu škole i 23,0% u učionici. Razlike u ukupnom faktorskom opterećenju, kao i doprinosu pojedinačnih PAH ukazuju na učešće kombinacije spoljašnjih i unutrašnjih izvora. Spoljašnji izvori PAH odgovaraju emisiji iz vozila čiji je pogon na dizel i benzin (Zheng et al. 2018; Wang et al. 2020). Sa druge strane, veći doprinos PAH manje molekulske težine u zatvorenom prostoru može biti uzrokovano emisijom gasovitih PAH i adsorpcijom na PM_{2,5} u učionici usled aktivnosti dece, hemikalija koje se koriste za čišćenje, materijala prisutnih u učionici, kao i emisija iz elektronskih uređaja (Morawska et al. 2017; Slezakova et al. 2017; Oliveira et al. 2019; Ouyang et al. 2020; Vo et al. 2024).



Slika 27. Raspodela izvora PAH prisutnih na PM_{2,5} u zatvorenom prostoru (a, c, e, g) i spoljašnjoj sredini (b, d, f, h).

Faktor 3 je činio 25,8% doprinosa pojedinačnih PAH u ukupnoj masi Σ PAH u spoljašnjoj sredini i u unutrašnjem prostoru, sa visokim sadržajem Phe, Ant, Flu, Aci, Fla, Ace i Pir. Uzimajući u obzir izraženu sezonsku razliku i specifične vrste PAH, ovaj faktor je određen kao sagorevanje uglja i biomase, na šta ukazuju i literaturni podaci (Zhang et al. 2021; Sengupta et al. 2023; Li et al. 2024).

Iako je poslednjih godina u Srbiji izražen prelazak na manje štetne izvore energije, neka domaćinstva i dalje koriste uglj ili biomasu za grejanje. Takođe, značajan doprinos emisije PAH može se pripisati i toplani koja koristi prirodni gas i nalazi se u blizini škole (Chen et al. 2023).

Faktor 4 je sa doprinosom od 41,4% u spoljašnjoj sredini i 31,9% u unutrašnjem prostoru u ukupnoj masi Σ PAH, obuhvatao skoro sve PAH. Ovaj faktor ukazuje na sekundarne

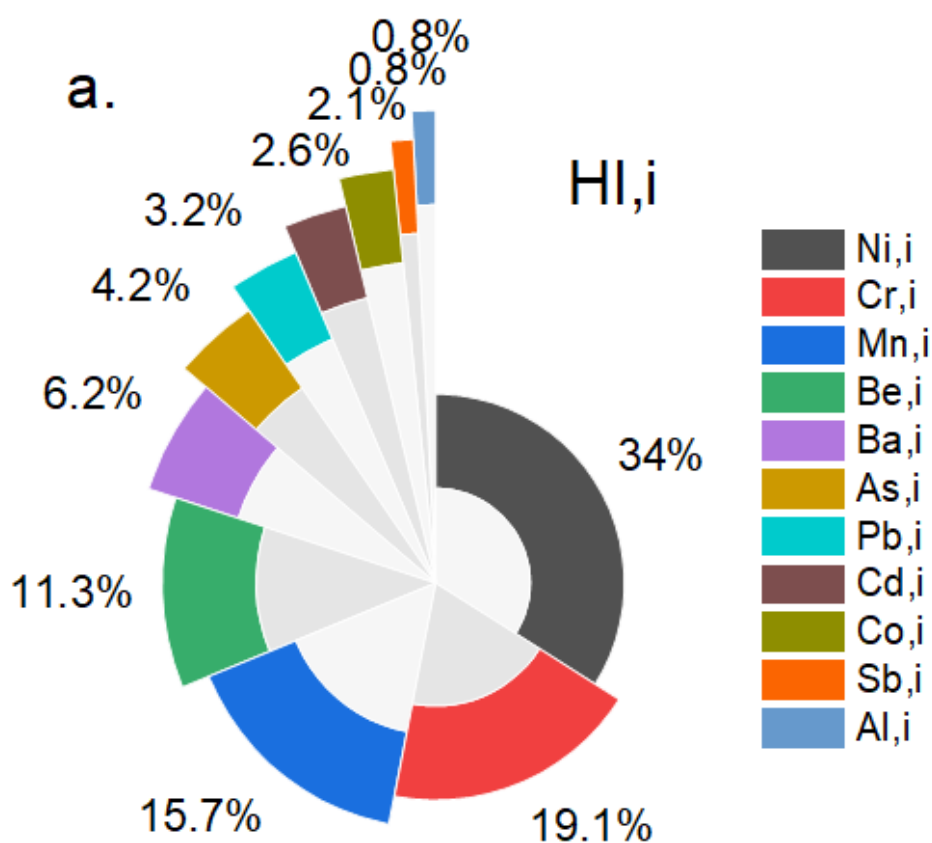
formacije PAH iz mešovitih izvora, uključujući prašinu sa puteva, isparavanje naftnih derivata sa puteva i različite grane industrije (Sun et al. 2022; Li et al. 2023; Mwangi et al. 2024; Wu et al. 2024). Takođe, blizina velikog broja restorana koji pripremaju hranu na tradicionalan način, koristeći ćumur ili drva, u okolini škole može doprineti emisiji različitih PAH karakterističnim za ovaj faktor (Si et al. 2023).

5.7. Procena zdravstvenog rizika

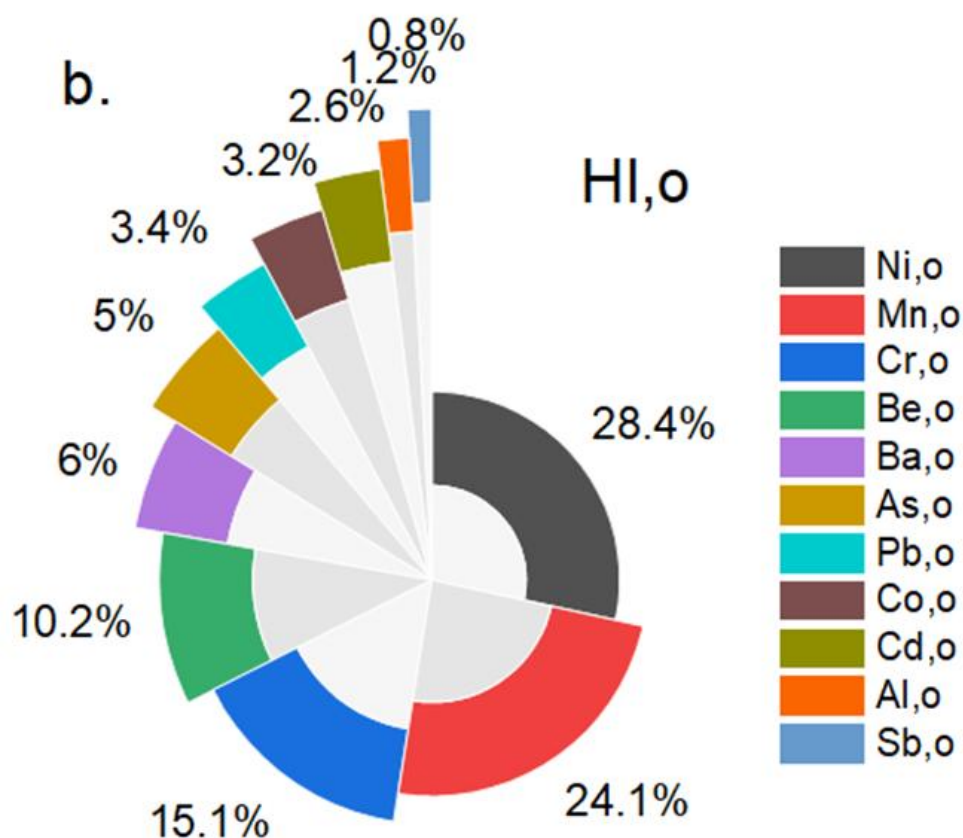
5.7.1. Analiza nekancerogenog i kancerogenog rizika usled izloženosti elementima prisutnim na PM_{2,5} specifičnog za izvor

Procena zdravstvenog rizika usled inhalacione izloženosti toksičnim elementima prisutnim na PM_{2,5} određivana je kao ukupna izloženost, kao i rizik izloženosti prema pojedinačnim izvorima.

Vrednosti HQ za pojedinačne elemente su bile u sledećem nizu, od najveće vrednosti ka nižim: Ni > Cr > Mn > Be > Ba > As u zatvorenom prostoru i Ni > Mn > Cr > Be > Ba > As u spoljašnjoj sredini (Slika 28 i Slika 29).



Slika 28. Doprinos elemenata u HI u unutrašnjem prostoru (i).



Slika 29. Doprinos elemenata u HI u spoljašnjoj sredini (o).

Dobijeni rezultati ukazuju da su vrednosti HI za elemente u ukupnom uzorku, kao i po izvorima bile ispod granične vrednosti od 1, kako u unutrašnjem prostoru tako i u spoljašnjoj sredini (**Tabela 19**). Pored toga, vrednosti HI za sve metale bile su veće na otvorenom nego u zatvorenom (0,50 prema 0,39).

Tabela 19. Indeks opasnosti (HI) za nekancerogene elemente prisutne na PM_{2,5}.

Rezultati su predstavljeni kao srednja vrednost (opseg).

HI	Unutrašnji prostor	Spoljašnji prostor
Svi faktori	0,394 (0,25-0,78)	0,501 (0,28-0,77)
Faktor 1	0,047 (0,02-0,11)	0,093 (0,03-0,20)
Faktor 2	0,107 (0,06-0,21)	0,088 (0,05-0,16)
Faktor 3	0,074 (0,04-0,15)	0,061 (0,03-0,10)
Faktor 4	0,071 (0,04-0,14)	0,170 (0,09-0,27)
Faktor 5	0,057 (0,04-0,13)	0,052 (0,04-0,08)
Faktor 6	0,033 (0,02-0,06)	0,036 (0,02-0,07)

Uočene su razlike u doprinosu HQ elementa u HI prema izvorima.

U faktoru 1 najveći doprinos imao je Mn sa 38% u unutrašnjem prostoru i 44% u spoljašnjoj sredini u HI za ovaj faktor.

Doprinos Cr i Ni je bio 79% u HI u zatvorenom prostoru i 75% u HI u spoljašnjoj sredini za faktor 2.

Doprinos Mn i Ni je bio više od 56% u HI u spoljašnjoj sredini, dok je doprinos HQ vrednosti ova dva elementa u unutrašnjem prostoru bio 58% u HI za faktor 3.

Faktor 4 karakterisao je najveći doprinos Ni (44%) i Cr (33%) od 77% u unutrašnjem prostoru, dok su u spoljašnjoj sredini Mn (28%), Ni (26%), Cr (13%) i Be (10%) imali doprinos od 78% u HI.

Zbir vrednosti HQ za Ni, Be, Ba i Cr iznosio je 89% u HI za unutrašnji prostor i u spoljašnjoj sredini za faktor 5.

Najveći doprinos za faktor 6 imali su Ni (22%), Mn (18%), Be (18%), Cd (12%) i Pb (9%) u unutrašnjem prostoru i Mn (24%), Ni (20%), Cd (15%), Pb (12%) i Be (10%) u spoljašnjoj sredini.

Kako bi se dodatno bolje procenio nekancerogeni rizik usled izloženosti teškim metalima putem inhalacije, određivane su HI vrednosti za odrasle i decu. Rezultati su pokazali da su HI vrednosti bile ispod prihvatljivog nivoa od 1 za odrasle i decu (**Tabela 20**).

Tabela 20. Indeks opasnosti (HI) za nekancerogene elemente prisutne na PM_{2,5} za odrasle i decu. Rezultati su predstavljeni kao srednja vrednost (opseg).

	HI			
	Odrasli		Deca	
	Unutrašnji prostor	Spoljašnji prostor	Unutrašnji prostor	Spoljašnji prostor
Svi faktori	0,330 (0,208-0,674)	0,437 (0,227-0,724)	0,393 (0,251-0,778)	0,502 (0,280-0,773)
Faktor 1	0,048 (0,020-0,109)	0,092 (0,030-0,200)	0,048 (0,020-0,109)	0,093 (0,033-0,201)
Faktor 2	0,070 (0,047-0,142)	0,051 (0,035-0,075)	0,107 (0,062-0,206)	0,088 (0,054-0,162)
Faktor 3	0,075 (0,038-0,143)	0,061 (0,026-0,100)	0,075 (0,038-0,144)	0,061 (0,026-0,100)
Faktor 4	0,052 (0,036-0,101)	0,151 (0,075-0,260)	0,072 (0,044-0,137)	0,170 (0,092-0,275)
Faktor 5	0,054 (0,034-0,132)	0,046 (0,030-0,067)	0,057 (0,038-0,138)	0,053 (0,036-0,079)
Faktor 6	0,032 (0,019-0,059)	0,037 (0,016-0,060)	0,034 (0,022-0,062)	0,037 (0,016-0,060)

Kancerogeni rizik usled izloženosti teškim metalima procenjivan je određivanjem CR i TCR vrednosti, u ukupnom uzorku kao i prema pojedinačnim izvorima.

Dobijeni rezultati su pokazali da je dominantnu vrednost CR imao Cr i u manjoj meri As u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini. Takođe, je pokazano da su srednje vrednosti TCR bile manje od 10^{-6} ili u opsegu 10^{-4} - 10^{-6} , što ukazuje da su kancerogeni rizici u prihvatljivim granicama (**Tabela 21**).

Tabela 21. Ukupni rizik od kancera (TCR) za kancerogene elemente prisutne na PM_{2,5}. Rezultati su predstavljeni kao srednja vrednost (opseg).

TCR ($\times 10^{-6}$)	Unutrašnji prostor	Spoljašnji prostor
Svi faktori	15,7 (6,1–41)	15,9 (6,5-38)
Faktor 1	0,038 (0,016-0,083)	0,039 (0,019-0,083)
Faktor 2	8,97 (3,5–24)	9,07 (3,5-22)
Faktor 3	0,258 (0,11–0,54)	0,109 (0,029-0,50)
Faktor 4	4,99 (1,9–13)	4,77 (1,9-11)
Faktor 5	0,964 (0,38–2,5)	1,60 (0,64-3,9)
Faktor 6	0,482 (0,19–1,2)	0,62 (0,17-2,0)

Iako su TCR vrednosti za svaki izvor elemenata bile u prihvatljivim granicama, uočene su varijacije u doprinosu CR vrednosti pojedinačnih elemenata u TCR.

Pokazano je da je doprinos CR vrednosti za Cr u TCR bio 99% za faktore 2, 4 i 5 u zatvorenom prostoru i u spoljašnjoj sredini. Međutim, raspodela CR vrednosti za faktor 1 ukazuje na najveći doprinos Co (64%), As (20%) i Ni (13%) od ukupno 99% u TCR u unutrašnjem prostoru, dok u spoljašnjoj sredini Cr (77%), Co (14%) i As (7%) sa doprinosom od 98% u TCR su bili dominantni. Doprinos Cr (63%) i As (25%) od ukupno 88% u TCR u unutrašnjem prostoru i As od 75% u TCR u spoljašnjoj sredini karakterišu faktor 3. Što se tiče faktora 6, najveći doprinos imao je Cr (91% u TCR u unutrašnjem prostoru, do su As (52%) i Cd (27%) najviše doprineli TCR u spoljašnjoj sredini.

