

# Raspodjela izvora sa receptorskim i MATCH modeliranjem u Bosni i Hercegovini

Izvještaj pripremio SMHI.

Autori: Maria Grundström, Christian Asker, Olivier Tasse, Ulrica Sievert and Lars Gidhagen



## SADRŽAJ

<b>POPIS TABELA .....</b>	<b>4</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>6</b>
<b>IZVRŠNI SAŽETAK .....</b>	<b>8</b>
<b>UVOD .....</b>	<b>16</b>
<b>PRVI DIO: REZULTAT RASPODJELE IZVORA IZ MODELIRANJA RECEPTORA PMF 5.0 NA HEMIJSKOJ ANALIZI DNEVNIH UZORAKA PM2.5 TOKOM ZIME 2020-2021 I 2021-2022 U BOSNI I HERCEGOVINI .....</b>	<b>17</b>
<b>Pozadina .....</b>	<b>17</b>
<b>Metoda .....</b>	<b>18</b>
Kampanje uzorkovanja 2020-2021 .....	18
Kampanje uzorkovanja 2021-2022 .....	20
Gravimetrijska analiza.....	21
Raspodjela filtera prije daljnje analize.....	21
Elementarna analiza izvršena 2020-2021 .....	23
Elementarna analiza provedena 2021-2022 .....	24
Analiza jonskom hromatografijom .....	25
Analiza organskih markera: levoglukozana, manozana i galaktozana.....	26
Analiza organskih markera OC i EC .....	26
Analitički rezultati .....	28
Analiza ukupne mase .....	30
Modeliranje pozitivne faktorizacije matrice (PMF) .....	33
Ulagani podaci i postavke u PMF analizi 2020-2021.....	34
Ulagani podaci i postavke u PMF analizi 2021-2022.....	40
Optimizacija rješenja modela od "osnovnog izvođenja" do "ograničenog rješenja" .....	44
<b>Rezultati .....</b>	<b>44</b>
Prikaz rezultata .....	44
Identifikacija različitih izvora – kampanja 2020-2021 .....	46
Sarajevo – ograničeno rješenje, zima 2020/2021.....	48
Tuzla – ograničeno rješenje, zima 2022/2021 .....	49
Zenica – ograničeno rješenje, zima 2020/2021 .....	50
Banja Luka – ograničeno rješenje, zima 2022/2021 .....	51
Bijeljina – ograničeno rješenje, zima 2020/2021.....	52
Brod – osnovno rješenje, zima 2022/2021 .....	53
Sekundarni aerosoli .....	54
Sagorijevanje biomase.....	55
Sagorijevanje fosilnih goriva .....	56
Primarni sulfat koji nastaje sagorijevanjem teškog ulja u Brodu.....	59
Zemljšna prašina .....	59
Ostali faktori .....	60
Diskusija o mjernoj kampanji 2020-2021 .....	61
Identifikacija različitih izvora – kampanja 2021-2022 .....	62
Sagorijevanje fosilnih goriva .....	65
Sagorijevanje biomase .....	66
Sekundarni aerosoli .....	68
Faktor odležale morske soli .....	70

Zemljšna prašina .....	72
Faktor izraženog prisustva hlorida u Banjoj Luci .....	72
Izraženo prisustvo kalija u Banjoj Luci .....	73
Industrija .....	73
<b>Kombinirana rasprava za kampanje provedene 2020-21 i 2021-22 .....</b>	<b>74</b>
<b>DRUGI DIO: JEDNOGODIŠNJE MODELIRANJE DISPERZIJE I RASPODJELA IZVORA</b>	
<b>KORIŠTENJEM MATCH MODELA SARAJEVA I BANJE LUKE .....</b>	<b>78</b>
Pozadina projekta .....	79
<b>Metode .....</b>	<b>79</b>
Konsolidacija podataka o lokalnim emisijama .....	80
<b>Emisije regionalnog nivoa .....</b>	<b>84</b>
Kreiranje modela za Sarajevo .....	85
Postavljanje modela za Banju Luku .....	89
Konačna postavka MATCH modela .....	98
<b>Rezultati .....</b>	<b>100</b>
Rezultati za Sarajevo .....	100
Rezultati za Banju Luku .....	109
Neizvjesnost i buduća poboljšanja .....	114
<b>Završni sažetak studije MATCH .....</b>	<b>117</b>
<b>ZAVRŠNE NAPOMENE O OBJE STUDIJE U OVOM IZVJEŠTAJU (MODELIRANJE PMF RECEPTORA I MATCH) .....</b>	<b>120</b>
<b>ZAHVALE .....</b>	<b>121</b>
<b>REFERENCE .....</b>	<b>122</b>
<b>PRILOZI .....</b>	<b>126</b>
<b>Prilog 1 - Kontribucija faktora .....</b>	<b>126</b>
Sarajevo 2020-2021 – kontribucija faktora .....	127
Tuzla 2020-2021 – kontribucija faktora .....	128
Zenica 2020-2021 – kontribucija faktora .....	129
Banja Luka 2020-2021 – kontribucija faktora .....	130
Bijeljina 2020-2021 – kontribucija faktora .....	131
Brod 2020-2021 – kontribucija faktora .....	132
Sarajevo 2021-2022 – kontribucija faktora .....	133
Banja Luka 2021-2022 – kontribucija faktora .....	134
<b>Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjеле izvora .....</b>	<b>135</b>
<b>Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjеле izvora .....</b>	<b>143</b>

## POPIS TABELA

Tabela 1: Raspodjela izvora 2020-2021 zasnovana na modeliranju receptora.....	9
Tabela 2: Raspodjela izvora 2021-2022 zasnovana na modeliranju receptora.....	11
Tabela 3: Ukupne emisije (tone/godišnje) glavnih zagađivača zraka za domenu modela Sarajevo iz skupa lokalnih podataka o emisijama zajedno sa CAMS regionalnom bazom podataka o emisijama (*). ....	12
Tabela 4: Ukupne emisije (tone/godišnje) glavnih zagađivača zraka za domenu modela Banja Luka iz skupa lokalnih podataka o emisijama zajedno sa CAMS regionalnom bazom podataka o emisijama (*) .....	12
Tabela 5. Karakteristike mesta na kojima su uzimani uzorci.....	20
Tabela 6: Kampanja 2020-2021 - Proširene nesigurnosti za elementarnu analizu, pri čemu je x izračunata masena koncentracija svakog elementa .....	23
Tabela 7: Kampanja 2020-2021 - Granice detekcije metoda za elementarnu analizu.....	23
Tabela 8: Kampanja 2021-2022 - proširene nesigurnosti za elementarnu analizu, pri čemu je x izračunata masena koncentracija svakog elementa .....	24
Tabela 9: Kampanja 2021-2022- Granice detekcije metoda za elementarnu analizu.....	24
Tabela 10: Proširene nesigurnosti za analizu jonske hromatografije, pri čemu je x izračunata masena koncentracija svakog jona.....	25
Tabela 11: Kampanja 2020-2021- Granica detekcije metoda za jonsku hromatografiju.....	25
Tabela 12: Kampanja 2021-2022 - Granice detekcije metoda za jonsku hromatografiju .....	25
Tabela 13: Kampanja 2020-2021 - Prosječne koncentracije i standardne devijacije (SD) PM 2.5 i hemijskih sastojaka.....	29
Tabela 14: Kampanja 2021-2022 - Prosječne koncentracije i standardne devijacije (SD) PM 2.5 i hemijskih sastojaka.....	30
Tabela 15: Kampanja 2020-2021 - parametri za određivanje ukupne mase PM 2.5 .....	31
Tabela 16: Kampanja 2020-2021 - parametri za određivanje ukupne mase PM 2.5 .....	32
Tabela 17: Ulagani podaci i postavke PMF 5.0 .....	37
Tabela 18: Baza dijagnostike .....	38
Tabela 19: Ograničene postavke i provjere valjanosti.....	40
Tabela 20: Ulagani podaci i postavke PMF 5.0 .....	42
Tabela 21: Baza dijagnostike .....	44
Tabela 22: Usporedba faktora nastajanja sekundarnih aerosola .....	55
Tabela 23: Poređenje faktora biomase.....	56
Tabela 24: Poređenje faktora sagorijevanja fosilnih goriva (mrki ugalj/lignite).....	58
Tabela 25: Poređenje faktora sagorijevanja fosilnih goriva i saobraćaja .....	59
Tabela 26: Poređenje faktora zemljишne prašine.....	60
Tabela 27: Ukupno poređenje faktora sagorijevanja fosila.....	66
Tabela 28: Ukupno poređenje faktora sagorijevanja biomase.....	68
Tabela 29: Ukupno poređenje faktora sekundarnih aerosola .....	69
Tabela 30: Ukupno poređenje faktora odležale morske soli.....	71
Tabela 31: Ukupno poređenje faktora zemljишne prašine.....	72
Tabela 32: Ukupno poređenje faktora industrije.....	74
Tabela 33: Ukupne emisije (tone/godišnje) glavnih zagađivača zraka za domenu modela Sarajevo iz skupa lokalnih podataka o emisijama zajedno sa CAMS regionalnom bazom podataka o emisijama (*). ....	89