Uporedna analiza zdravstvenog rizika usled izloženosti elementima prikazanim u različitim studijama nije izvodljiva, imajući u vidu velike razlike u eksperimentalnim pristupima, analiziranim elementima i korišćenim modelima procene rizika. Pored toga, izloženost dece elementima putem udisanja može imati različite efekte u zavisnosti od njihovog razvojnog stadijuma. Takođe, za procenu zdravstvenog rizika usled izloženosti metalima koristi se podaci iz studija na odraslima ili životinjama, što ne može u potpunosti da odgovara proceni rizika kod dece.

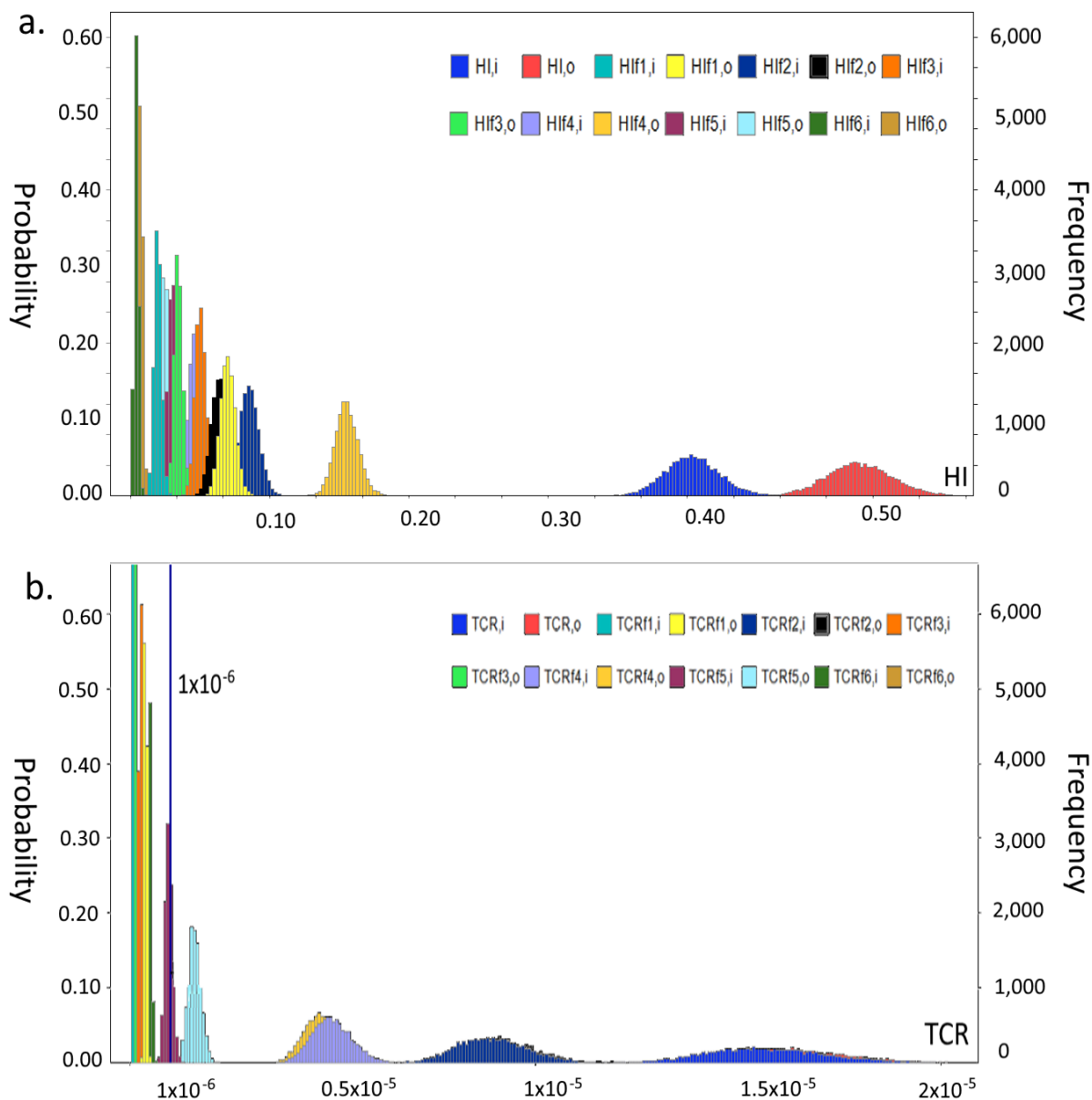
Ipak, dobijene vrednosti nekancerogenog i kancerogenog rizika usled izloženosti elementima prisutnim na PM_{2,5} pokazane u ovoj doktorskoj disertaciji ukazuju da je rizik od izlaganja dece bio prihvatljiv.

5.7.2. Analiza verovatnoće zdravstvenog rizika usled izloženosti elementima specifična za izvor primenom Monte Karlo simulacije

Kako bi se preciznije odredila verovatnoća nekancerogenog i kancerogenog rizika učenika usled izloženosti elementima primenjena je MCS metoda. Određivanje kumulativne distribucije na 5. i 95. procentu pokazano je da je vrednost Hi prihvatljiva, sa verovatnoćom od 0,04 i 0,06 (Slika 30).

Vrednost HI je bila značajno ispod 1, sa srednjom vrednošću od 0,39 (u opsegu 0,44-0,58) u unutrašnjem prostoru i 0,50 (u opsegu 0,33 - 0,48) u spoljašnjoj sredini.

Što se tiče kancerogenog rizika, srednja vrednost TCR je bila od $1,57 \times 10^{-5}$ (u opsegu $1,07 \times 10^{-5}$ - $2,21 \times 10^{-5}$) za unutrašnji prostor i spoljašnju sredinu. Takođe, vrednost TCR na 95. procentu je bila niža od 1×10^{-4} , što ukazuje na prihvatljiv rizik od raka kod učenika usled izloženosti elementima prisutnim na $PM_{2,5}$.



Slika 30. Distribucija verovatnoće za nekancerogeni i kancerogeni rizik specifična za izvore elemenata.

Dalja analiza distribucije verovatnoće zdravstvenog rizika određena je za šest izvora emisije elemenata identifikovanih PMF modelom. Dobijeni rezultati pokazuju da su doprinosi različitih izvora emisije nekancerogenom riziku u zatvorenom prostoru počevši od najvećeg, bili rangirani na sledeći način: faktor 2 > faktor 3 > faktor 4 > faktor 5 > faktor 1 > faktor 6.

Ovi rezultati ukazuju da faktor 2 ili saobraćaj kao izvor elemenata prisutnih na $PM_{2,5}$ najviše doprinosi nekancerogenom riziku po zdravlje učenika. Takođe je pokazano da su srednje vrednosti HI i vrednosti HI na 95. procentu bile unutar graničnih vrednosti za svih šest određenih izvora.

Slični rezultati su dobijeni za kancerogeni rizik kod učenika. Pokazano je da najštetniji uticaj na zdravlje učenika ima faktor 2, a zatim slede faktor 4 > faktor 5 > faktor 6 > faktor 3 > faktor 1. Srednja vrednost TCR za faktor 2 bila je $9,0 \times 10^{-6}$, dok je vrednost TCR na 95. procentu bila $1,1 \times 10^{-5}$ u zatvorenom prostoru, ukazujući na prihvatljiv kancerogeni rizik za učenike. Pored toga, srednje vrednosti TCR i vrednosti TCR na 95. procentu svih faktora u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini bile su u opsegu 10^{-6} - 10^{-4} ili niže, što ukazuje da je izloženost učenika elementima sa kancerogenim svojstvima prihvatljiva.

Takođe, podaci iz literature ukazuju da primena MCS modela u proceni rizika po zdravlje u gradovima sa ubrzanom urbanizacijom prepoznaje emisiju teških metala iz saobraćaja i industrije kao glavne izvore povezane sa zdravstvenim rizicima kod dece u spoljašnjoj sredini (Wang et al. 2022; Han et al. 2023; Mallongi et al. 2023). Takođe, rezultati ove doktorske disertacije su identifikovali saobraćaj kao najznačajniji izvor emisije elemenata koji štetno utiče na zdravlje učenika, iako gornja granična vrednost nije prekoračena.

5.7.3. Analiza kancerogenog rizika usled izloženosti PAH prisutnim na PM_{2,5} specifičnog za izvor

Zagađenje vazduha je jedan od najvećih problema sa kojima se suočava čovečanstvo, pri čemu se PAH ističu po svom izrazito štetnom dejstvu po zdravlje.

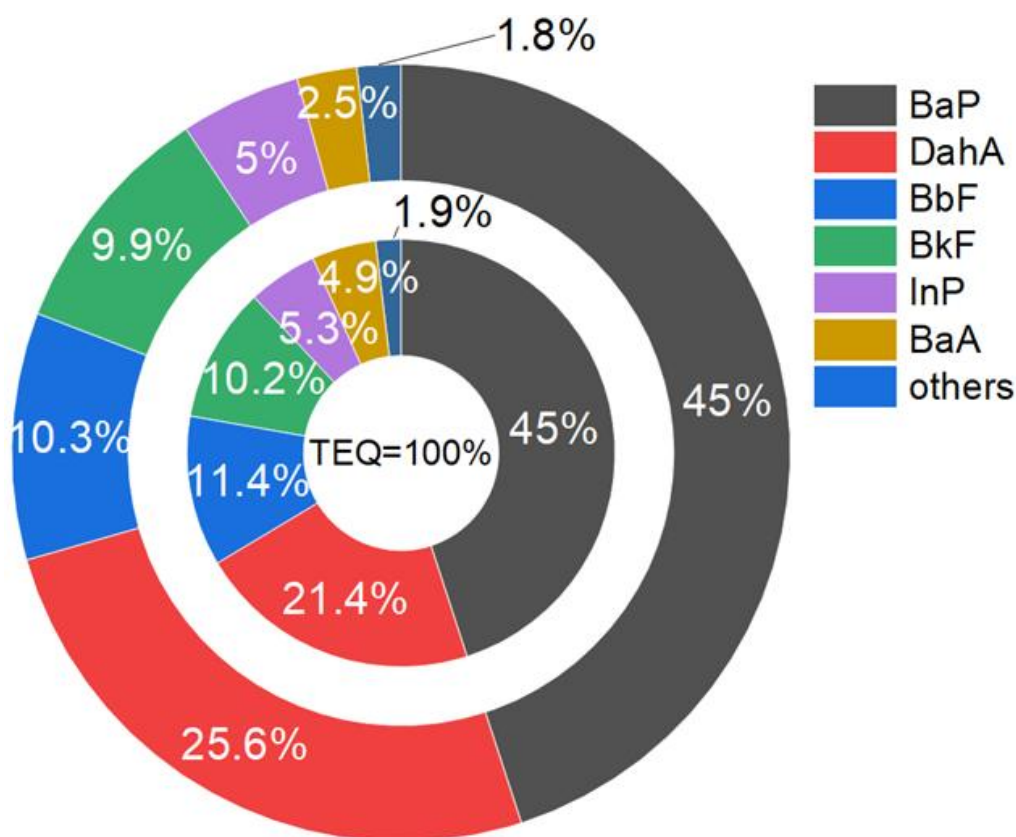
Određivanje kancerogenog rizika PAH je procenjivana pomoću TEQ vrednosti u odnosu na BaP. Srednja vrednost ukupnog kancerogenog rizika (Σ TEQ) za sve analizirane PAH je bila $0,99 \text{ ng/m}^3$ (u opsegu $0,71$ - $1,6 \text{ ng/m}^3$) u unutrašnjem prostoru i $1,1 \text{ ng/m}^3$ (u opsegu od $0,66$ - $2,6 \text{ ng/m}^3$) u spoljašnjoj sredini.

Dobijeni rezultati ukazuju da je vrednost Σ TEQ PAH u unutrašnjem prostoru bila niža od godišnje granične vrednosti od 1 ng/m^3 koju preporučuje Evropska unija. Rezultati drugih autora pokazali su značajne razlike u vrednosti Σ TEQ PAH u školama, koje su bile u opsegu $0,04$ do $49,4 \text{ ng/m}^3$ (Oliveira et al. 2019; Hisamuddin et al. 2022). Međutim, uzimajući u obzir brojne specifičnosti studija, pre svega različit broj analiziranih PAH, dužinu uzorkovanja, sezona i geografske karakteristike lokacije rezultati različitih studija su teško uporedivi. Takođe, u literaturi nedostaju podaci koji se odnose na procenu zdravstvenog rizika usled izloženosti PAH prisutnih na PM_{2,5} u školama u Srbiji.

U svim studijama koje su izučavale rizik usled izloženosti PAH pokazano je da su vrednosti Σ TEQ PAH u unutrašnjem prostoru niže od onih u dvorištu škola.

Iako su TEQ vrednosti za Ace, BbF, BkF i u manjoj meri za Nap bile najzastupljenije u Σ TEQ PAH u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini, njihov doprinos ukupnom kancerogenom riziku nije presudan. Tačnije, doprinosi Ace i Nap u Σ TEQ PAH su bili zanemarljivi, dok su doprinosi BbF i BkF u Σ TEQ PAH bili umereni. Rezultati ukazuju na ključnu ulogu BaP i DahA u ukupnom kancerogenom riziku, kako u unutrašnjem prostoru tako i u spoljašnjoj sredini.

Doprinos pojedinačnih PAH u Σ TEQ PAH u unutrašnjem i spoljašnjem prostoru prikazani su na **Slici 31**.



Slika 31. Doprinos pojedinačnih PAH Σ TEQ u spoljašnjoj sredini (unutrašnji krug) i u unutrašnjem prostoru (spoljašnji krug).

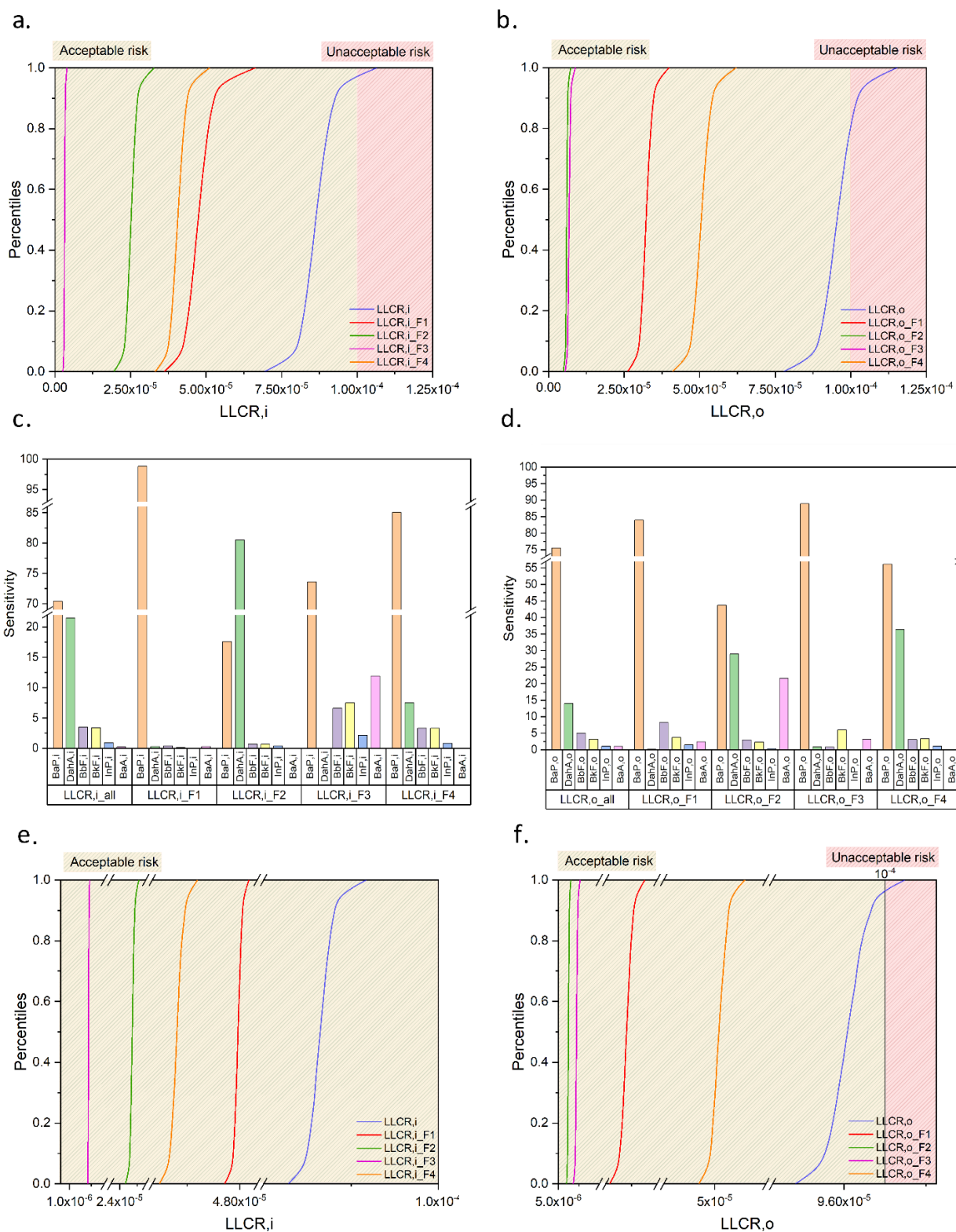
Rezultati drugih studija takođe su pokazali da BaP i DahA dominantno doprinose kancerogenom riziku u školama, uprkos razlikama u eksperimentalnom pristupu i specifičnostima lokacije škola (Oliveira et al. 2016; Oliveira et al. 2017; Wang et al. 2017; Ha et al. 2020; Wang et al. 2021; Hisamuddin et al. 2022).

Rizik od karcinoma putem inhalacije usled izloženosti PAH prisutnih na $PM_{2.5}$ određivan je pomoću determinističkog pristupa. Srednja vrednost LLCR je bila $8,65 \times 10^{-5}$ (u opsegu $6,16 \times 10^{-5}$ - $1,41 \times 10^{-4}$) u unutrašnjem prostoru i $9,57 \times 10^{-5}$ (u opsegu $5,77 \times 10^{-5}$ - $2,27 \times 10^{-4}$) u spoljašnjoj sredini. Dalja analiza rizika je pokazala da je 76,7% dnevnih vrednosti LLCR u unutrašnjem prostoru (68,3% u spoljašnjoj sredini) bilo u prihvatljivim granicama od $1,0 \times 10^{-6}$ do $1,0 \times 10^{-4}$, dok je 23,3% dnevnih vrednosti LLCR u unutrašnjem prostoru (31,7% u spoljašnjoj sredini) prevazilazilo graničnu vrednost od $1,0 \times 10^{-4}$.

Uprkos brojnim studijama koje su izučavale koncentracije PAH prisutnih na $PM_{2.5}$ u školama, svega nekoliko je određivalo rizik od izloženosti učenika PAH putem inhalacija. Rezultati ovih studija su pokazali da je ukupan rizik od raka bio u okviru prihvatljivih vrednosti, kao i da je rizik od izloženosti bio manji u školama u Evropi u poređenju sa školama u Aziji (Oliveira et al. 2017; Oliveira et al. 2019; Ouyang et al. 2020; Zhang et al. 2020; Hisamuddin et al. 2022).

5.7.4. Analiza verovatnoće zdravstvenog rizika usled izloženosti PAH specifična za izvore primenom Monte Karlo simulacije

U cilju preciznijeg tumačenja rezultata vezanih za rizik od kancera usled izloženosti PAH putem inhalacije primenjena je MCS metoda procene verovatnoća. Rezultati 1D MCS su prikazani na **Slici 32 (a-b)** i u **Tabelama 22 i 23**.



Slika 32. Distribucija verovatnoće kancerogenog rizika specifičnog za izvor dobijena pomoću 1D MCS u unutrašnjem prostoru (a) i spoljašnjoj sredini (b), analiza osetljivosti rizika u unutrašnjem prostoru (c) i spoljašnjoj sredini (d), i distribucije verovatnoće kancerogenog rizika specifičnog za izvor dobijene pomoću 2D MCS u unutrašnjem prostoru (e) i spoljašnjoj sredini (f).

Tabela 22. Distribucija verovatnoće kancerogenog rizika specifičnog za izvore u spoljašnjoj sredini dobijena pomoću 1D MCS.

Statistika	LLCR,o	LLCR,o_F1	LLCR,o_F2	LLCR,o_F3	LLCR,o_F4
Srednja vrednost	9.57×10^{-5}	3.23×10^{-5}	5.99×10^{-6}	6.80×10^{-6}	5.06×10^{-5}
Medijana	9.54×10^{-5}	3.23×10^{-5}	5.98×10^{-6}	6.78×10^{-6}	5.05×10^{-5}
Standardna devijacija	5.02×10^{-6}	1.81×10^{-6}	2.88×10^{-7}	4.08×10^{-7}	2.76×10^{-6}
Varijansa	2.52×10^{-11}	3.29×10^{-12}	8.32×10^{-14}	1.67×10^{-13}	7.61×10^{-12}
Skewness	0.2169	0.2148	0.1487	0.2284	0.1572
Kurtosis	3.07	3.04	3.06	3.07	3.05
Koeficijent varijacije	0.0525	0.0561	0.0482	0.0601	0.0545
Minimum	7.79×10^{-5}	2.62×10^{-5}	4.85×10^{-6}	5.48×10^{-6}	4.10×10^{-5}
Maksimum	1.15×10^{-4}	3.99×10^{-5}	7.29×10^{-6}	8.84×10^{-6}	6.21×10^{-5}
Opseg	3.74×10^{-5}	1.37×10^{-5}	2.44×10^{-6}	3.36×10^{-6}	2.11×10^{-5}
5%	8.77×10^{-5}	2.95×10^{-5}	5.53×10^{-6}	6.16×10^{-6}	4.62×10^{-5}
95%	1.04×10^{-4}	3.55×10^{-5}	6.47×10^{-6}	7.50×10^{-6}	5.53×10^{-5}

Tabela 23. Distribucija verovatnoće kancerogenog rizika specifičnog za izvore u unutrašnjoj sredini dobijena pomoću 1D MCS.

Statistika	LLCR,i	LLCR,i_F1	LLCR,i_F2	LLCR,i_F3	LLCR,i_F4
Srednja vrednost	8.65×10^{-5}	4.76×10^{-5}	2.53×10^{-5}	3.22×10^{-6}	4.07×10^{-5}
Medijana	8.63×10^{-5}	4.74×10^{-5}	2.52×10^{-5}	3.22×10^{-6}	4.06×10^{-5}
Standardna devijacija	4.67×10^{-6}	3.89×10^{-6}	1.63×10^{-6}	1.71×10^{-7}	2.37×10^{-6}
Varijansa	2.18×10^{-11}	1.52×10^{-11}	2.67×10^{-12}	2.94×10^{-14}	5.62×10^{-12}
Skewness	0.1945	0.2870	0.2235	0.2162	0.2385
Kurtosis	3.08	3.13	3.15	3.17	3.10
Koeficijent varijacije	0.0540	0.0818	0.0647	0.0532	0.0582
Minimum	6.94×10^{-5}	3.61×10^{-5}	1.95×10^{-5}	2.64×10^{-6}	3.31×10^{-5}
Maksimum	1.07×10^{-4}	6.64×10^{-5}	3.29×10^{-5}	4.01×10^{-6}	5.12×10^{-5}
Opseg	3.72×10^{-5}	3.02×10^{-5}	1.33×10^{-5}	1.36×10^{-6}	1.80×10^{-5}
5%	7.91×10^{-5}	4.15×10^{-5}	2.27×10^{-5}	2.95×10^{-6}	3.70×10^{-5}
95%	9.46×10^{-5}	5.43×10^{-5}	2.80×10^{-5}	3.51×10^{-6}	4.48×10^{-5}

Srednja vrednost LLCR je bila $8,65 \times 10^{-5}$ (u opsegu $6,94 \times 10^{-5}$ - $1,07 \times 10^{-4}$) u unutrašnjem prostoru, dok je spoljašnjoj sredini srednja vrednost LLCR bila $9,57 \times 10^{-5}$ (u opsegu $7,79 \times 10^{-5}$ - $1,15 \times 10^{-4}$). Verovatnoća da vrednost LLCR bude veća od granične vrednosti od $1,0 \times 10^{-4}$ je bila 2,9% u unutrašnjem prostoru, dok je u spoljašnjoj sredini verovatnoća prekoračenja granične vrednosti bila značajno veća i iznosila je 19,6%.

Rezultati dobijeni primenom probabilističkog modela MSC su pokazali da su nivoi rizika bili niži od onih dobijenih korišćenjem determinističkog pristupa, što ukazuje da deterministički pristup u proceni zdravstvenog rizika verovatno precenjuje nivo rizika.

Analiza rizika specifična za izvore je pokazala da je faktor 1, najviše doprineo kancerogenom riziku u unutrašnjem prostoru, a zatim faktor 4, faktor 2 i faktor 3. Međutim, u spoljašnjoj sredini faktor 4 je imao najveći doprinos ukupnom riziku od raka, a zatim faktor 1 i u manjoj meri faktor 3 i faktor 2.

Ovi rezultati ukazuju da su faktor 1 koji se odnosi na emisije PAH iz vozila i faktor 4 koji se odnosi na emisije PAH iz prašine iz saobraćaja i isparavanja naftnih derivata, najviše doprineli ukupnom kancerogenom riziku, ističući značajan uticaj saobraćaja na emisiju PAH i štetne efekte na zdravlje. S obzirom na lokaciju škole, koja je okružena saobraćajnicama, visok doprinos emisija PAH iz saobraćaja je verovatno posledica velike frekvencije saobraćaja što je povezano sa visokom emisijom PAH u vazduh u okolini škole.

Analiza osetljivosti (**Slika 32c i 32d**) je pokazala da su koncentracija BaP u većoj meri i DahA u manjoj meri imale najveći uticaj (više od 90% ukupne varijanse) na ukupni LLCR, u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini. U pogledu rizika specifičnog za izvore pokazan je sličan trend, pri čemu je koncentracija BaP imala najveći doprinos na ukupni LLCR.

U cilju dobijanja sveobuhvatnih i preciznih rezultata zagađenja vazduha u ovoj doktorskoj disertaciji primenjen je 2D MCS pristup procene rizika specifičnog za izvore odabirom najuticajnijih parametara, čime se objašnjava više od 90% ukupne varijanse u analizi osetljivosti za spoljašnju petlju, kao i za preostale parametre za unutrašnju petlju (**Slika 32e i 32e; Tabela 24 i 25**).

Tabela 24. Distribucija verovatnoće kancerogenog rizika specifičnog za izvore u spoljašnjoj sredini dobijena pomoću 2D MCS.

Statistika	LLCR,o	LLCR,o_F1	LLCR,o_F2	LLCR,o_F3	LLCR,o_F4
Srednja vrednost	9.63×10^{-5}	3.20×10^{-5}	5.98×10^{-6}	6.77×10^{-6}	5.04×10^{-5}
Medijana	9.63×10^{-5}	3.20×10^{-5}	5.98×10^{-6}	6.77×10^{-6}	5.04×10^{-5}
Standardna devijacija	1.71×10^{-6}	5.32×10^{-7}	7.03×10^{-8}	9.78×10^{-8}	7.09×10^{-7}
Varijansa	2.93×10^{-12}	2.83×10^{-13}	4.94×10^{-15}	9.56×10^{-15}	5.03×10^{-13}
Skewness	0.09	0.15	0.18	0.18	0.12
Kurtosis	2.92	3.06	2.90	3.20	2.82
Koeficijent varijacije	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Minimum	9.13×10^{-5}	3.04×10^{-5}	5.79×10^{-6}	6.46×10^{-6}	4.84×10^{-5}
Maksimum	1.02×10^{-4}	3.38×10^{-5}	6.21×10^{-6}	7.12×10^{-6}	5.29×10^{-5}
Opseg	1.07×10^{-5}	3.44×10^{-6}	4.24×10^{-7}	6.59×10^{-7}	4.51×10^{-6}
5%	9.35×10^{-5}	3.12×10^{-5}	5.87×10^{-6}	6.62×10^{-6}	4.93×10^{-5}
95%	9.91×10^{-5}	3.29×10^{-5}	6.09×10^{-6}	6.94×10^{-6}	5.16×10^{-5}

Tabela 25. Distribucija verovatnoće kancerogenog rizika specifičnog za izvore u unutrašnjoj sredini dobijena pomoću 2D MCS.

Statistika	LLCR,i	LLCR,i_F1	LLCR,i_F2	LLCR,i_F3	LLCR,i_F4
Srednja vrednost	8.65×10^{-5}	4.78×10^{-5}	2.55×10^{-5}	3.20×10^{-6}	4.08×10^{-5}
Medijana	8.65×10^{-5}	4.78×10^{-5}	2.55×10^{-5}	3.20×10^{-6}	4.08×10^{-5}
Standardna devijacija	1.26×10^{-6}	4.14×10^{-7}	2.24×10^{-7}	4.48×10^{-8}	6.81×10^{-7}
Varijansa	1.59×10^{-12}	1.72×10^{-13}	5.03×10^{-14}	2.01×10^{-15}	4.64×10^{-13}
Skewness	0.16	-0.10	0.06	0.14	0.21
Kurtosis	3.27	3.08	3.15	2.73	3.23
Koeficijent varijacije	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Minimum	8.28×10^{-5}	4.63×10^{-5}	2.47×10^{-5}	3.09×10^{-6}	3.88×10^{-5}
Maksimum	9.17×10^{-5}	4.91×10^{-5}	2.62×10^{-5}	3.33×10^{-6}	4.32×10^{-5}
Opseg	8.92×10^{-6}	2.79×10^{-6}	1.52×10^{-6}	2.36×10^{-7}	4.38×10^{-6}
5%	8.45×10^{-5}	4.71×10^{-5}	2.51×10^{-5}	3.13×10^{-6}	3.98×10^{-5}
95%	8.86×10^{-5}	4.85×10^{-5}	2.58×10^{-5}	3.27×10^{-6}	4.20×10^{-5}

Rezultati pokazuju da je srednja vrednost LLCR bila $8,65 \times 10^{-5}$ (u opsegu $8,28 \times 10^{-5}$ - $9,17 \times 10^{-5}$) u unutrašnjem prostoru, dok je u spoljašnjoj sredini srednja vrednost LLCR bila $9,63 \times 10^{-5}$ (u opsegu $9,13 \times 10^{-5}$ - $1,02 \times 10^{-4}$).