<i>Tabela 34: Ukupne emisije (tone/godišnje) glavnih zagađivača zraka za područje modela Banja Luka iz lokalnog skupa podataka o emisijama zajedno sa CAMS regionalnom bazom podataka o emisijama (*).</i> .....	97
<i>Tabela 35: Primjer postavljanja modela i ciklusa procjene kvaliteta.</i> .....	99

## POPIS SLIKA

Slika 1: Metodologije raspodjele izvora: model disperzije naspram modela receptora .....	8
Slika 2: Poređenje disperzionog u odnosu na modeliranje receptora.....	14
Slika 3: Mesta uzorkovanja u Bosni i Hercegovini tokom zime 2020.-2021.....	18
Slika 4: Sven Leckel SEQ47/50-RV instrument za uzimanje uzoraka i transportna kutija .....	19
Slika 5: Rezanje filtera za analizu; 1/2 filter za elementarnu + isječak za OC/EC (lijevo), i 1/2 za bilo koji šećer + isječak za jonsku hromatografiju (desno) .....	22
Slika 6: Kampanja 2021-2022 - presjek filtera za analizu; preostali filter za elementarni bezvodni šećer + 2 isječka za jonsku hromatografiju + pravougaoni isječak za OC/EC.....	22
Slika 7: Tipičan rezultat s definicijom faktora (lijevo) i vremenskim nizom faktora (desno) .....	34
Slika 8: Primjer rezultata s definicijom faktora (lijevo) i hronološkim nizom faktora (desno)....	44
Slika 9: Polarni grafikon hronološke serije.....	46
Slika 10: Koncentracije ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sulfata i nitrata tokom novembra – decembra 2020. i januara 2021.....	54
Slika 11: Urbanistički atlas Zenica i korištenje energije po poligonu nakon usklađivanja u Banjoj Luci.....	81
Slika 12: Urbanistički atlas Banje Luke 2012. kategorije korištenja zemljišta za koje se prepostavlja da doprinose emisijama iz grijanja stambenih objekata. Glavni putevi su prikazani za orientaciju.....	82
Slika 13: Brojanje saobraćaja i modeliranje glavnih cesta u BiH za 2016. godinu .....	83
Slika 14: Tačkasti izvori u Sarajevu (crne tačke) i modelirano područje (crveni pravougaonik) .	86
Slika 15: Mreža puteva uključena u inventar emisija Sarajeva.....	87
Slika 16: Mreža puteva u Sarajevu.....	88
Slika 17: Takasti izvori u Banja Luci. Crvene tačke označavaju objekte za grijanje, a žute industrijske objekte .....	90
Slika 18: Procijenjeni saobraćajni tokovi (AADT) za Banju Luku. Crveni brojevi označavaju puteve za koje postoje podaci o broju saobraćaja.....	91
Slika 19: Emisije NOx iz saobraćaja za Banju Luku, rasterizirane na 500 m ćelija.....	92
Slika 20: Dijagram toka za geografski izračunatu potrošnju goriva .....	93
Slika 21: Korištenje grijanja stambenih objekata za Banju Luku. Imajte na umu da potrošnja energije u svakom poligону također ovisi o veličini poligona .....	94
Slika 22: Dijagram toka za proračun emisije .....	95
Slika 23: Emisije NOx iz grijanja stambenih objekata za Banju Luku.....	96
Slika 24: Poređenje modelirane i posmatrane temperature, brzine i smjera vjetra na stanici za praćenje kvaliteta zraka i vremena Butmir za 2018. godinu. ....	98
Slika 25: Dnevni prosjeci visine graničnog sloja (ZI) u metrima i brzine vjetra (WSPD) u m/s, izračunati MATCH modelom za tačku mreže na Ildizi, zapadno Sarajevo, 2018.....	101
Slika 26: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima $\text{NO}_2$ sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor 2), Transport (zeleni sektor7) i drugi sektori uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi). Dnevna opažanja $\text{NO}_2$ (crna linija) dolaze sa mesta mjerjenja u Ildži, Sarajevo, a podaci modela predstavljaju lokaciju mreže na istoj lokaciji. Ukupne simulirane koncentracije $\text{NO}_2$ predstavljene su crvenim dijagrameom. ....	103
Slika 27: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima $\text{SO}_2$ sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi). Dnevna opažanja $\text{SO}_2$	

(crna linija) dolaze sa mesta mjerena u Ilidži, Sarajevo, a podaci modela predstavljaju tačku mreže na istoj lokaciji. Ukupne simulirane koncentracije $SO_2$ su predstavljene crvenim dijagramom .....	105
Slika 28: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima $PM_{10}$ sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi). Dnevna opažanja $PM_{10}$ (crna linija) dolaze sa mesta mjerena u Ilidži u Sarajevu i podaci modela predstavljaju tačku mreže na istoj lokaciji. Ukupne simulirane koncentracije $PM_{10}$ predstavljene su crvenim dijagramom .....	107
Slika 29: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima $PM_{2,5}$ sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi). Dnevna opažanja $PM_{2,5}$ (crna linija) dolaze sa mesta mjerena u Ilidži u Sarajevu i podaci modela predstavljaju tačku mreže na istoj lokaciji. Ukupne simulirane koncentracije $PM_{2,5}$ predstavljene su crvenim dijagramom .....	108
Slika 30: Dnevni prosjeci visine graničnog sloja (ZI) u metrima i brzine vjetra (WSPD) u m/s, izračunati MATCH modelom za mrežnu tačku u centralnom dijelu Banje Luke, 2018. ....	109
Slika 31: Dnevni simulirani doprinosi sektora nivoima $NO_2$ sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi) za mrežnu tačku u centru Banja Luke . Ukupne simulirane koncentracije $NO_2$ predstavljene su crvenim dijagramom .....	110
Slika 32: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima $SO_2$ sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi) za tačku mreže u centru Banja Luke . Ukupne simulirane koncentracije $SO_2$ su predstavljene crvenim dijagramom.....	112
Slika 33: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima $PM_{10}$ sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostala stacionarna sagorijevanja (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveno drugo) za tačku mreže u centru Banje Luka. Ukupne simulirane koncentracije $PM_{10}$ predstavljene su crvenim dijagramom .....	113
Slika 34: Dnevni simulirani sektorski doprinosi $PM_{2,5}$ nivoa sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostala stacionarna sagorijevanja (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveno drugo) za tačku mreže u centru Banja Luke. Ukupne simulirane koncentracije $PM_{2,5}$ predstavljene su crvenim dijagramom .....	114
Slika 35: Grafikoni u Appendixu .....	126