Rezultati dobijeni primenom 2D MCS ukazuju da se verovatnoća prekoračenja granične vrednosti dodatno smanjila, pri čemu je ukupni LLCR u unutrašnjem prostoru bio u potpunosti ispod granice od $1,0 \times 10^{-4}$, u poređenju sa procenom rizika pomoću 1D MCS. Takođe, verovatnoća prekoračenja granične vrednosti LLCR u spoljašnjoj sredini bila je 3,6%, što je značajno niže u poređenju sa verovatnoćom (19,6%) dobijenom primenom 1D MCS. Međutim, imajući u vidu da je na 95. procentu vrednost LLCR bila $9,91 \times 10^{-5}$ (u spoljašnjoj sredini), što je ispod granične vrednosti od $1,0 \times 10^{-4}$, kancerogeni rizik se može smatrati prihvatljivim (Han et al. 2023).

Upotrebom dodatne dimenzije u MCS, poboljšana je preciznost i tačnost procene verovatnoće na šta ukazuju varijansa, koeficijent varijacije, standardna devijacija i opseg rizik (Tabele 22-25). Rezultati pokazuju da se opseg LLCR smanjio i to sa $3,72 \times 10^{-5}$ na $8,92 \times 10^{-6}$ u unutrašnjem prostoru i sa $3,74 \times 10^{-5}$ na $1,07 \times 10^{-5}$ u spoljašnjoj sredini, ukazujući da primena 2D MCS, sa svojim užim opsegom vrednosti rizika, pruža precizniji prikaz zdravstvenog rizika u poređenju sa 1D MCS (Sun et al. 2023; Wang et al. 2024). Vrednosti rizika dobijeni primenom 2D MCS karakterišu niže vrednosti varijanse za jedan do dva reda veličine i nekoliko puta niži koeficijenti varijacije, što ukazuje na smanjenu varijabilnost. Takođe, 2D MCS model je pokazao poboljšanu preciznost, sa standardnom devijacijom smanjenom približno 3 puta u spoljašnjoj sredini i 3,6 puta u unutrašnjem prostoru. Dobijeni rezultati ukazuju na superiornost 2D MCS u poređenju sa 1D MCS, jer pokazuju bolju preciznost i tačnost uz smanjenu varijabilnost rezultata.

Iako dobijeni rezultati ukazuju da izloženost učenika PAH u učionici putem inhalacije ima potencijalne zdravstvene rizike, vrednosti LLCR su bile ispod granične vrednosti u zatvorenom prostoru i u spoljašnjoj sredini.

Analiza doprinosa PAH ukupnom LLCR prema izvorima pomoću 2D MCS, pokazala je da izvori PAH indentifikovani pomoću PMF analize imaju isti trend u doprinosu ukupnom LLCR,

kao što je određeno primenom 1D MCS. Ovi rezultati dodatno ukazuju da saobraćaj ima najveći doprinos kancerogenom riziku povezanim sa PAH, naglašavajući potrebu za ciljanim strategijama za ublažavanja emisije PAH u školama koje se nalaze u blizini sa frekventnim saobraćajnicama u cilju smanjenja rizika po zdravlje učenika.

Promovisanje upotrebe čistih i alternativnih goriva i povećanje zelenih tampon zona, poput drveća i živih ograda (Prigioniero et al. 2023; Sekar and Praveenkumar 2024) oko škola moglo bi da pomogne u ublažavanju disperzije i distribucije PAH i PM_{2,5} u mikro okruženju škole, čime bi se obezbedilo zdravije okruženje za učenike.

6. ZAKLJUČAK

Brza urbanizacija je usko povezana sa zagađenjem vazduha i povećanim koncentracijama $PM_{2,5}$ u vazduhu, što doprinosi kontaminaciji vazduha u unutrašnjem prostoru. U ovoj doktorskoj disertaciji prikazani su rezultati praćenja i analize zagađenja vazduha u školi, kao i procena rizika po zdravlje učenika usled izloženosti toksičnim elementima i PAH prisutnim na $PM_{2,5}$. Izvršena je procena nivoa aerozagađenja u školi i dvorištu škole na osnovu količine zagađujućih supstanci u vazduhu, pre svega $PM_{2,5}$ i elemenata i PAH koji ulaze u njihov sastav, kao i njihova uporedna analiza u odnosu na preporučene vrednosti za unutrašnji prostor i vrednosti za kvalitet vazduha u školama objavane u studijama širom sveta.

U prvom delu urađena je komparativna analiza aerozagađenja u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini, koja je uključivala određivanje koncentracije i međusobne povezanosti $PM_{2,5}$ i elemenata i PAH koji ulaze u sastav $PM_{2,5}$. Radi sveobuhvatnijeg uvida u nivo zagađenja vazduha u školi analizirani su nivoi drugih značajnih zagađujućih supstanci kao što su CO_2 , $HCHO$ i $TVOC$, kao i uticaj meteoroloških parametara na distribuciju $PM_{2,5}$.

Na osnovu dobijenih rezultata mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Koncentracije $PM_{2,5}$ bile su niže u unutrašnjem prostoru u poređenju sa koncentracijama u spoljašnjoj sredini tokom čitavog perioda istraživanja, kao i tokom grejnog i negrejnog perioda. Međutim, prosečna koncentracija $PM_{2,5}$ u učionici ($24,5 \pm 16,9 \mu g/m^3$) bila je veća od dnevne vrednosti od $15 \mu g/m^3$, preporučene od strane SZO.
- Srednje vrednosti I/O odnosa za $PM_{2,5}$ bile su <1 , za ceo period, u grejnom periodu i tokom negrejnog perioda, pri čemu je zabeležen nešto veći I/O odnos u toku radnih dana u poređenju sa danima vikenda kada su učionice bile bez prisustva učenika. Visok koeficijent korelacije zabeležen je između $PM_{2,5}$ u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini, što sve zajedno ukazuje na dominantan uticaj spoljašnjih izvora na distribuciju $PM_{2,5}$ u unutrašnji prostor.
- Analiza elemenata prisutnih na $PM_{2,5}$ je pokazala da vazduh u zatvorenom prostoru imao približno 1,5 puta manju količinu elemenata vezanih za $PM_{2,5}$ u poređenju sa vrednostima iz spoljašnje sredine. Takođe, pokazano je da pored Ca i Fe, koji su bili najzastupljeniji elementi, od teških metala najviše koncentracije su izmerene za Zn, a zatim su sledili Cr, Pb, Cu, Mn i Ni u unutrašnjem prostoru i u spoljašnjoj sredini. Jedino su koncentracije Cr i Ni bile veće od graničnih vrednosti koje preporučuje SZO, što je takođe pokazano i u drugim školama u svetu. Koncentracije najzastupljenijih elemenata bile su slične u grejnom i negrejnom periodu. Pokazana je jaka korelacija između mnogih elemenata u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini. Međutim, slaba korelacija između nekih elemenata kao što su Ca, Fe, Na i K, ukazuje na različite izvore emisije.
- Odnos I/O za većinu elemenata bio je <1 , pri čemu je zabeležen nešto veći I/O odnos u toku radnih dana u poređenju sa danima vikenda kada su učionice bile bez prisustva učenika i nastavnika, što ukazuje na dominantan uticaj spoljašnjih izvora zagađenja. Veći I/O odnosi od 1 su zabeleženi za Ag, B i Hg, što ukazuje na veći doprinos unutrašnjih izvora, s tim što je koncentracija Hg bila značajno niža od granične vrednosti.

- Koncentracija ΣPAH je bila veća u spoljašnjoj sredini nego u unutrašnjem prostoru, što je u skladu sa distribucijom PM_{2,5} tokom celokupne kampanje sakupljanja uzoraka, uključujući grejni i negrejni period, što ukazuje na dominantan uticaj spoljašnjih izvora. Pokazano je da je sastav PAH prisutnih na PM_{2,5} sličan u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini. Najzastupljeniji PAH u sastavu PM_{2,5} su bili oni sa tri ili pet prstenova, među kojima su Ace, BbF i BkF imali najveće koncentracije. Prosečna koncentracija BaP (0,44 ng/m³) u učionici je bila niža od godišnje granične vrednosti (1 ng/m³) preporučene od strane EU, ali je bila viša od vrednosti (0,12 ng/m³) koju preporučuje SZO.
- Vrednosti I/O odnosa PAH uglavnom su bile niže ili blizu jedan, što ukazuje na veći udeo izvora PAH iz spoljašnje sredine. Pored Acy, Ant, Flu i Nap čije su I/O odnosi bili oko 1, značajno veća vrednost I/O odnosa zabeležena je za DahA i Phe, što može biti posledica povećane emisije iz saobraćaja i akumulacije u PM_{2,5} u učionici.
- Meteorološki uslovi značajno su uticali na koncentraciju PM_{2,5} u spoljašnjoj sredini. Uprkos maloj količini padavina, pokazano je da je koncentracija PM_{2,5} bila snižena u danima nakon padavina. Zabeležena je jaka negativna povezanost između koncentracija PM_{2,5} i temperature, uz manja odstupanja. Najveći uticaj na koncentraciju PM_{2,5} imala je vlažnost vazduha, značajno veći od temperature, kako u grejnom periodu, tako i u negrejnem periodu. Takođe, jugoistočni vetar, Košava, je imao umeren uticaj na disperziju PM_{2,5} tokom period uzorkovanja.
- Prosečne koncentracije CO₂ i HCHO bile su veće u učionici nego u dvorištu škole. Suprotno tome, prosečna koncentracija TVOC bila je značajno manja u učionici u poređenju sa prosečnom koncentracijom izmerenom u spoljašnjoj sredini. Srednje vrednosti koncentracija CO₂, HCHO i TVOC u unutrašnjem prostoru su bile veće tokom radnih dana u poređenju sa koncentracijama tokom dana vikenda, uprkos varijacijama koncentracija u spoljašnjoj sredini. Takođe, tokom radnih dana, prosečne koncentracije CO₂, HCHO i TVOC su bile veće kada je učionica bila zauzeta učenicima. Ovi rezultati ukazuju da prisustvo učenika u učionici utiče na distribuciju zagađenja vazduha u unutrašnjem prostoru.

U cilju određivanja potencijalnih izvora elemenata i PAH prisutnih na PM_{2,5} primenjen je PMF model, zajedno sa drugim statističkim metodama. Razlaganjem polazne matrice koncentracija elemenata i PAH na faktorski doprinos i faktorski profil, omogućeno je određivanje raspodele izvora toksičnih elemenata i PAH.

Na osnovu dobijenih rezultata izvedeni su sledeći zaključci:

- PMF analiza je pokazala složenu interakciju između prirodnih i antropogenih izvora. Identifikovano je šest primarnih izvora, koji su određeni kao prašina sa puteva, emisija iz vozila, formiranje sekundarnog aerosola, zemljana prašina, sagorevanje fosilnih goriva i sagorevanja biomase i uglja. Saobraćaj i prašina imali su najveći doprinos u ukupnoj emisiji elemenata, pri čemu su uočene varijacije tokom grejnog i negrejnog perioda.
- Primena dijagnostičkih odnosa u cilju analize potencijalnih izvora PAH je pokazala relativno slične odnose u unutrašnjem prostoru i spoljašnjoj sredini, dodatno ukazujući na veći doprinos spoljašnjih izvora PAH. Dijagnostički odnosi ukazuju na kombinaciju izvora PAH, pre svega emisiju iz vozila i sagorevanje fosilnih goriva i biomase što je u skladu sa lokacijom škole, koja je okružena prometnim saobraćajnicama i u relativnoj blizini toplane uključujući i individualna ložištima. Pomoću PMF modela određena su četiri potencijalna

izvora PAH. Faktor 1 je odgovarao emisiji PAH iz vozila na benzin, faktor 2 je odgovarao emisiji PAH iz vozila čiji je pogon na dizel i benzin kao i određenih unutrašnjih izvora, faktora 3 je prepoznat kao sagorevanje uglja i biomase, dok je faktor 4 ukazivao na sekundarne formacije PAH iz mešovityh izvora.

Upotrebom determinističkog i probabilističkog pristupa procene zdravstvenog rizika određivan je uticaj toksičnih elemenata i PAH prisutnih na PM_{2,5} na zdravlje učenika. Kombinacijom ovih metoda dobijeni su pouzdaniji rezultati procene zdravstvenog rizika, što je uključivalo i određivanje potencijalno štetnog uticaja toksičnih elemenata i PAH koji potiču od svakog izvora zagađenja pojedinačno na zdravlje.

Iz dobijenih rezultata izvedeni su sledeći zaključci:

- Procena zdravstvenog rizika usled izloženosti elementima prisutnim na PM_{2,5} putem inhalacije, pokazala je da su HQ vrednosti za Ni, Cr i Mn bile najveće u unutrašnjem prostoru i u spoljašnjoj sredini. Vrednosti HI za elemente u ukupnom uzorku, kao i po izvorima bile su ispod granične vrednosti od 1, ukazujući na prihvatljiv nivo rizika za decu i odrasle. Procena kancerogenog rizika pokazala je da su Cr i u manjoj meri As imali najviše CR vrednosti, mada su uočene razlike u doprinosu HQ elementa u HI prema izvorima. Srednje vrednosti TCR bile su manje od 10^{-6} ili u opsegu 10^{-4} - 10^{-6} , što ukazuje da je kancerogeni rizik bio u prihvatljivim granicama.
- Rezultati MCS analize su pokazali da je distribucija HI vrednosti na 5. i 95. procentu bila značajno <1 u unutrašnjem prostoru i u spoljašnjoj sredini. Što se tiče zdravstvenih rizika povezanih sa različitim izvorima, pokazano je da su elementi koji potiču iz saobraćaja najviše doprineli nekancerogenom riziku. Takođe, vrednosti TCR na 5. i 95. procentu su bile niže od 1×10^{-4} , što ukazuje na prihvatljiv rizik od kancera kod učenika usled izloženosti elementima prisutnim na PM_{2,5}. Faktor 2 ili emisija elemenata iz vozila imala je najveći doprinos kancerogenom riziku po zdravlje učenika.
- Procena rizika usled izloženosti učenika PAH putem inhalacije ukazala je na prihvatljiv nivo Σ TEQ u unutrašnjem prostoru. Iako su TEQ vrednosti za Ace, BbF, BkF i u manjoj meri za Nap bile najviše, BaP i DahA imali su najveći kancerogeni doprinos od svih PAH. Srednja vrednost LLCR je bili unutar prihvatljivog nivoa rizika od kancera u učionici, ali su pojedine dnevne vrednosti LLCR prevazilazile granične vrednosti. Takođe, pokazano je da su faktor 1 koji se odnosi na emisije PAH iz vozila i faktor 4 koji se odnosi na emisije PAH iz saobraćajne prašine i isparavanja naftnih derivata, najviše doprineli ukupnom kancerogenom riziku, ističući značajan uticaj saobraćaja na emisiju PAH i štetne efekte na zdravlje.
- Primena 1D MCS analize je pokazala da je verovatnoća da vrednost LLCR bude veća od granične vrednosti od $1,0 \times 10^{-4}$ bila 2,9% u unutrašnjem prostoru i 19,6% u spoljašnjoj sredini, dok je vrednost LLCR na 95. procentu u unutrašnjem prostoru bila u prihvatljivim granicama. Dalja analiza pomoću 2D MCS je pokazala da je LLCR vrednost u unutrašnjem prostoru bila u potpunosti ispod granice od $1,0 \times 10^{-4}$, dok je verovatnoća prekoračenja granične vrednosti LLCR u spoljašnjoj sredini bila snižena na 3,6%, iako je LLCR vrednost na 95. procentu bila u prihvatljivim granicama.

Rezultati prikazani u ovoj doktorskoj disertaciji ukazuju da su na distribuciju PM_{2,5} i elemenata i PAH prisutnih na PM_{2,5} u učionici dominantan uticaj imali izvori iz spoljašnje sredine. Uprkos potencijalnim zdravstvenim rizicima, rezultati ukazuju da je izloženost

elementima i PAH prisutnim na $PM_{2,5}$ bili u prihvatljivim granicama. Iako su identifikovani različiti izvori emisije elementa i PAH pokazano je da saobraćaj najviše doprinosi zdravstvenom riziku kod učenika u školi, što je karakteristično za urbane centre kao što je Beograd. Ovi rezultati ukazuju na potrebu za ciljanim strategijama za ublažavanja zagađenja vazduha u školama koje se nalaze u blizini frekventnih saobraćajnica. Promovisanje upotrebe čistih i alternativnih goriva, bolja regulacija saobraćaja u cilju smanjenja saobraćajnih gužvi i povećanje zelenih tampon zona, poput drveća i živih ograda predstavljaju brze i lako primenljive načine za poboljšanje kvaliteta vazduha u školama.

7. LITERATURA

- Al-Awadi, L. (2018). "Assessment of indoor levels of volatile organic compounds and carbon dioxide in schools in Kuwait." *J Air Waste Manag Assoc* 68(1): 54-72.
- Alameddine, I., K. Gebrael, F. Hanna and M. El-Fadel (2022). "Quantifying indoor PM_{2.5} levels and its sources in schools: What role does location, chalk use, and socioeconomic equity play ?" *Atmospheric Pollution Research* 13(4): 101375.
- Alias, A., M. T. Latif, M. Othman, A. Azhari, N. B. Abd Wahid, K. Aiyub, et al. (2021). "Compositions, source apportionment and health risks assessment of fine particulate matter in naturally-ventilated schools." *Atmospheric Pollution Research* 12(10): 101190.
- Almeida, S. M., N. Canha, A. Silva, M. d. C. Freitas, P. Pegas, C. Alves, et al. (2011). "Children exposure to atmospheric particles in indoor of Lisbon primary schools." *Atmospheric Environment* 45(40): 7594-99.
- Alves, C., M. Evtyugina, E. Vicente, A. Vicente, I. C. Rienda, A. S. de la Campa, et al. (2023). "PM_{2.5} chemical composition and health risks by inhalation near a chemical complex." *Journal of Environmental Sciences* 124: 860-74.
- Amarandei, C., A. G. Negru, C. Iancu, R. I. Olariu and C. Arsene (2024). "Seasonality, sources apportionment, human health risks assessments, and potential implications on the atmospheric chemistry of polycyclic aromatic hydrocarbons in size-segregated aerosols from a Romanian metropolitan area." *Chemosphere* 368: 143738.
- Amato, F., A. Alastuey, A. Karanasiou, F. Lucarelli, S. Nava, G. Calzolari, et al. (2016). "AIRUSE-LIFE+: a harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities." *Atmos. Chem. Phys.* 16(5): 3289-309.
- Amato, F., I. Rivas, M. Viana, T. Moreno, L. Bouso, C. Reche, et al. (2014). "Sources of indoor and outdoor PM_{2.5} concentrations in primary schools." *Science of The Total Environment* 490: 757-65.
- Angulo Milhem, S., M. Verrielle, M. Nicolas and F. Thevenet (2021). "Indoor use of essential oil-based cleaning products: Emission rate and indoor air quality impact assessment based on a realistic application methodology." *Atmospheric Environment* 246: 118060.
- Aryal, Y. and S. Evans (2023). "Dust emission response to precipitation and temperature anomalies under different climatic conditions." *Science of The Total Environment* 874: 162335.
- Azuma, K., N. Kagi, U. Yanagi and H. Osawa (2018). "Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance." *Environ Int* 121(Pt 1): 51-56.
- Bakó-Biró, Z., D. J. Clements-Croome, N. Kochhar, H. B. Awbi and M. J. Williams (2012). "Ventilation rates in schools and pupils' performance." *Building and Environment* 48: 215-23.
- Balamurugan, V., J. Chen, Z. Qu, X. Bi and F. N. Keutsch (2022). "Secondary PM_{2.5} decreases significantly less than NO₂ emission reductions during COVID lockdown in Germany." *Atmos. Chem. Phys.* 22(11): 7105-29.
- Baloch, R. M., C. N. Maesano, J. Christoffersen, S. Banerjee, M. Gabriel, É. Csobod, et al. (2020). "Indoor air pollution, physical and comfort parameters related to schoolchildren's health: Data from the European SINPHONIE study." *Science of The Total Environment* 739: 139870.
- Basith, S., B. Manavalan, T. H. Shin, C. B. Park, W.-S. Lee, J. Kim, et al. (2022) "The Impact of Fine Particulate Matter 2.5 on the Cardiovascular System: A Review of the Invisible Killer." *Nanomaterials* 12 DOI: 10.3390/nano12152656.

- Bennett, J., P. Davy, B. Trompetter, Y. Wang, N. Pierse, M. Boulic, et al. (2019). "Sources of indoor air pollution at a New Zealand urban primary school; a case study." *Atmospheric Pollution Research* 10(2): 435-44.
- Bi, D., Y. Qiu, H. Cheng, Q. Zhou, X. Liu, J. Chen, et al. (2018). "Seasonal characteristics of indoor and outdoor fine particles and their metallic compositions in Nanjing, China." *Building and Environment* 137: 118-26.
- Błaszczak, E., W. Rogula-Kozłowska, K. Klejnowski, I. Fulara and D. Mielżyńska-Švach (2017). "Polycyclic aromatic hydrocarbons bound to outdoor and indoor airborne particles (PM_{2.5}) and their mutagenicity and carcinogenicity in Silesian kindergartens, Poland." *Air Quality, Atmosphere & Health* 10(3): 389-400.
- Bodor, K., Z. Bodor, A. Szép and R. Szép (2021). "Human health impact assessment and temporal distribution of trace elements in Copșa Mică- Romania." *Scientific Reports* 11(1): 7049.
- Branco, P. T. B. S., S. I. V. Sousa, M. R. Dudzińska, D. G. Ruzgar, M. Mutlu, G. Panaras, et al. (2024). "A review of relevant parameters for assessing indoor air quality in educational facilities." *Environmental Research* 261: 119713.
- Bu, X., Z. Xie, J. Liu, L. Wei, X. Wang, M. Chen, et al. (2021). "Global PM_{2.5}-attributable health burden from 1990 to 2017: Estimates from the Global Burden of disease study 2017." *Environmental Research* 197: 111123.
- Buczyńska, A. J., A. Krata, R. Van Grieken, A. Brown, G. Polezer, K. De Wael, et al. (2014). "Composition of PM_{2.5} and PM₁ on high and low pollution event days and its relation to indoor air quality in a home for the elderly." *Sci Total Environ* 490: 134-43.
- Carrion-Matta, A., C. M. Kang, J. M. Gaffin, M. Hauptman, W. Phipatanakul, P. Koutrakis, et al. (2019). "Classroom indoor PM(2.5) sources and exposures in inner-city schools." *Environ Int* 131: 104968.
- Chaturvedi, S., A. Kumar, V. Singh, B. Chakraborty, R. Kumar and L. Min (2023). "Recent Advancement in Organic Aerosol Understanding: a Review of Their Sources, Formation, and Health Impacts." *Water, Air, & Soil Pollution* 234(12): 750.
- Chen, X., Q. Liu, C. Yuan, T. Sheng, X. Zhang, D. Han, et al. (2019). "Emission characteristics of fine particulate matter from ultra-low emission power plants." *Environmental Pollution* 255: 113157.
- Chen, Y., C. Ge, Z. Liu, H. Xu, X. Zhang and T. Shen (2023). "Characteristics, sources and health risk assessment of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} from Hefei, China." *Environmental Geochemistry and Health* 45(11): 7651-63.
- Chen, Y., X. Li, T. Zhu, Y. Han and D. Lv (2017). "PM(2.5)-bound PAHs in three indoor and one outdoor air in Beijing: Concentration, source and health risk assessment." *Sci Total Environ* 586: 255-64.
- Chithra, V. S. and S. M. Shiva Nagendra (2013). "Chemical and morphological characteristics of indoor and outdoor particulate matter in an urban environment." *Atmospheric Environment* 77: 579-87.
- Ćirović, Ž., M. Ćujić, M. Radenković, J. Obradović and A. Onjia (2023). "AERMOD air dispersion modeling and health risks of gas and oil fueled heating plant emissions." *Thermal Science* 27(3): 2321-31.
- Coley, D. A., R. Greeves and B. K. Saxby (2007). "The Effect of Low Ventilation Rates on the Cognitive Function of a Primary School Class." *International Journal of Ventilation* 6(2): 107-12.
- Cong, Z., S. Kang, Y. Zhang and X. Li (2010). "Atmospheric wet deposition of trace elements to central Tibetan Plateau." *Applied Geochemistry* 25(9): 1415-21.

- Cui, Z., Y. Wang, L. Du and Y. Yu (2022). "Contamination level, sources, and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in suburban vegetable field soils of Changchun, Northeast China." *Scientific Reports* 12(1): 11301.
- Ćujić, M., Ž. Ćirović, M. Đolić, L. Janković-Mandić, M. Radenković and A. Onjia (2023). "Assessment of the burden of disease due to PM_{2.5} air pollution for the Belgrade district." *Thermal Science* 27(3): 2265-73.
- Daraei, H., T. Mahmudiono, Z. Hosseini, A. Bahreini, M. Abtahi, M. E. Khoshmardan, et al. (2023). "The level of PM_{2.5} and potentially toxic elements (PTEs) in PM_{2.5} in the indoor air of urban schools: systematic review-meta-analysis." *Arabian Journal of Geosciences* 16(5): 329.
- Dat, N.-D. and M. B. Chang (2017). "Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies." *Science of The Total Environment* 609: 682-93.
- Deng, S., B. Zou and J. Lau (2021). "The Adverse Associations of Classrooms' Indoor Air Quality and Thermal Comfort Conditions on Students' Illness Related Absenteeism between Heating and Non-Heating Seasons—A Pilot Study." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(4): 1500.
- Di Gilio, A., G. Farella, A. Marzocca, R. Giua, G. Assennato, M. Tutino, et al. (2017). "Indoor/Outdoor Air Quality Assessment at School near the Steel Plant in Taranto (Italy)." *Advances in Meteorology* 2017(1): 1526209.
- Dimitroulopoulou, S., M. R. Dudzińska, L. Gunnarsen, L. Hägerhed, H. Maula, R. Singh, et al. (2023). "Indoor air quality guidelines from across the world: An appraisal considering energy saving, health, productivity, and comfort." *Environ Int* 178: 108127.
- Dominici, F., A. Zanobetti, J. Schwartz, D. Braun, B. Sabath and X. Wu (2022). "Assessing Adverse Health Effects of Long-Term Exposure to Low Levels of Ambient Air Pollution: Implementation of Causal Inference Methods." *Res Rep Health Eff Inst* 2022(211): 1-56.
- Dorizas, P. V., M. N. Assimakopoulos and M. Santamouris (2015). "A holistic approach for the assessment of the indoor environmental quality, student productivity, and energy consumption in primary schools." *Environ Monit Assess* 187(5): 259.
- Eiguren-Fernandez, A., E. L. Avol, S. Thurairatnam, M. Hakami, J. R. Froines and A. H. Miguel (2007). "Seasonal Influence on Vapor-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Concentrations in School Communities Located in Southern California." *Aerosol Science and Technology* 41(4): 438-46.
- Ewing, S. A., J. N. Christensen, S. T. Brown, R. A. Vancuren, S. S. Cliff and D. J. Depaolo (2010). "Pb Isotopes as an Indicator of the Asian Contribution to Particulate Air Pollution in Urban California." *Environmental Science & Technology* 44(23): 8911-16.
- Fabiańska, M. J., B. Kozielska, J. Koniecznyński and P. Bielaczyc (2019). "Occurrence of organic phosphates in particulate matter of the vehicle exhausts and outdoor environment – A case study." *Environmental Pollution* 244: 351-60.
- Famiyeh, L., H. Xu, K. Chen, Y.-T. Tang, D. Ji, H. Xiao, et al. (2024). "Breathing in danger: Unveiling the link between human exposure to outdoor PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk in an urban residential area of China." *Science of The Total Environment* 907: 167762.
- Flores, R. M., H. Özdemir, A. Ünal and M. Tayanç (2022). "Distribution and sources of SVOCs in fine and coarse aerosols in the megacity of Istanbul." *Atmospheric Research* 271: 106100.
- Gaihre, S., S. Semple, J. Miller, S. Fielding and S. Turner (2014). "Classroom carbon dioxide concentration, school attendance, and educational attainment." *J Sch Health* 84(9): 569-74.