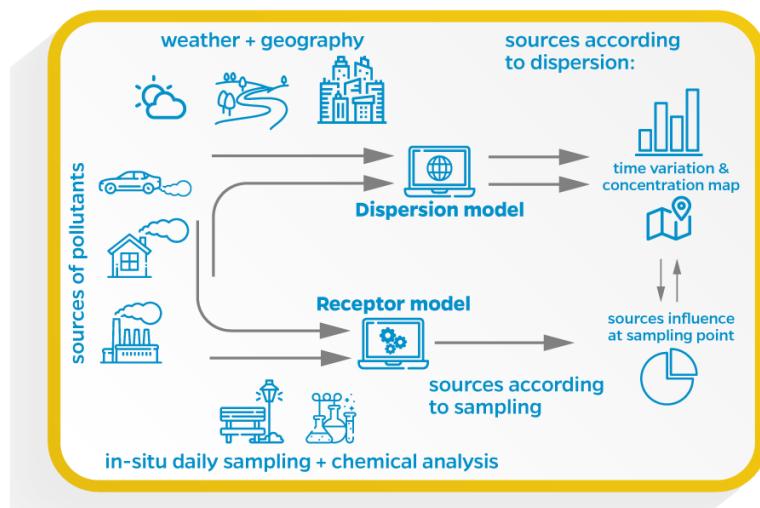
## IZVRŠNI SAŽETAK

Švedska agencija za zaštitu životne sredine (SwEPA) provela je studiju o raspodjeli izvora u Bosni i Hercegovini zajedno sa Švedskim meteorološkim i hidrološkim institutom (SMHI) i Institutom za javno zdravstvo (IPH) u Beogradu u sklopu projekta IMPAQ, koji je finansirala Švedska agencija za međunarodni razvoj (Sida). Ova studija je provedena tokom dvije godine (2020-2022) i uključivala je nekoliko metodoloških pristupa.

### Metodologija

Svrha studije o raspodjeli izvora je da se identifikuju izvori zagađenja zraka. Ova posebna studija raspodjele izvora provedena je korištenjem mjerjenja kvaliteta zraka i inventara podataka o emisijama. U studiji o raspodjeli izvora zasnovanoj na mjerenu, uzorci čestica (PM) se uzimaju iz ambijentalnog zraka i podvrgavaju se hemijskoj analizi. Zatim se izvodi kompjutersko modeliranje kako bi se čestice pripisale određenim izvorima emisije. Ova vrsta istraživanja sprovedena je u Sarajevu, Tuzli, Zenici, Banjoj Luci, Bijeljini i Brodu tokom zime 2020-2021. i ponovo u Sarajevu i Banjoj Luci tokom zime 2021-2022. Modeliranje receptora sa faktorizacijom pozitivne matrice korišteno je za određivanje raspodjele izvora.

Dodatna analiza raspodjele izvora provedena je za Sarajevo i Banjoj Luci koristeći podatke o emisijama. Ova studija je takođe posmatrala kako se zagađivači kreću unutar definisanih geografskih područja oko ova dva grada koristeći MATCH model.



Slika 1: Metodologije raspodjele izvora: model disperzije naspram modela receptora

## Rezultati

### Modeliranje receptora pozitivne faktorizacijske matrice

Rezultati zimske mjerne kampanje 2020-2021 pokazuju da se oko 25% zagađenja PM2.5 emituje iz sagorijevanja drva i peleta, koji se koriste za grijanje. Nadalje, 20% PM2.5 može se pripisati sagorijevanju fosilnih goriva uključujući sagorijevanje uglja i motore vozila. Udio pozadinskih ili transportnih aerosola velikog dometa predstavlja je više od 25% ukupnog PM2.5.



Rezultati su zatim dalje istraženi koristeći lokalne meteorološke podatke, što je u nekim slučajevima povećalo razumijevanje odakle i kada potiču različiti izvori zagađenja.

Izvor	Banja Luka	Bijeljina	Brod	Sarajevo	Tuzla	Zenica
Sekundarni sulfatni aerosoli	9%	18%	5%	16%	<b>23%*</b>	<b>21%</b>
Sekundarni nitratni aerosoli	<b>24%*</b>	8%	<b>24%</b>	14%	10%	14%
Sagorijevanje biomase	19%	<b>36%</b>	<b>44%*</b>	<b>27%</b>	<b>34%</b>	<b>54%*</b>
Sagorijevanje fosilnih goriva i saobraćaj		<b>36%*</b>		<b>23%</b>	20%	
Zemljinska prašina	23%	2%	6%	8%	13%	6%
Ostalo	<b>25%**</b>		21%***	12%		5%

Tabela 1: Raspodjela izvora 2020-2021 zasnovana na modeliranju receptora

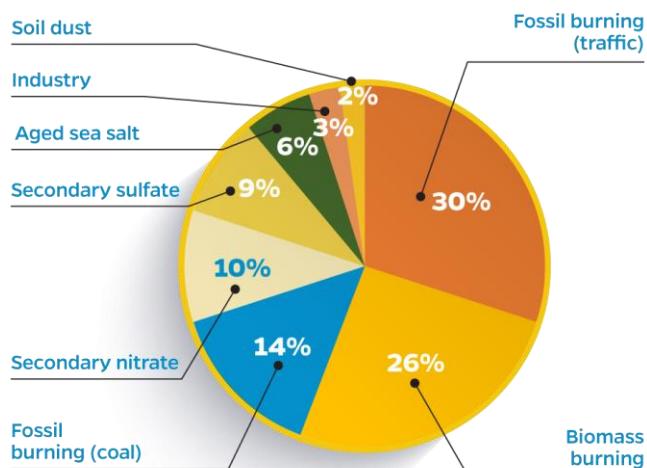
\*uključujući sagorijevanje uglja

\*\* 20% ovoga se objašnjava kroz izvor bogat kalijumom, a 5% industrijom

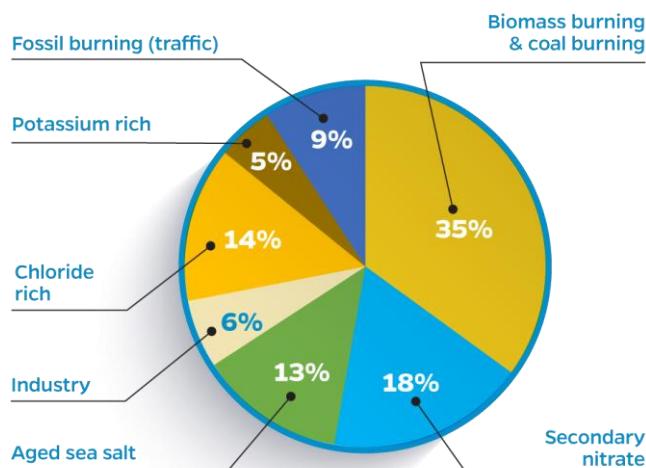
\*\*\*Primarni sulfat teškog ulja

Zimski krug modeliranja receptora za Sarajevo 2021-2022 uglavnom je potvrdio rezultate kruga mjerena 2020-2021 i pružio detaljnije informacije o saobraćaju i sagorijevanju iz domaćinstava. Međutim, nivo zagađenja česticama uzrokovanim izduvnim gasovima iz saobraćaja bio je veći u drugom krugu mjerena nego u prvom krugu mjerena. Za Banju Luku, drugi krug rezultata pokazao je veći nivo zagađenja česticama koje su rezultat nesagorenih izvora. Ovo nije u potpunosti objašnjeno i zahtijeva dalje istraživanje.