- Garcia, A., E. Santa-Helena, A. De Falco, J. de Paula Ribeiro, A. Gioda and C. R. Gioda (2023). "Toxicological Effects of Fine Particulate Matter (PM_{2.5}): Health Risks and Associated Systemic Injuries—Systematic Review." *Water, Air, & Soil Pollution* 234(6): 346.
- Gatto, M. P., C. Gariazzo, A. Gordiani, N. L'Episcopo and M. Gherardi (2014). "Children and elders exposure assessment to particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the city of Rome, Italy." *Environmental Science and Pollution Research* 21(23): 13152-59.
- Goyal, R. and M. Khare (2009). "Indoor–outdoor concentrations of RSPM in classroom of a naturally ventilated school building near an urban traffic roadway." *Atmospheric Environment* 43(38): 6026-38.
- Guerreiro, C. B. B., V. Foltescu and F. de Leeuw (2014). "Air quality status and trends in Europe." *Atmospheric Environment* 98: 376-84.
- Gunawardena, J., P. Egodawatta, G. A. Ayoko and A. Goonetilleke (2013). "Atmospheric deposition as a source of heavy metals in urban stormwater." *Atmospheric Environment* 68: 235-42.
- Guo, C., T. Yu, Y. Bo, C. Lin, L. Y. Chang, M. C. S. Wong, et al. (2022). "Long-term Exposure to Fine Particulate Matter and Mortality A Longitudinal Cohort Study of 400,459 Adults." *Epidemiology* 33(3): 309-17.
- Ha, V. T. L., N. T. T. Hien, N. T. Dung, N. L. Anh, T. H. Vinh and M. Yoneda (2020). "PM_{2.5}-bound PAHs in the indoor and outdoor air of nursery schools in Ha Noi, Viet Nam and health implication." *Vietnam Journal of Science and Technology* 58(3): 319-27.
- Han, Q., M. Wang, X. Xu, M. Li, Y. Liu, C. Zhang, et al. (2023). "Health risk assessment of heavy metals in road dust from the fourth-tier industrial city in central China based on Monte Carlo simulation and bioaccessibility." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 252: 114627.
- Han, W., Y. Pan, E. Welsch, X. Liu, J. Li, S. Xu, et al. (2023). "Prioritization of control factors for heavy metals in groundwater based on a source-oriented health risk assessment model." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 267: 115642.
- Hänninen, O., C. Mandin, W. Liu, N. Liu, Z. Zhao and Y. Zhang (2021). Disease Burden of Indoor Air Pollution. *Handbook of Indoor Air Quality*. Y. Zhang, P. K. Hopke and C. Mandin. Singapore, Springer Nature Singapore: 1-44.
- Hassanvand, M. S., K. Naddafi, S. Faridi, R. Nabizadeh, M. H. Sowlat, F. Momeniha, et al. (2015). "Characterization of PAHs and metals in indoor/outdoor PM₁₀/PM_{2.5}/PM₁ in a retirement home and a school dormitory." *Science of The Total Environment* 527-528: 100-10.
- Haverinen-Shaughnessy, U., D. J. Moschandreas and R. J. Shaughnessy (2011). "Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement." *Indoor Air* 21(2): 121-31.
- Haverinen-Shaughnessy, U. and R. J. Shaughnessy (2015). "Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Students' Test Scores." *PLoS One* 10(8): e0136165.
- Hayes, R. B., C. Lim, Y. Zhang, K. Cromar, Y. Shao, H. R. Reynolds, et al. (2020). "PM_{2.5} air pollution and cause-specific cardiovascular disease mortality." *Int J Epidemiol* 49(1): 25-35.
- Heo, S., D. Y. Kim, Y. Kwoun, T. J. Lee and Y. M. Jo (2021). "Characterization and source identification of fine dust in Seoul elementary school classrooms." *Journal of Hazardous Materials* 414: 125531.
- Hisamuddin, N. H., J. Jalaludin, S. Abu Bakar and M. T. Latif (2022). "The Influence of Environmental Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Exposure on DNA Damage among School Children in Urban Traffic Area, Malaysia." *Int J Environ Res Public Health* 19(4).

- Holme, J. A., B. C. Brinchmann, M. Refsnes, M. Låg and J. Øvrevik (2019). "Potential role of polycyclic aromatic hydrocarbons as mediators of cardiovascular effects from combustion particles." *Environ Health* 18(1): 74.
- Hu, D., Y. Tobon, A. Agostini, B. Grosselin, Y. Chen, C. Robin, et al. (2022). "Diurnal variation and potential sources of indoor formaldehyde at elementary school, high school and university in the Centre Val de Loire region of France." *Sci Total Environ* 811: 152271.
- Huang, Y., C. Lei, C. H. Liu, P. Perez, H. Forehead, S. Kong, et al. (2021). "A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons." *Environ Pollut* 280: 116971.
- Hviid, C. A., C. Pedersen and K. H. Dabelsteen (2020). "A field study of the individual and combined effect of ventilation rate and lighting conditions on pupils' performance." *Building and Environment* 171: 106608.
- IARC (2010). "Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures." *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum* 92: 1-853.
- Ito, K., G. D. Thurston and R. A. Silverman (2007). "Characterization of PM_{2.5}, gaseous pollutants, and meteorological interactions in the context of time-series health effects models." *J Expo Sci Environ Epidemiol* 17 Suppl 2: S45-60.
- Jawaa, Z. T., K. F. Biswas, M. F. Khan and M. Moniruzzaman (2024). "Source and respiratory deposition of trace elements in PM_{2.5} at an urban location in Dhaka city." *Heliyon* 10(4): e25420.
- John, K., S. Karnae, K. Crist, M. Kim and A. Kulkarni (2007). "Analysis of trace elements and ions in ambient fine particulate matter at three elementary schools in Ohio." *J Air Waste Manag Assoc* 57(4): 394-406.
- Jovanović, M., B. Vučićević, V. Turanjanin, M. Živković and V. Spasojević (2014). "Investigation of indoor and outdoor air quality of the classrooms at a school in Serbia." *Energy* 77: 42-48.
- Jovanović, M. V., J. Savić, R. Kovačević, V. Tasić, Ž. Todorović, S. Stevanović, et al. (2020). "Comparison of fine particulate matter level, chemical content and oxidative potential derived from two dissimilar urban environments." *Science of The Total Environment* 708: 135209.
- Kabirikopaei, A., J. Lau, J. Nord and J. Bovaird (2021). "Identifying the K-12 classrooms' indoor air quality factors that affect student academic performance." *Science of The Total Environment* 786: 147498.
- Kaghazchi, M. E. and M. Soleimani (2023). "Changes in ecological and health risk assessment indices of potentially toxic elements associated with ambient air particulate matters (PM_{2.5}) in response to source, land use and temporal variation in Isfahan city, Iran." *Urban Climate* 49: 101520.
- Kampa, M. and E. Castanas (2008). "Human health effects of air pollution." *Environ Pollut* 151(2): 362-7.
- Katsoyiannis, A. and K. Breivik (2014). "Model-based evaluation of the use of polycyclic aromatic hydrocarbons molecular diagnostic ratios as a source identification tool." *Environmental Pollution* 184: 488-94.
- Kim, D., B. M. Kumfer, C. Anastasio, I. M. Kennedy and T. M. Young (2009). "Environmental aging of polycyclic aromatic hydrocarbons on soot and its effect on source identification." *Chemosphere* 76(8): 1075-81.
- Kolarik, B., Z. J. Andersen, T. Ibfelt, E. H. Englund, E. Møller and E. V. Bräuner (2016). "Ventilation in day care centers and sick leave among nursery children." *Indoor Air* 26(2): 157-67.
- Kovačević, R., V. Tasić, M. Živković, N. Živković, A. Đorđević, D. Manojlović, et al. (2015). "Mass concentrations and indoor-outdoor relationships of PM in selected educational

- buildings in Niš, Serbia." *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly* 21(1-2): 149-58.
- Krugly, E., D. Martuzevicius, R. Sidaraviciute, D. Ciuzas, T. Prasauskas, V. Kauneliene, et al. (2014). "Characterization of particulate and vapor phase polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor and outdoor air of primary schools." *Atmospheric Environment* 82: 298-306.
- Kumar, P., A. B. Singh, T. Arora, S. Singh and R. Singh (2023). "Critical review on emerging health effects associated with the indoor air quality and its sustainable management." *Science of The Total Environment* 872: 162163.
- Lam, J., E. Koustas, P. Sutton, A. M. Padula, M. D. Cabana, H. Vesterinen, et al. (2021). "Exposure to formaldehyde and asthma outcomes: A systematic review, meta-analysis, and economic assessment." 16(3): e0248258.
- Lazović, I., M. Jovasevic-Stojanovic, M. Zivkovic, V. Tasić and Z. Z. Stevanovic (2014). "PM and CO₂ variability and relationship in the different school environments." *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly* 21: 179-87.
- Lazović, I., Ž. M. Stevanović, M. Jovasevic-Stojanovic, M. Zivkovic and M. Banjac (2016). "Impact of CO₂ concentration on indoor air quality and correlation with relative humidity and indoor air temperature in school buildings in Serbia." *Thermal Science* 20: 297-307.
- Lee, G., M. Kim, D. Park and C. Yoo (2023). "Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Sources and Its Individual Contribution Estimation Using a Positive Matrix Factorization Model." *Toxics* 11(1).
- Lee, S.-J., H.-Y. Lee, S.-J. Kim, N.-K. Kim, M. Jo, C.-K. Song, et al. (2024). "Mapping the spatial distribution of primary and secondary PM_{2.5} in a multi-industrial city by combining monitoring and modeling results." *Environmental Pollution* 348: 123774.
- Lelieveld, J., A. Pozzer, U. Pöschl, M. Fnais, A. Haines and T. Münzel (2020). "Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective." *Cardiovasc Res* 116(11): 1910-17.
- Li, J.-N., Y. Zhang, J.-X. Wang, H. Xiao, A. Nikolaev, Y.-F. Li, et al. (2023). "Occurrence, Sources, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Road Environments from Harbin, a Megacity of China." *Toxics* 11(8): 695.
- Li, Y., F. Tian, R. Zhong and H. Zhao (2024). "Source characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in surface soils of Shenyang, China: A comparison of two receptor models combined with Monte Carlo simulation." *Journal of Hazardous Materials* 462: 132805.
- Liang, S. X., H. Wu and H. W. Sun (2015). "Determination of trace elements in airborne PM₁₀ by inductively coupled plasma mass spectrometry." *International Journal of Environmental Science and Technology* 12(4): 1373-78.
- Liaud, C., S. Chouvenec and S. Le Calvé (2021). "Simultaneous Monitoring of Particle-Bound PAHs Inside a Low-Energy School Building and Outdoors over Two Weeks in France." *Atmosphere* 12 DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12010108>.
- Liaud, C., T. Dintzer, V. Tschamber, G. Trouve and S. Le Calvé (2014). "Particle-bound PAHs quantification using a 3-stages cascade impactor in French indoor environments." *Environmental Pollution* 195: 64-72.
- Lin, Y.-C., Y.-C. Li, S. Shangdiar, F.-C. Chou, Y.-T. Sheu and P.-C. Cheng (2019). "Assessment of PM_{2.5} and PAH content in PM_{2.5} emitted from mobile source gasoline-fueled vehicles in concomitant with the vehicle model and mileages." *Chemosphere* 226: 502-08.
- Liu, L., Y. Liu, W. Wen, L. Liang, X. Ma, J. Jiao, et al. (2020). "Source Identification of Trace Elements in PM_{2.5} at a Rural Site in the North China Plain." *Atmosphere* 11(2): 179.

- Liu, X., Y. Wang, R. Zhu, Y. Wei and J. Hu (2023). "Complex temperature dependence of vehicular emissions: Evidence from a global meta-analysis." *Environmental Research* 237: 116890.
- Lopez, B., X. Wang, L.-W. A. Chen, T. Ma, D. Mendez-Jimenez, L. C. Cobb, et al. (2023). "Metal contents and size distributions of brake and tire wear particles dispersed in the near-road environment." *Science of The Total Environment* 883: 163561.
- Lu, L., L.-l. Zhang, G. J. Li, W. Guo, W. Liang and W. Zheng (2005). "Alteration of Serum Concentrations of Manganese, Iron, Ferritin, and Transferrin Receptor Following Exposure to Welding Fumes Among Career Welders." *NeuroToxicology* 26(2): 257-65.
- Luo, X. S., W. Huang, G. Shen, Y. Pang, M. Tang, W. Li, et al. (2024). "Source differences in the components and cytotoxicity of PM_{2.5} from automobile exhaust, coal combustion, and biomass burning contributing to urban aerosol toxicity." *Atmos. Chem. Phys.* 24(2): 1345-60.
- Madureira, J., I. Paciência, E. Ramos, H. Barros, C. Pereira, J. P. Teixeira, et al. (2015). "Children's Health and Indoor Air Quality in Primary Schools and Homes in Portugal-Study Design." *J Toxicol Environ Health A* 78(13-14): 915-30.
- Mai, J.-L., W.-W. Yang, Y. Zeng, Y.-F. Guan and S.-J. Chen (2024). "Volatile organic compounds (VOCs) in residential indoor air during interior finish period: Sources, variations, and health risks." *Hygiene and Environmental Health Advances* 9: 100087.
- Mainka, A., E. Zajusz-Zubek and K. Kaczmarek (2015). "PM_{2.5} in Urban and Rural Nursery Schools in Upper Silesia, Poland: Trace Elements Analysis." *Int J Environ Res Public Health* 12(7): 7990-8008.
- Maji, K. J., A. K. Dikshit, M. Arora and A. Deshpande (2018). "Estimating premature mortality attributable to PM_{2.5} exposure and benefit of air pollution control policies in China for 2020." *Sci Total Environ* 612: 683-93.
- Mallah, M. A., L. Changxing, M. A. Mallah, S. Noreen, Y. Liu, M. Saeed, et al. (2022). "Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overreview." *Chemosphere* 296: 133948.
- Mallongi, A., S. Stang, R. D. P. Astuti, A. U. Rauf and M. F. Natsir (2023). "Risk assessment of fine particulate matter exposure attributed to the presence of the cement industry." *Global Journal of Environmental Science and Management* 9(1): 43-58.
- Manisalidis, I., E. Stavropoulou, A. Stavropoulos and E. Bezirtzoglou (2020). "Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review." *Frontiers in Public Health* 8.
- Marris, C. R., S. N. Kompella, M. R. Miller, J. P. Incardona, F. Brette, J. C. Hancox, et al. (2020). "Polyaromatic hydrocarbons in pollution: a heart-breaking matter." *J Physiol* 598(2): 227-47.
- Martins, V., T. Faria, E. Diapouli, M. I. Manousakas, K. Eleftheriadis, M. Viana, et al. (2020). "Relationship between indoor and outdoor size-fractionated particulate matter in urban microenvironments: Levels, chemical composition and sources." *Environ Res* 183: 109203.
- Mashitani, T., R. Noguchi, Y. Okura, T. Namisaki, A. Mitoro, H. Ishii, et al. (2016). "Efficacy of alogliptin in preventing non-alcoholic fatty liver disease progression in patients with type 2 diabetes." *Biomed Rep* 4(2): 183-87.
- Mendell, M. J., E. A. Eliseeva, M. M. Davies and A. Lobscheid (2016). "Do classroom ventilation rates in California elementary schools influence standardized test scores? Results from a prospective study." *Indoor Air* 26(4): 546-57.
- Mesías Monsalve, S., L. Martínez, K. Yohannessen Vásquez, S. Alvarado Orellana, J. Klarián Vergara, M. Martín Mateo, et al. (2018). "Trace element contents in fine particulate matter (PM_{2.5}) in urban school microenvironments near a contaminated beach with mine tailings, Chañaral, Chile." *Environ Geochem Health* 40(3): 1077-91.

- Miletić, A., J. Vesković, M. Lučić and A. Onjia (2024). "Monte Carlo simulation of source-specific risks of soil at an abandoned lead-acid battery recycling site." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 38(8): 3313-29.
- Mishra, N., G. A. Ayoko and L. Morawska (2016). "Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban environment: Occurrence, toxicity and source apportionment." *Environ Pollut* 208(Pt A): 110-17.
- Miura, K., K. Shimada, T. Sugiyama, K. Sato, A. Takami, C. K. Chan, et al. (2019). "Seasonal and annual changes in PAH concentrations in a remote site in the Pacific Ocean." *Sci Rep* 9(1): 12591.
- Mojiri, A., J. L. Zhou, A. Ohashi, N. Ozaki and T. Kindaichi (2019). "Comprehensive review of polycyclic aromatic hydrocarbons in water sources, their effects and treatments." *Sci Total Environ* 696: 133971.
- Morawska, L., A. Afshari, G. N. Bae, G. Buonanno, C. Y. Chao, O. Hänninen, et al. (2013). "Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment." *Indoor Air* 23(6): 462-87.
- Morawska, L., G. A. Ayoko, G. N. Bae, G. Buonanno, C. Y. H. Chao, S. Clifford, et al. (2017). "Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure." *Environ Int* 108: 75-83.
- Morawska, L., G. A. Ayoko, G. N. Bae, G. Buonanno, C. Y. H. Chao, S. Clifford, et al. (2017). "Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure." *Environment International* 108: 75-83.
- Mwangi, J. K., C. Degrendele, B. A. M. Bandowe, P. Bohlin-Nizzetto, A. K. Halse, A. H. Šmejkalová, et al. (2024). "Air-soil cycling of oxygenated, nitrated and parent polycyclic aromatic hydrocarbons in source and receptor areas." *Science of The Total Environment* 921: 170495.
- Oliveira, M., K. Slezakova, C. Delerue-Matos, M. C. Pereira and S. Morais (2015). "Polycyclic aromatic hydrocarbons: levels and phase distributions in preschool microenvironment." *Indoor Air* 25(5): 557-68.
- Oliveira, M., K. Slezakova, C. Delerue-Matos, M. C. Pereira and S. Morais (2019). "Children environmental exposure to particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons and biomonitoring in school environments: A review on indoor and outdoor exposure levels, major sources and health impacts." *Environ Int* 124: 180-204.
- Oliveira, M., K. Slezakova, C. Delerue-Matos, M. d. C. Pereira and S. Morais (2016). "Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor and outdoor air of preschool environments (3–5 years old children)." *Environmental Pollution* 208: 382-94.
- Oliveira, M., K. Slezakova, J. Madureira, E. de Oliveira Fernandes, C. Delerue-Matos, S. Morais, et al. (2017). "Polycyclic aromatic hydrocarbons in primary school environments: Levels and potential risks." *Science of The Total Environment* 575: 1156-67.
- Othman, M., M. T. Latif and Y. Matsumi (2019). "The exposure of children to PM_{2.5} and dust in indoor and outdoor school classrooms in Kuala Lumpur City Centre." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 170: 739-49.
- Othman, M., M. T. Latif, N. N. Mohd Naim, S. M. S. Mohamed Zain, M. F. Khan, M. Sahani, et al. (2022). "Children's exposure to PM_{2.5} and its chemical constituents in indoor and outdoor schools urban environment." *Atmospheric Environment* 273: 118963.
- Ouyang, R., S. Yang and L. Xu (2020). "Analysis and Risk Assessment of PM_{2.5}-Bound PAHs in a Comparison of Indoor and Outdoor Environments in a Middle School: A Case Study in Beijing, China." *Atmosphere* 11(9): 904.

- Pang, K., K. Luo, S. Zhang and L. Hao (2024). "Source-oriented health risk assessment of groundwater based on hydrochemistry and two-dimensional Monte Carlo simulation." *Journal of Hazardous Materials* 479: 135666.
- Patel, A. B., S. Shaikh, K. R. Jain, C. Desai and D. Madamwar (2020). "Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches." *Front Microbiol* 11: 562813.
- Petersen, S., K. L. Jensen, A. L. Pedersen and H. S. Rasmussen (2016). "The effect of increased classroom ventilation rate indicated by reduced CO₂ concentration on the performance of schoolwork by children." *Indoor Air* 26(3): 366-79.
- Premnath, N., K. Mohanrasu, R. Guru Raj Rao, G. H. Dinesh, G. S. Prakash, V. Ananthi, et al. (2021). "A crucial review on polycyclic aromatic Hydrocarbons - Environmental occurrence and strategies for microbial degradation." *Chemosphere* 280: 130608.
- Prigioniero, A., A. Postiglione, D. Zuzolo, Ü. Niinemets, M. Tartaglia, P. Scarano, et al. (2023). "Leaf surface functional traits influence particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons air pollution mitigation: Insights from Mediterranean urban forests." *Journal of Cleaner Production* 418: 138158.
- Radomirović, M., A. Miletić and A. Onjia (2023). "Accumulation of heavy metal(loid)s and polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediment of the Prahovo Port (Danube) and associated risks." *Environ Monit Assess* 195(2): 323.
- RAIS (2024). "The Risk Assessment Information System. Retrieved Augst 15, 2024, from <https://rais.ornl.gov/index.html>."
- Rajšić, S. F., M. D. Tasić, V. T. Novaković and M. N. Tomašević (2004). "First assessment of the PM₁₀ and PM_{2.5} particulate level in the ambient air of belgrade city." *Environmental Science and Pollution Research* 11(3): 158-64.
- Raju, S., T. Siddharthan and M. C. McCormack (2020). "Indoor Air Pollution and Respiratory Health." *Clin Chest Med* 41(4): 825-43.
- Ray, N., P. Dong, J. South and L. Liang (2024). "Wind-urban structure interplay in PM_{2.5} variation: Insights from multi-seasonal mobile air quality campaign." *Transactions in Urban Data, Science, and Technology* 3(1-2): 61-79.
- Rivas, I., M. Viana, T. Moreno, M. Pandolfi, F. Amato, C. Reche, et al. (2014). "Child exposure to indoor and outdoor air pollutants in schools in Barcelona, Spain." *Environment International* 69: 200-12.
- Rodríguez-Maroto, J. J., S. García-Alonso, E. Rojas, D. Sanz, I. Ibarra, R. Pérez-Pastor, et al. (2024). "Characterization of PAHs bound to ambient ultrafine particles around runways at an international airport." *Chemosphere* 352: 141440.
- Romagnoli, P., C. Balducci, M. Perilli, M. Gherardi, A. Gordiani, C. Gariazzo, et al. (2014). "Indoor PAHs at schools, homes and offices in Rome, Italy." *Atmospheric Environment* 92: 51-59.
- Romagnoli, P., C. Balducci, M. Perilli, F. Vichi, A. Imperiali and A. Cecinato (2016). "Indoor air quality at life and work environments in Rome, Italy." *Environmental Science and Pollution Research* 23(4): 3503-16.
- Sadrizadeh, S., R. Yao, F. Yuan, H. Awbi, W. Bahnfleth, Y. Bi, et al. (2022). "Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment." *Journal of Building Engineering* 57: 104908.
- Saini, P. and M. Sharma (2020). "Cause and Age-specific premature mortality attributable to PM_{2.5} Exposure: An analysis for Million-Plus Indian cities." *Sci Total Environ* 710: 135230.
- Sang, S., C. Chu, T. Zhang, H. Chen and X. Yang (2022). "The global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter in 204 countries and territories, 1990–

- 2019: A systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2019." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 238: 113588.
- Sannoh, F., Z. Fatmi, D. O. Carpenter, M. Santoso, A. Siddique, K. Khan, et al. (2024). "Air pollution we breathe: Assessing the air quality and human health impact in a megacity of Southeast Asia." *Science of The Total Environment* 942: 173403.
- Saravanan, A., P. S. Kumar, R. V. Hemavathy, S. Jeevanantham, P. Harikumar, G. Priyanka, et al. (2022). "A comprehensive review on sources, analysis and toxicity of environmental pollutants and its removal methods from water environment." *Science of The Total Environment* 812: 152456.
- Sarbu, I. and C. Pacurar (2015). "Experimental and numerical research to assess indoor environment quality and schoolwork performance in university classrooms." *Building and Environment* 93: 141-54.
- Sekar, M. and T. R. Praveenkumar (2024). "Critical review on the formations and exposure of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the conventional hydrocarbon-based fuels: Prevention and control strategies." *Chemosphere* 350: 141005.
- Sengupta, D., V. Samburova, C. Bhattarai, H. Moosmüller and A. Khlystov (2023). "Emission factors for polycyclic aromatic hydrocarbons from laboratory biomass-burning and their chemical transformations during aging in an oxidation flow reactor." *Science of The Total Environment* 870: 161857.
- Shahrbafe, M. A., M. A. Akbarzadeh, M. Tabary and I. Khaheshi (2021). "Air Pollution and Cardiac Arrhythmias: A Comprehensive Review." *Curr Probl Cardiol* 46(3): 100649.
- Shao, Y. (2024). "Adhesion theory and model for air humidity impact on dust emission." *Aeolian Research* 66: 100898.
- Shendell, D. G., R. Prill, W. J. Fisk, M. G. Apte, D. Blake and D. Faulkner (2004). "Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho." *Indoor Air* 14(5): 333-41.
- Si, J., L. Bai, X. Xu and C. Li (2023). "Pollution characteristics and health hazards of PAHs in PM_{1.0} in the cooking environment." *Building and Environment* 237: 110279.
- Simons, E., S. A. Hwang, E. F. Fitzgerald, C. Kielbaso and S. Lin (2010). "The impact of school building conditions on student absenteeism in Upstate New York." *Am J Public Health* 100(9): 1679-86.
- Siudek, P. (2020). "Seasonal variability of trace elements in fine particulate matter (PM_{2.5}) in a coastal city of northern Poland – profile analysis and source identification." *Environmental Science: Processes & Impacts* 22(11): 2230-43.
- Siudek, P. (2022). "Compositional and seasonal differences of gas and particle phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) over the southern Baltic Sea coast." *Scientific Reports* 12(1): 21005.
- Slezakova, K., M. Oliveira, J. Madureira, E. O. Fernandes, C. Delerue-Matos, S. Morais, et al. (2017). "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in Portuguese educational settings: a comparison between preschools and elementary schools." *J Toxicol Environ Health A* 80(13-15): 630-40.
- Sui, S., J. Ng, Y. Gao, C. Peng, C. He, G. Wang, et al. (2020). "Pollution characteristics and chronic health risk assessment of metals and metalloids in ambient PM_{2.5} in Licheng District, Jinan, China." *Environmental Geochemistry and Health* 42(7): 1803-15.
- Sun, J., X. Huang, X. Song, R. Tang, M. Zhao, B. Cai, et al. (2023). "New insights into health risk assessment on soil trace metal(loid)s: Model improvement and parameter optimization." *Journal of Hazardous Materials* 458: 131919.
- Sun, J., Z. Shen, T. Zhang, S. Kong, H. Zhang, Q. Zhang, et al. (2022). "A comprehensive evaluation of PM_{2.5}-bound PAHs and their derivative in winter from six megacities in

- China: Insight the source-dependent health risk and secondary reactions." *Environment International* 165: 107344.
- Suvarapu, L. N. and S. O. Baek (2017). "Determination of heavy metals in the ambient atmosphere." *Toxicol Ind Health* 33(1): 79-96.
- Taye, A. E., B. S. Chandravanshi, F. Z. Beshah and E. Sahle-Demessie (2024). "Elemental composition and health risk assessment of PM₁₀, PM_{2.5}, at different microenvironments: Addis Ababa, Ethiopia." *PLoS One* 19(10): e0309995.
- Thangavel, P. and D. Park (2022). "Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview." 19(12).
- Theodoros, G. and M. Giorgio (2014). Non-exhaust traffic related emissions – Brake and tyre wear PM.
- Thoua, C., E. Cooper, S. Stamp, A. Mavrogianni and D. Mumovic (2022). Indoor Air Quality in Schools. Handbook of Indoor Air Quality. Y. Zhang, P. K. Hopke and C. Mandin. Singapore, Springer Nature Singapore: 1891-933.
- Tian, H. Z., L. Lu, J. M. Hao, J. J. Gao, K. Cheng, K. Y. Liu, et al. (2013). "A Review of Key Hazardous Trace Elements in Chinese Coals: Abundance, Occurrence, Behavior during Coal Combustion and Their Environmental Impacts." *Energy & Fuels* 27(2): 601-14.
- Tobiszewski, M. and J. Namieśnik (2012). "PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources." *Environ Pollut* 162: 110-9.
- Todorović, M. N., M. B. Radenković, A. E. Onjia and L. M. Ignjatović (2020). "Characterization of PM_{2.5} sources in a Belgrade suburban area: a multi-scale receptor-oriented approach." *Environmental Science and Pollution Research* 27(33): 41717-30.
- Tran, D. T., L. Y. Alleman, P. Coddeville and J.-C. Galloo (2012). "Elemental characterization and source identification of size resolved atmospheric particles in French classrooms." *Atmospheric Environment* 54: 250-59.
- Tran, T. D., P. M. Nguyen, D. T. Nghiem, T. H. Le, M. B. Tu, L. Y. Alleman, et al. (2020). "Assessment of Air Quality in School Environments in Hanoi, Vietnam: A Focus on Mass-Size Distribution and Elemental Composition of Indoor-Outdoor Ultrafine/Fine/Coarse Particles." *Atmosphere* 11(5): 519.
- USEPA (2001). "U.S. Environmental Protection Agency. Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume III-Part A, Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment Office of Emergency and Remedial Response. ." U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., p. 20460.
- Vallero, D. A. (2014). "Fundamentals of air pollution. 5th Ed. Elsevier Inc., London."
- Vardhan, K. H., P. S. Kumar and R. C. Panda (2019). "A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives." *Journal of Molecular Liquids* 290: 111197.
- Venkatraman, G., N. Giribabu, P. S. Mohan, B. Muttiah, V. K. Govindarajan, M. Alagiri, et al. (2024). "Environmental impact and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons and remedial strategies: A detailed review." *Chemosphere* 351: 141227.
- Vesković, J., S. Bulatović, S. Ražić, M. Lučić, A. Miletić, A. Nastasović, et al. (2024). "Arsenic-contaminated groundwater of the Western Banat (Pannonian basin): Hydrogeochemical appraisal, pollution source apportionment, and Monte Carlo simulation of source-specific health risks." 96(8): e11087.
- Villanueva, F., A. Tapia, S. Lara and M. Amo-Salas (2018). "Indoor and outdoor air concentrations of volatile organic compounds and NO₂ in schools of urban, industrial and rural areas in Central-Southern Spain." *Science of The Total Environment* 622-623: 222-35.