### Sarajevo



### Banja Luka



Izvor	Banja Luka	Sarajevo
Sagorijevanje fosilnih goriva (saobraćaj)	9%	30%
Sagorijevanje biomase	35%*	26%
Sagorijevanje fosilnih goriva (ugalj)	Vidi sagorijevanje biomase	14%
Sekundarni nitrati	18%	10%
Sekundarni sulfati		9%
Odležana morska sol	13%**	6%
Industrija	6%	3%
Zemljjišna prašina	Vidi odležanu morsku so	2%
Izvor bogat hloridom	14%	
Izvor bogat kalijumom	5%	

Tabela 2: Raspodjela izvora 2021-2022 zasnovana na modeliranju receptora

\*uključujući sagorijevanje uglja

\*\*uključujući zemljjišnu prašinu

Neke od razlika u rezultatima kampanje 2020-2021 u odnosu na kampanju 2021-2022 mogu se objasniti varijacijama u nivoima zagađivača zraka iz godine u godinu. Hemijska analiza koja je urađena na filterima u kampanji 2021-2022 bila je u stanju da tačnije razdvoji izvore od hemijske analize iz prve kampanje mjerenja, što je dovelo do nijansiranih rezultata.

### **MATCH model**

Analiza raspodjele izvora zasnovana na inventaru emisija sugerira da je sektor transporta dominirao nivoima NO<sub>2</sub>, dok je individualno grijanje dominiralo nivoima čestica. To je bilo očito i u Sarajevu i Banjoj Luci. Za SO<sub>2</sub>, grijanje domaćinstava je doprinijelo velikom dijelu zagađenja, ali veliki dio modeliranih koncentracija također potiče iz drugih sektora, uglavnom industrije. Što se tiče čestica, sektori otpada i poljoprivrede su također značajno doprinijeli ukupnim emisijama.

Sektor	NOx	SO2	PM10	PM2.5
Javni energetski sektor	639.7	396.7	12.2	6.6
Ostalo stacionarno sagorijevanje	326.3	617.1	1689.8	1601.5
Industrijsko sagorijevanje i procesi*	89.6	911.4	431.8	160.6
Ostaci*	0	0	83.7	9.6
Rastvarači*	0	0	0	0
Transporst	3458.1	2.2	1418.8	1163.4
Drugi mobilni izvori*	0	0	0	0
Otpad*	102.5	6.1	325.3	304.4
Poljoprivreda*	0	0	38.1	8.4

Tabela 3: Ukupne emisije (tone/godišnje) glavnih zagađivača zraka za domenu modela Sarajevo iz skupa lokalnih podataka o emisijama zajedno sa CAMS regionalnom bazom podataka o emisijama (\*).

Sektor	NOx	SO2	PM10	PM2.5
Javni energetski sektor	87.4	61.4	181.1	89.1
Ostalo stacionarno sagorijevanje	89.7	61.8	2371.8	1170.5
Industrijsko sagorijevanje i procesi*	8.1	49	76.4	70.4
Ostaci*	0	0	0	0
Rastvarači*	0	0	0	0
Transporst	760.3	1.5	181.1	78
Drugi mobilni izvori*	0	0	0	0
Otpad*	47.6	2.9	292.3	141.3
Poljoprivreda*	0.5	0.1	125.6	23.4

Tabela 4: Ukupne emisije (tone/godišnje) glavnih zagađivača zraka za domenu modela Banja Luka iz skupa lokalnih podataka o emisijama zajedno sa CAMS regionalnom bazom podataka o emisijama (\*)

## **Poređenje rezultata**

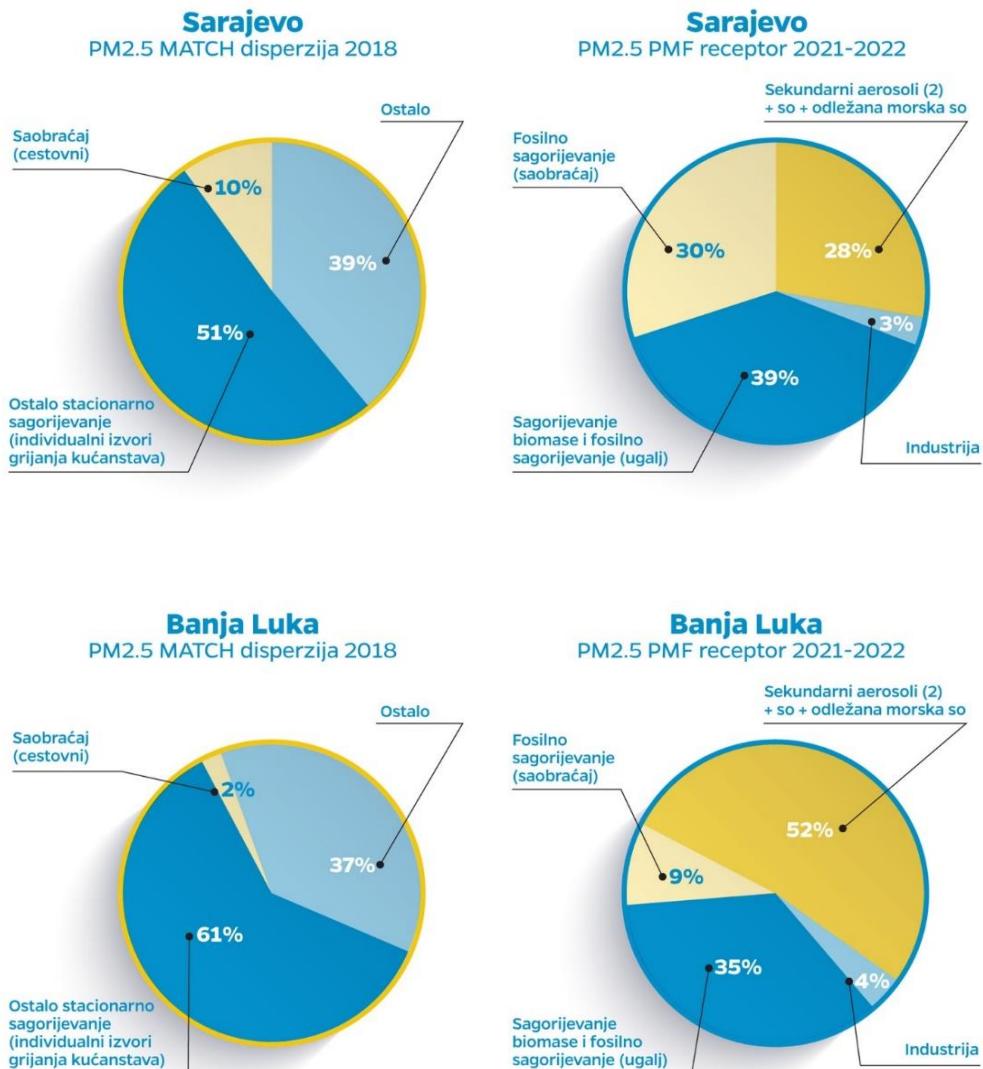
Korisno je analizirati raspodjelu izvora koristeći PM mjerena i inventare emisija kao način verifikacije i triangulacije rezultata odgovarajućih studija.

Podjela izvora kroz modeliranje PMF receptora je rekonstrukcija najvjerojatnijih tipova izvora koji utiču na kvalitet zraka koji se doživljava na mjestu uzorkovanja i u vrijeme kada su na toj lokaciji vršena mjerena. Rezultat je raspodjela vrste izvora i njihova vremenska varijacija tokom perioda mjerena.

Podjela izvora kroz MATCH modeliranje disperzije rezultat je rekonstrukcije disperzije i atmosferskih hemijskih reakcija zagađivača emitovanih iz izvora koji su prethodno popisani. Rezultat je mapa potencijalnog doprinosa nivoima zagađenja svake vrste popisanog izvora. Izvorna raspodjela je također prikazana kao vremenska serija za određenu lokaciju kroz modelirani period. Ova analiza pruža informacije o varijacijama izvornih doprinosa na dnevnoj bazi tokom cijele godine.

Za period od 16. novembra do 10. marta izvršeno je poređenje raspodjele obavljene kroz dvije različite metode na sljedećim lokacijama:

- Sarajevo, u dvorištu FHMZ na Bjelavama
- Banja Luka, pored stanice za praćenje kvaliteta zraka RHMZ Vrtić Kolibri (finansirana od strane IMPAQ projekta)



Slika 2: Poređenje disperzionog u odnosu na modeliranje receptora

Poređenje potvrđuje da je doprinos saobraćaja u MATCH modelu disperzije potcijenjen u poređenju sa rezultatima PMF modeliranja receptora. Ovo potcjenjivanje se dešava i u Sarajevu i u Banjoj Luci i dostiže faktor 3 za PM2.5 tokom zimskih mjeseci. To znači da je potrebno sastaviti bolje inventare emisija u saobraćaju u odnosu na protok saobraćaja i kvalitet voznog parka.

Za Sarajevo je procjena za saobraćaj potcijenjena čak i bez doprinosa dvije velike druge grupe izvora. Međutim, omjer za izvore "stacionarno sagorijevanje" i "ostalo i pozadinu" iz MATCH modela i ekvivalenta iz PMF modela je sličan za Sarajevo ( $51/39 \sim 39/28$ ). Ovo je pokazatelj

da je napor koji je u Sarajevu poduzet na inventarizaciji pojedinačnih izvora grijanja bio adekvatan.

Za Banju Luku isti omjeri nisu uporedivi. To je pokazatelj da nedostaju neki važni izvori u cjelokupnom razumijevanju emisije u tom gradu. U Banjoj Luci je u obje mjerne kampanje 2020-2021 i 2021-2022. uočen veliki panel izvora čestica koje ne sagorijevaju. Hemijski i vremenski potpisi emisija ovih teza sugeriraju da bi tip izvora mogao biti neobičan i možda izoliran. Stoga bi terensko istraživanje moglo pomoći da se bolje identifikuju izvori emisija i strategija smanjenja bi trebala biti izvodljiva ako se potvrди da je ovih izvora čestica koje ne sagorevaju samo nekoliko.

Većina emisija vezanih za industriju nedostaje u novopopisanim podacima o emisijama koji se koriste za modeliranje MATCH disperzije. Međutim, udio čestica koji se odnosi na industriju predstavlja samo 3-4%.

### **Sljedeći koraci**

Ova studija je pružila naučnu osnovu za kreiranje politike. Rezultati se mogu koristiti za određivanje fokusnih sektora za implementaciju politike i za određivanje kako bi specifične akcije mogle uticati na ukupne emisije i njihov uticaj na nivoje zagadženja zraka.

## **UVOD**

Sljedeći izvještaj je analiza dvogodišnje studije o raspodjeli izvora u Bosni i Hercegovini. Studija je ispitala koji su zagađivači u zraku, odakle dolaze i kako se kreću. Ovaj izvještaj finansirala je Švedska ambasada u Sarajevu i rađen je kao dio IMPAQ projekta Švedske agencije za zaštitu okoliša (SwEPA).

Svrha studije o raspodjeli izvora je da se identifikuju izvori zagađenja zraka. Ova posebna studija raspodjele izvora provedena je korištenjem mjerjenja kvaliteta zraka i podataka inventara emisija. Ovi različiti izvori informacija su zatim analizirani korištenjem različitih pristupa modeliranju. Ova sveobuhvatna forma analize omogućila je projektu da potvrdi i triangulira rezultate raspodjele izvora. Podaci inventara emisija također su korišteni za modeliranje načina tipičnog kretanja zagađivača unutar definisanih geografskih područja oko Banje Luke i Sarajeva u različito doba godine.

Ovaj izvještaj je podijeljen u dva dijela, prvi dio je studija raspodjele izvora na temelju mjerjenja, drugi dio je studija raspodjele izvora i modeliranja disperzije na temelju inventara emisija. Švedski meteorološki i hidrološki institut (SMHI) proveo je modeliranje za obje studije, koje su se temeljile na podacima dobivenim iz mjerjenja Instituta za javno zdravlje u Beogradu (IPH), i podacima o emisijama koje su prikupile općine, kantoni i konzultanti u Bosni i Hercegovini. Hercegovine.

## **PRVI DIO: REZULTAT RASPODJELE IZVORA IZ MODELIRANJA RECEPTORA PMF 5.0 NA HEMIJSKOJ ANALIZI DNEVNIH UZORAKA PM2.5 TOKOM ZIME 2020-2021 I 2021-2022 U BOSNI I HERCEGOVINI**

U šest gradova u Bosni i Hercegovini (Sarajevo, Tuzla, Zenica, Banja Luka, Bijeljina i Brod) ispitani su faktori koji doprinose finim česticama (PM2.5). Analiza je provedena kampanjom mjerjenja tokom zime 2020-2021, nakon čega je uslijedilo modeliranje receptora iz EPA-ovog modela pozitivne faktorizacije matrice (PMF). Isti tipovi mjerjenja sprovedeni su tokom zime 2021-2022 u Sarajevu i Banjoj Luci.

### **Pozadina**

Zagađenje ambijentalnog zraka je globalni zdravstveni problem i SZO procjenjuje da uzrokuje oko 7 miliona prijevremenih smrti svake godine. U nedavnom izvještaju su zaključili da je globalni zdravstveni rizik od zagađenja zraka jednako velik kao i drugi faktori poput nezdrave prehrane i pušenja duhana. SZO je postavila smjernice o pragovima čistog zraka i prema tim pragovima 99% svjetske populacije živi u područjima sa lošim kvalitetom zraka.