- Vithanage, M., P. C. Bandara, L. A. B. Novo, A. Kumar, B. Ambade, G. Naveendrakumar, et al. (2022). "Deposition of trace metals associated with atmospheric particulate matter: Environmental fate and health risk assessment." *Chemosphere* 303: 135051.
- Vo, L.-H. T., M. Yoneda, T.-D. Nghiem, K. Sekiguchi, Y. Fujitani, D. N. Vu, et al. (2024). "Characterisation of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with indoor PM_{0.1} and PM_{2.5} in Hanoi and implications for health risks." *Environmental Pollution* 343: 123138.
- Vossler, T., L. Černíkovský, J. Novák and R. Williams (2016). "Source apportionment with uncertainty estimates of fine particulate matter in Ostrava, Czech Republic using Positive Matrix Factorization." *Atmospheric Pollution Research* 7(3): 503-12.
- Wang, H., C. Shen, Y. Kang, Q. Deng and X. Lin (2020). "Spatial distribution of pollution characteristics and human health risk assessment of exposure to heavy elements in road dust from different functional areas of Zhengzhou, China." *Environ Sci Pollut Res Int* 27(21): 26650-67.
- Wang, J., H. Xu, B. Guinot, L. Li, S. S. H. Ho, S. Liu, et al. (2017). "Concentrations, sources and health effects of parent, oxygenated- and nitrated- polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in middle-school air in Xi'an, China." *Atmospheric Research* 192: 1-10.
- Wang, J. M., C.-H. Jeong, N. Hilker, R. M. Healy, U. Sofowote, J. Debosz, et al. (2021). "Quantifying metal emissions from vehicular traffic using real world emission factors." *Environmental Pollution* 268: 115805.
- Wang, M., Z. Gou, W. Zhao, Y. Qu, Y. Chen, Y. Sun, et al. (2024). "Predictive analysis and risk assessment of potentially toxic elements in Beijing gas station soils using machine learning and two-dimensional Monte Carlo simulations." *Journal of Hazardous Materials* 477: 135393.
- Wang, M., S. Jia, S. H. Lee, A. Chow and M. Fang (2021). "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in indoor environments are still imposing carcinogenic risk." *Journal of Hazardous Materials* 409: 124531.
- Wang, R., X. Ding, J. Wang, Z. Dong, H. Xu, G. Ma, et al. (2023). "Trace elements in outdoor and indoor PM_{2.5} in urban schools in Xi'an, Western China: characteristics, sources identification and health risk assessment." *Environ Geochem Health* 45(3): 1027-44.
- Wang, S., Y. Ji, J. Zhao, Y. Lin and Z. Lin (2020). "Source apportionment and toxicity assessment of PM_{2.5}-bound PAHs in a typical iron-steel industry city in northeast China by PMF-ILCR." *Science of The Total Environment* 713: 136428.
- Wang, W., C. Chen, D. Liu, M. Wang, Q. Han, X. Zhang, et al. (2022). "Health risk assessment of PM_{2.5} heavy metals in county units of northern China based on Monte Carlo simulation and APCS-MLR." *Science of The Total Environment* 843: 156777.
- Wei, B. and L. Yang (2010). "A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China." *Microchemical Journal* 94(2): 99-107.
- WHO (2003). World Health Organization, 2003, pp. 1-68. ISBN 9241530502. Retrieved August 10, 2024, from: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/42607/9241530502.pdf>.
- WHO (2021). "World Health Organization. Air Quality Guidelines-Global Update 2005: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide; WHO Regional Office for Europe: Copenhagen, Denmark, 2006; ISBN 92-890-21926. Retrieved August 10, 2024, from: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>. 2021."
- WHO. (2006). "World Health Organization. Air Quality Guidelines-Global Update 2005: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide; WHO Regional Office

- for Europe: Copenhagen, Denmark, 2006; ISBN 92-890-21926. Retrieved August 10, 2024, from:
http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf."
- WHO. (2010). "Guidelines for Indoor Air Quality - Selected Pollutants-Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, 484. Geneva: World Health Organization."
- Wu, D., L. Chen, Z. Ma, D. Zhou, L. Fu, M. Liu, et al. (2024). "Source analysis and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in total suspended particulate matter (TSP) from Bengbu, China." *Scientific Reports* 14(1): 5080.
- Wu, Z., H. Lyu, Y. Guo, Q. Man, H. Niu, J. Li, et al. (2022). "Polycyclic aromatic hydrocarbons and polybrominated diphenyl ethers inside university campus: Indoor dust-bound pollution characteristics and health risks to university student." *Building and Environment* 221: 109312.
- Xiaoyan, S., S. Longyi, Y. Shushen, S. Riying, S. Limei and C. Shihong (2015). "Trace elements pollution and toxicity of airborne PM₁₀ in a coal industrial city." *Atmospheric Pollution Research* 6(3): 469-75.
- Xu, H., B. Guinot, X. Niu, J. Cao, K. F. Ho, Z. Zhao, et al. (2015). "Concentrations, particle-size distributions, and indoor/outdoor differences of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a middle school classroom in Xi'an, China." *Environmental Geochemistry and Health* 37(5): 861-73.
- Xu, Y., Y. Zhang, H. Hou, Q. Qiu and C. Jia (2024). "Characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in dew in urban ecosystems in Northeast China." *Atmospheric Environment* 338: 120791.
- Yang, M., H. Fan and K. Zhao (2019). "PM_{2.5} Prediction with a Novel Multi-Step-Ahead Forecasting Model Based on Dynamic Wind Field Distance." *Int J Environ Res Public Health* 16(22).
- Yang, X.-y., G.-c. Song, Z.-w. Li and Q. Song (2024). "Effect of biomass-coal blending combustion on Pb transformation." *Journal of Hazardous Materials* 461: 132697.
- Yu, W., R. Xu, T. Ye, M. J. Abramson, L. Morawska, B. Jalaludin, et al. (2024). "Estimates of global mortality burden associated with short-term exposure to fine particulate matter (PM_{2.5})." *The Lancet Planetary Health* 8(3): e146-e55.
- Zender-Świercz, E., B. Galiszewska, M. Telejko and M. Starzomska (2024). "The effect of temperature and humidity of air on the concentration of particulate matter - PM_{2.5} and PM₁₀." *Atmospheric Research* 312: 107733.
- Zhang, H.-H., Z. Li, Y. Liu, P. Xinag, X.-Y. Cui, H. Ye, et al. (2018). "Physical and chemical characteristics of PM_{2.5} and its toxicity to human bronchial cells BEAS-2B in the winter and summer." *Journal of Zhejiang University. Science. B* 19(4): 317-26.
- Zhang, J., E. Wei, L. Wu, X. Fang, F. Li, Z. Yang, et al. (2018). "Elemental Composition and Health Risk Assessment of PM₁₀ and PM_{2.5} in the Roadside Microenvironment in Tianjin, China." *Aerosol and Air Quality Research* 18(7): 1817-27.
- Zhang, L., H. Morisaki, Y. Wei, Z. Li, L. Yang, Q. Zhou, et al. (2020). "PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and nitro-polycyclic aromatic hydrocarbons inside and outside a primary school classroom in Beijing: Concentration, composition, and inhalation cancer risk." *Science of The Total Environment* 705: 135840.
- Zhang, L., C. Ou, D. Magana-Arachchi, M. Vithanage, K. S. Vanka, T. Palanisami, et al. (2021). "Indoor Particulate Matter in Urban Households: Sources, Pathways, Characteristics, Health Effects, and Exposure Mitigation." *Int J Environ Res Public Health* 18(21).
- Zhang, Y., Z. Shen, J. Sun, L. Zhang, B. Zhang, H. Zou, et al. (2021). "Parent, alkylated, oxygenated and nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} emitted from residential biomass burning and coal combustion: A novel database of 14 heating scenarios." *Environmental Pollution* 268: 115881.

- Zhao, B., S. Shi and J. S. Ji (2022). "The WHO Air Quality Guidelines 2021 promote great challenge for indoor air." *Science of The Total Environment* 827: 154376.
- Zhao, Y., X. Wang, Y. Cai, J. Pan, W. Yue, H. Xu, et al. (2021). "Measurements of atmospheric aerosol hygroscopic growth based on multi-channel Raman-Mie lidar." *Atmospheric Environment* 246: 118076.
- Zheng, X., S. Zhang, Y. Wu, G. Xu, J. Hu, L. He, et al. (2018). "Measurement of particulate polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from gasoline light-duty passenger vehicles." *Journal of Cleaner Production* 185: 797-804.
- Zhou, J., H. Wang, G. Huebner, Y. Zeng, Z. Pei and M. Ucci (2023). "Short-term exposure to indoor PM_{2.5} in office buildings and cognitive performance in adults: An intervention study." *Building and Environment* 233: 110078.
- Živković, M., M. Jovašević-Stojanović, A. Cvetković, R. Jovanović and D. Manojlović (2023). "Characterisation of fine particulate matter level, content and sources of a kindergarden microenvironment in Belgrade city center." *Thermal Science* 27(3, part B): 2215-28.
- Živković, M., M. Jovašević-Stojanović, A. Cvetković, I. Lazović, V. Tašić, Z. Stevanović, et al. (2015). "PAHs levels in gas and particle-bound phase in schools at different locations in Serbia. Ch." *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly* 21(1): 159-67.
- Zwoździak, A., I. Sówka, B. Krupińska, J. Zwoździak and A. Nych (2013). "Infiltration or indoor sources as determinants of the elemental composition of particulate matter inside a school in Wrocław, Poland?" *Building and Environment* 66: 173-80.

BIOGRAFIJA

Jelena R. Obradović, diplomirani profesor biologije i hemije, rođena je 01.09.1983. godine u Jagodini. Osnovnu školu „Jovan Jovanović Zmaj“ završila je u Svilajncu kao nosilac diplome „Vuk Karadžić“, dok je srednju medicinsku školu „Dulić dr Vojislav“ završila u Požarevcu. Biološki fakultet Univerziteta u Beogradu, smer profesor biologije i hemije upisala je školske 2002/2003. godine, diplomirala 2007. godine sa prosečnom ocenom 8,68, odbranivši diplomski rad pod nazivom: “Učenička postignuća iz oblasti nematali i njihova jedinjenja” sa ocenom 10. Doktorske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu na studijskom programu Inženjerstvo zaštite životne sredine upisala je 2021/2022. godine. U okviru doktorskih akademskih studija Jelena Obradović je položila sve ispite predviđene planom i programom sa prosečnom ocenom 9,18. Završni ispit na doktorskim akademskim studijama pod nazivom „Analiza prostorne i vremenske distribucije zagađujućih materija u ambijentalnom vazduhu“ odbranila je 26.09.2023. godine, sa ocenom 10.

Jelena Obradović je od 2007. godine do danas radila kao nastavnik biologije, hemije i stručnih predmeta u više osnovnih škola i u srednjoj školi Vazduhoplovna akademija u Beogradu. Od 2019. radi kao nastavnik bilingvalne nastave na predmetu Opasne materije u Vazduhoplovnoj akademiji. U oktobru 2021. godine zaposlena je u svojstvu saradnika u nastavi, a potom u aprilu 2024. godine izabrana u zvanje asistenta na predmetu Ekologija i zaštita životne sredine u Visokoj školi strukovnih studija Vazduhoplovna akademija u Beogradu, gde je od septembra 2023. do februara 2025. godine obavljala i funkciju pomoćnika direktora za nastavu, a od aprila 2025. obavlja funkciju pomoćnika direktora u Vazduhoplovnoj akademiji. U saradnji sa Zavodom za vrednovanje kvaliteta obrazovanja i vaspitanja Beograd, bila je angažovana na 4 projekta pripreme i pisanja zadataka za polaganje završnog ispita u osnovnom obrazovanju, za oblast hemija, 3 projekta unapređenja kvaliteta obrazovanja kroz uvođenje ispita na kraju srednjeg obrazovanja i 3 projekta u okviru kojih je vodila obuke zaposlenih u obrazovanju za ostvarivanje obrazovnih standarda i vrednovanje znanja. Od 2023. godine do danas angažovana je na dva međunarodna Erasmus + projekta (*Ecology and Meteorology – Cooperation Partnership (EAC/A10/2022)* i *Erasmus Mundus Design Measures project (101128169 MBAA)*)). Pohađala je više stručnih kurseva i radionica. Član je Srpskog hemijskog društva od 2014. godine.

Naučno-istraživački rad Jelene Obradović usmeren je na oblast inženjerstva zaštite životne sredine, i to na polju ispitivanja zagađenja vazduha. Iz dosadašnjih istraživanja publikovala je dva naučna rada u međunarodnom časopisu izuzetnih vrednosti (M21a), jedan rad u međunarodnom časopisu (M23) i četiri saopštenja sa međunarodnih i nacionalnih skupova, jedno saopštenje štampano u celini i dva saopštenja štampana u izvodu (M34) i jedno saopštenje iz kategorije (M64). Takođe, autor (za oblast hemija) je na jedanaest izdanja Zbirke zadataka iz biologije, geografije, istorije, fizike i hemije za polaganje završnog ispita u osnovnom obrazovanju i vaspitanju. Tokom svog stručno-pedagoškog rada u svojstvu autora objavila je četiri radne sveske za potrebe učenika Vazduhoplovne akademije.

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora Jelena R. Obradović
Broj indeksa 4010/2021

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Procena rizika po zdravlje učenika škole u urbanoj sredini usled prisustva štetnih hemijskih
supstanci na suspendovanim česticama u vazduhu

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršila autorska prava i koristila intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu, 22. 04. 2025.

Potpis autora

J. Obradović

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora	Jelena R. Obradović
Broj indeksa	4010/2021
Studijski program	Inženjerstvo zaštite životne sredine
Naslov rada	Procena rizika po zdravlje učenika škole u urbanoj sredini usled prisustva štetnih hemijskih supstanci na suspendovanim česticama u vazduhu
Mentori	prof. dr Antonije Onjia i prof. dr Slavica Ražić

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predala radi pohranjena u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**. Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada. Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 22. 04. 2025.

Potpis autora



Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Procena rizika po zdravlje učenika škole u urbanoj sredini usled prisustva štetnih hemijskih supstanci na suspendovanim česticama u vazduhu

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
- ③. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci. Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

U Beogradu, 22. 04. 2025.

Potpis autora



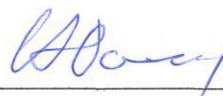
1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

Ocena izveštaja o proveru originalnosti doktorske disertacije

Na osnovu Pravilnika o postupku provere originalnosti doktorskih disertacija koje se brane na Univerzitetu u Beogradu i nalaza u izveštaju iz programa iThenticate kojim je izvršena provera originalnosti doktorske disertacije „Procena rizika po zdravlje učenika škole u urbanoj sredini usled prisustva štetnih hemijskih supstanci na suspendovanim česticama u vazduhu“ autora Jelene R. Obradović, konstatujemo da utvrđeno podudaranje teksta iznosi 12%. Ovaj stepen podudarnosti posledica je ličnih imena, bibliografskih podataka o korišćenoj literaturi, teorijskih podataka, kao i prethodno publikovanih rezultata doktorandovih istraživanja, koji su proistekli iz njene disertacije, što je u skladu sa članom 9. Pravilnika. Na osnovu svega iznetog, a u skladu sa članom 8. stav 2. Pravilnika o postupku provere originalnosti doktorskih disertacija koje se brane na Univerzitetu u Beogradu, izjavljujemo da izveštaj ukazuje na originalnost doktorske disertacije, te se propisani postupak pripreme za njenu odbranu može nastaviti.

Mentori

U Beogradu, 28.05.2025.



dr Antonije Onjia, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet



dr Slavica Ražić, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Farmaceutski fakultet