Jedan od mnogih zagađivača zraka su fine čestice (PM) koje su problematične jer utiču na kapacitet pluća i dovode do drugih negativnih zdravstvenih posljedica. PM se često dijeli na kategorije PM2.5 i PM10, koje mogu biti složene kombinacije mnogih izvora zagađenja, na primjer sagorijevanje, morska sol i izvori tla.

Bosna i Hercegovina (BiH), kao i mnoge druge zemlje, bore se da ublaže visoke koncentracije PM zagađenja u ambijentalnom zraku. Vjeruje se da grijanje domova objašnjava veliki dio PM2.5 jer mnoga domaćinstva koriste drvo ili ugalj kao izvor topline. Postoji izazov u opisivanju koliko tačno PM2.5 dolazi iz ovih izvora. Jedan od načina da se ispita ovaj problem je hemijska analiza uzorka PM2.5 kako bi se odredio njegov udio u različitim hemijskim vrstama. Mnoge vrste se zapravo mogu povezati s različitim izvorima emisije, ali je zadatak prilično složen. Modeliranje receptora iz EPA-ine pozitivne faktorizacije matrice (PMF) može se koristiti za razlikovanje između različitih izvora emisije.

U ovoj studiji svakodnevno je prikupljanje čestica pomoću filtera za PM2,5 rađeno u šest gradova u BiH tokom tri zimska mjeseca (novembar, decembar i januar). Naknadne gravimetrijske i hemijske analize su sprovedene na svakom filteru za mnoge specifične elemente, molekule i jone. Ovi podaci su se tada mogli koristiti kao ulaz za PMF model. Iz rezultata modela učinjeni su pokušaji da se identifikuju podijeljeni izvori emisije.

U cilju boljeg razlikovanja izvora u dva veća i složenija grada Sarajeva i Banja Luka, tokom zime 2021-2022. godine sprovedena je druga kampanja. Neki elementi metodologije su promijenjeni kako bi se poboljšali i rezultati.

## Metoda

### Kampanje uzorkovanja 2020-2021

Uzorkovanje PM<sub>2.5</sub> obavljeno je na šest lokacija u Bosni i Hercegovini za tri zimska mjeseca od novembra 2020. do januara 2021. godine. Položaj svake lokacije može se vidjeti na slici 3, a dodatne informacije nalaze se u tabeli 1. Sve se nalaze u gradovima. Lokacije u Sarajevu, Zenici, Tuzli, Bijeljini i Brodu su klasifikovane kao urbana pozadina, dok je lokacija u Banjoj Luci klasifikovana je kao gradski saobraćaj.



*Slika 3: Mjesta uzorkovanja u Bosni i Hercegovini tokom zime 2020.-2021.*

Za uzorkovanje su korišteni instrumenti za uzorkovanje niske zapremine, Sven Leckel SEQ47/50-RV, u skladu sa standardnom referentnom metodom SRPS EN12341:2015. Održavanje, montažu i deinstalaciju instrumenata za uzimanje uzoraka vršio je ovlašteni distributer Sven Leckel za Srbiju.



Slika 4: Sven Leckel SEQ47/50-RV instrument za uzimanje uzoraka i transportna kutija

Whatman QM-A kvarcni filteri od 47mm su korišteni za uzimanje uzoraka i prikupljana su 92 dnevna uzorka tokom cijelog perioda mjerena.

Svaki instrument za prikupljanje uzoraka je bio opremljen s dva seta spremnika filtera kako bi se mogli puniti novim setom čistih filtera u kontrolisanom laboratorijskom okruženju. Na lokaciji gdje su bili uzimani, uzorci su pripremani i dopunjavani u razmaku od 14 dana od strane istraživačkog tima Instituta za javno zdravstvo iz Beograda tokom trodnevnog terenskog rada. Prilikom svakog dopunjavanja instrumenata, najmanje jedan filter se nije koristio kao uzorak, već je ostavljan u spremniku kako bi služio kao slijepa proba. Iz tog razloga ponovno punjenje je uzrokovalo prekid u procesu uzimanja uzoraka, te je po jedan dnevni uzorak nedostajao pri svakoj seriji mjerena.

Postavke koje su planirane tokom terenskih izlazaka su bile:

- Zamjena spremnika filtera instrumenta za uzimanje uzoraka vršena je u laboratoriji. Tokom transporta spremnici su bili zaštićeni i stavljeni u izolovane posude da bi se izbjegla vanjska kontaminacija ili pretjerano zagrijavanje.
- Zamjena udarne ploče očišćenom i prethodno podmazanom pločom iz laboratorija.
- Zamjena mlaznice čistom.
- Provjera protoka uzorkivača pomoću redovito kalibriranog ORIWLOW-referentnog mjerača protoka za uzorkivače i provjera zaptivenosti sistema za uzimanje uzoraka.

U laboratoriji su filteri korišteni za uzorkovanje zatim pohranjivani na odgovarajućoj temperaturi od oko 4°C tako da je gubitak nestabilnih i polu-nestabilnih materijala bio minimiziran tokom perioda skladištenja.

	Sarajevo Bjelave Meteorološka lokacija	Tuzla Meteorološka lokacija	Zenica Brist Meteorološka lokacija	Banja Luka Lazarevo Meteorološka lokacija	Bijeljina Meteorološka lokacija	Brod refinery Meteorološka lokacija
Operator stanice	Federalni hidrometeorološki zavod (FHMZ)	FHMZ	FHMZ	Republički hidrometeorološki zavod (RHMZ)	RHMZ	Optima Rafinerija nafte
Geo. širina i dužina	43.867743, 18.422950	44.542060, 18.685136	44.202056, 17.900428	44.793801, 17.205743	44.753659, 19.192754	45.135325, 17.982985
Tip	Urbana sredina	Urbana sredina	Urbana sredina	Gradska sredina	Urbana sredina	Urbana sredina
Pogled na stanicu sa uzorcima						
Period uzimanja uzoraka	30.10.2020. do 03.02.2021.	29.10.2020. do 02.02.2021.	30.10.2020. do 03.02.2021.	31.10.2020. do 04.02.2021.	29.10.2020. do 02.02.2021.	31.10.2020. do 04.02.2021.
Dani koji nedostaju (dani ponovnog punjenja uzorkivača filterima)	17.11.2020. 03.12.2020. 22.12.2020. 11.01.2021. 28.01.2021.	16.11.2020. 02.12.2020. 21.12.2020. 10.01.2021. 27.01.2021.	17.11.2020. 23.12.2020. 22.12.2020. 11.01.2021. 28.01.2021.	18.11.2020. 04.12.2020. 23.12.2020. 12.01.2021. 29.01.2021.	16.11.2020. 02.12.2020. 21.12.2020. 10.01.2021. 27.01.2021.	16.11.2020. 04.12.2020. 23.12.2020. 10.01.2021. 29.01.2021.

Tabela 5. Karakteristike mjesta na kojima su uzimani uzorci

Potrebno je navesti da su sve aktivnosti povezane sa uzimanjem uzoraka sprovedene u vanrednoj situaciji za vrijeme pandemije COVID-19 virusa, uz konstantne promjene epidemioloških mjera na snazi u Srbiji i Bosni i Hercegovini, uključujući oštrome mјere pri prelasku državnih granica (npr. PCR testiranje pri ulasku u Srbiju). Pored gore navedenih, sve aktivnosti vezane za prikupljanje uzoraka su sprovedene u toku zimskog perioda sa značajnom količinom snježnih padavina.

## Kampanje uzorkovanja 2021-2022

Dodatna uzorkovanja PM2.5 vršena su samo na dvije lokacije za uzorkovanje, Sarajevu i Banjoj Luci, tokom skoro četiri pune zimske mjeseca od novembra 2021. do marta 2022.

godine. Položaj lokacije u Sarajevu je bio potpuno isti. Pozicija lokacije u Banjoj Luci pomjerena je 400 metara sjeverno od mjernog mjeseta 2020-2021, pored novoinstalirane mjerne stanice u blizini škole Vrtić Kolibri. Razlog za ovaj potez je da je direktna blizina važnih emitera – parkinga za autobuse, benzinske pumpe i kotla na pelete – možda uticala na reprezentativnost uzorkovanja i dala rezultate koje je bilo teško interpretirati.

Kako bi se smanjila granica detekcije metode i dobio veći raspon upotrebljivih vrsta u modelu, odlučeno je da se uzorkuje istovremeno sa dva uzorkivača male zapremine na obje lokacije. Ta metoda uzorkovanja omogućila je provođenje analize sa većom površinom filtera, a time i sa više tvari za mjerjenje.

### **Gravimetrijska analiza**

Gravimetrijska analiza ukupne masene koncentracije čestica PM2.5 provedena je standardnom referentnom metodom SRPS EN 12341:2015, identičnom EN 12341:2014 koja garantuje da su ispunjeni svi zahtjevi za izvedbu metode i kontrolu kvalitete.

Postupci kondicioniranja filtera, uzorkovanja i vaganja uključuju:

- Kondicioniranje filtera i vaganje prije uzorkovanja.
- Postupak uzimanja uzoraka.
- Kondicioniranje filtera i vaganje nakon uzorkovanja.
- Procedure u sobi za vaganje.
- Pripremu slijepih proba filtera za kontrolu kvaliteta.

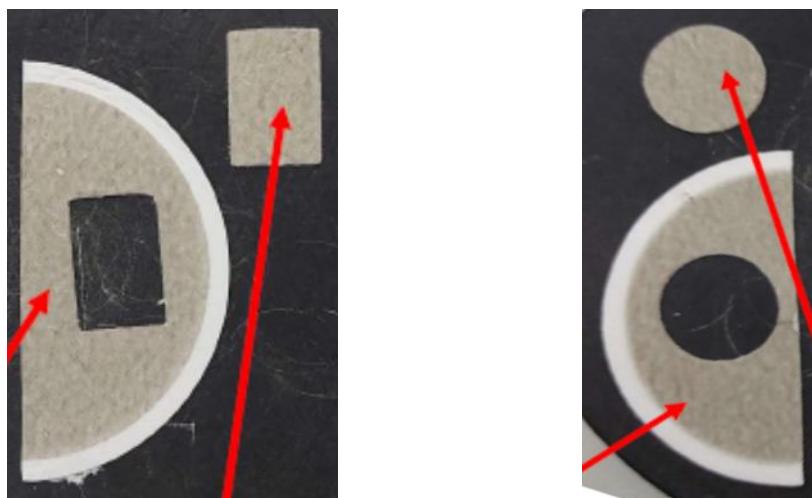
Proračun mjerne nesigurnosti za gravimetrijsku analizu ukupne masene koncentracije izračunat je uzimajući u obzir sve pojedinačne izvore nesigurnosti u skladu s SRPS EN 12341:2015.

Rezultat za proširenu nesigurnost za gravimetrijsku analizu bio je:  $U=(0,5+0,07*x)$ , pri čemu je  $x$  izračunata masena koncentracija PM2.5. Granica detekcije metode bila je  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Što se tiče mjerne kampanje 2021-2022, gravimetrijska analiza je provedena na oba filtera primjenom iste metodologije kao i prethodne godine.

### **Raspodjela filtera prije daljnje analize**

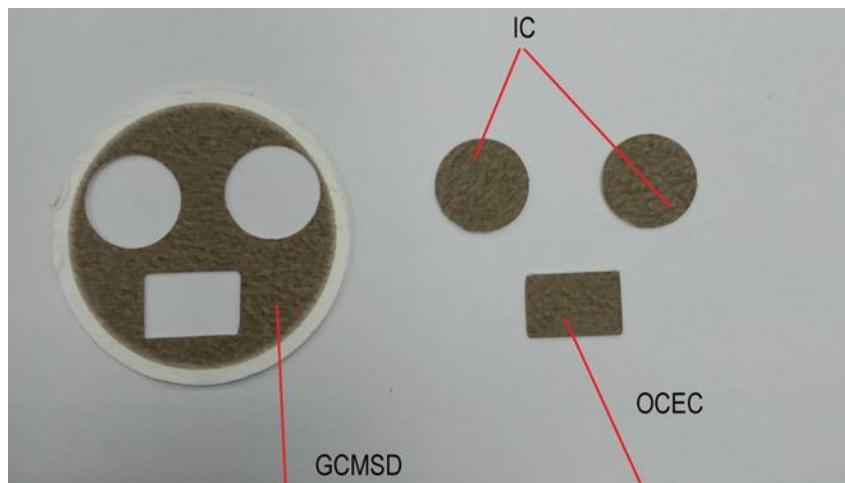
Nakon dovršene gravimetrijske analize ukupne masene koncentracije, izvršena je daljnja hemijska i elementarna analiza. Svaki filter je podijeljen na pola. Iz jedne polovice filtera ekstrahiran je isječak za analizu organskog ugljika (OC) i elementarnog ugljika (EC), a ostatak filtera je korišten za elementarnu analizu. Iz druge polovice filtera je izvađen je isječak za jonsku analizu, a ostatak filtera korišten je za analizu bezvodnog šećera.



Slika 5: Rezanje filtera za analizu; 1/2 filter za elementarnu + isječak za OC/EC (lijevo), i 1/2 za bilo koji šećer + isječak za jonsku hromatografiju (desno)

Tokom kampanje uzorkovanja 2021-2022, jedan od dva dnevna filtera korišten je za elementarnu analizu kako bi se dobilo više materijala za analizu i dobila niža granica detekcije metode (MDL).

Drugi dnevni filter je podijeljen kako bi se dobila dva isječka za jonsku hromatografiju, a time i niži MDL, jedan pravougaoni isječak za OC/EC analizu i preostali za analizu bezvodnog šećera.



Slika 6: Kampanja 2021-2022 - presjek filtera za analizu; preostali filter za elementarni bezvodni šećer + 2 isječka za jonsku hromatografiju + pravougaoni isječak za OC/EC

## Elementarna analiza izvršena 2020-2021

Elementarna analiza As, Cd, Cr, Mn, Ni, Pb temelji se na standardnoj referentnoj metodi SRPS EN 14902: 2008/AC:2013 Kvalitet okolnog zraka - Standardna metoda za mjerjenje Pb, Cd, As i Ni u PM10 frakcija suspendiranih čestica za koju je akreditiran Institut za javno zdravstvo u Beogradu. Metoda analize uključivala je:

- Mikrovalnu digestiju pomoću opreme Anton Paar.
- ICP-MS analizu korištenjem Agilent ICP-MS, serije 7500, priključak za mjerjenje: As, Cd, Cr, Mn, Ni, Pb.
- ICP-OES analizu korištenjem Agilent ICP-OES modela 5110SVDV, priključak za mjerjenje: Al, Co, Cu, Fe, V, Zn.
- Kontrole kvalitet.

Mjerne nesigurnosti su izračunate u odnosu na slučajnu nesigurnost, nesigurnost zapremine uzorkovanja, sistemsku nesigurnost procesa analize. Rezultati za proširenu nesigurnost za elementarnu analizu prikazani su u Tabela 6:

Element	U	Element	U	Element	U
As	0,00002+0,075*x	Cd	0,00002+0,071*x	Cr	0,00001+0,094*x
Mn	0,112*x	Ni	0,00003+0,117*x	Pb	0,00005+0,082*x
Al	0,257*x	Co	0,12*x	Cu	0,21*x
Fe	0,155*x	V	0,116*x	Zn	0,116*x

Tabela 6: Kampanja 2020-2021 - Proširene nesigurnosti za elementarnu analizu, pri čemu je x izračunata masena koncentracija svakog elementa

Granice detekcije metoda u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  prikazane su u Tabela 7:

Element	MDL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Element	MDL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Element	MDL( $\mu\text{g}/\text{m}$ )
As	0,001	Cd	0,0001	Cr	0,005
Mn	0,0024	Ni	0,003	Pb	0,005
Al	23,7	Co	23,7	Cu	23,7
Fe	23,7	V	11,8	Zn	2,4

Tabela 7: Kampanja 2020-2021 - Granice detekcije metoda za elementarnu analizu

## Elementarna analiza provedena 2021-2022

Sprovedene su dvije iste vrste elementarne analize, ali na jednom cijelom filteru umjesto manje od polovine i sa preferencijom za ICP-MS analizu mnogo precizniju od ICP-OES.

Međutim, dvije vrste nije bilo moguće analizirati korištenjem ICP-MS zbog njihovog visokog nivoa u pozadini koji utiče na kalibraciju. Al, Fe i Zn su stoga analizirani korištenjem ICP-OES uz poboljšanje korištenja veće površine filtera kako bi se postigla donja granica detekcije, a možda i dovoljno za efikasno mjerjenje ovih koncentracija dovoljno često za PMF modeliranje.

Metod analize je uključivao:

- ICP-MS analizu korištenjem Agilent ICP-MS, serije 7500, priključak za mjerjenje za: As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V.
- ICP-OES analizu korištenjem Agilent ICP-OES modela 5110SVDV, priključak za mjerjenje: Al, Fe, Zn.

Mjerne nesigurnosti su izračunate kao u prethodnoj kampanji. Rezultati za proširenu nesigurnost za elementarnu analizu prikazani su u Tabela 8.

Element	U	Element	U	Element	U
As	0,002+0,075*x	Cd	0,00002+0,071*x	Cr	0,001+0,094*x
Mn	0,112*x	Ni	0,003+0,117*x	Pb	0,005+0,082*x
Al	0,257*x	Co	0,12*x	Cu	0,21*x
Fe	0,155*x	V	0,116*x	Zn	0,116*x

Tabela 8: Kampanja 2021-2022 - proširene nesigurnosti za elementarnu analizu, pri čemu je x izračunata masena koncentracija svakog elementa

Granice detekcije metoda u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  prikazane su u Tabela 9:

Element	MDL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Element	MDL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Element	MDL( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
As	0,0005	Cd	0,00005	Cr	0,0015
Mn	0,0005	Ni	0,0005	Pb	0,0005
Al	6,7	Co	0,0005	Cu	0,0005
Fe	19,2	V	0,0005	Zn	16,2

Tabela 9: Kampanja 2021-2022- Granice detekcije metoda za elementarnu analizu

## Analiza jonskom hromatografijom

Jonska hromatografija:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  izvedena je internom metodom, koja je zasnovana na standardnoj referentnoj metodi SRPS EN 16913:2017 i akreditovana na Institutu za javno zdravstvo u Beogradu.

Metoda analize uključivala je:

- Jonsku hromatografiju pomoću Methroma, model IC 930 Flex.
- Kontrole kvaliteta.

Nesigurnosti su izračunate uzimajući u obzir nesigurnost zapremine uzorkovanja, izračunatu ponovljivost na temelju matričnog obogaćenog uzorka, kalibraciju IC opreme, referentni materijal na dnevnom nivou mjerena. Rezultati za proširenu nesigurnost za jonsku hromatografiju prikazani su u Tabela 10:

Jon	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$
U	$0,08*x$	$0,08*x$	$0,13*x$	$0,08*x$	$0,06*x$	$0,073*x$	$0,07*x$	$0,15*x$

Tabela 10: Proširene nesigurnosti za analizu jonske hromatografije, pri čemu je  $x$  izračunata masena koncentracija svakog jona

Granice detekcije metoda u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  prikazane su u Tabela 11:

Jon	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$
MDL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,8	0,8	0,08	0,8	0,8	0,4	0,8	3,1

Tabela 11: Kampanja 2020-2021- Granica detekcije metoda za jonsku hromatografiju

Što se tiče mjerne kampanje 2021-2022, analiza je provedena sa dvostruko više filterskih materijala (dva isječka umjesto jednog) i smanjena je granica detekcije metode kao ista za većinu mjerениh vrsta.

Granice detekcije metoda u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  prikazane su u Tabela 12:

Jon	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$
MDL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0,4	0,4	0,04	0,4	0,04	0,4	0,4	1,6

Tabela 12: Kampanja 2021-2022 - Granice detekcije metoda za jonsku hromatografiju

## **Analiza organskih markera: levoglukozana, manozana i galaktozana**

Analiza organskih markera levoglukozana, manozana i galaktozana provedena je metodom koja se temelji na standardnoj metodi VDI 2444, Mjerenja levoglukozana u ambijentu, Hromatografska metoda, mart 2020.

Metoda analize je uključivala:

- Ultrazvučnu ekstrakciju.
- Derivatizaciju i GCMS kvantifikaciju, korištenjem uređaja Agilent GCMS – single quad 5975T.
- Kontrole kvaliteta.

Kontrola kvaliteta provedena je prema normi VDI 2444 i kombinovana s kontrolom kvaliteta iz standardne referentne metode SRPS EN 15549:2010, Kvalitet zraka — Standardna metoda za mjerjenje koncentracije benzo[a]pirena u ambijentalnom zraku.

Važno je naglasiti da je nadzornik Zavoda za javno zdravstvo iz Beograda, član CEN radne grupe CEN/TC 264/WG 21 za razvoj standardne metode: Ambijentalni zrak – Određivanje koncentracije levoglukozana – Hromatografska metoda, na poziv JRC Ispra, AQUILA grupa.

Kako bi se poboljšao kvalitet dobijenih podataka za organske markere, IZJZ je sudjelovao u međulaboratorijskoj usporednoj studiji levoglukozan u spomenutoj radnoj skupini, koja će biti završni korak prije podnošenja zahtjeva za akreditaciju metode.

Nesigurnosti su izračunate uzimajući u obzir nesigurnost zapremine uzorkovanja, izračunatu ponovljivost na temelju uzorka matricea, masu uzorkovanog organskih markera (učinkovitost i stabilnost uzorkovanja, selektivnost), masu organskog markera u slijepoj probi.

Rezultat za proširenu mjernu nesigurnost, pri čemu je  $x$  izračunata masena koncentracija odgovarajućeg ugljikovodika, bio je:

- $U=0,1448*x$  za Levoglukozan,
- $U=0,162*x$  za Manozan,
- $U=0,1448*x$  za Galaktozan,

Granica detekcije vezana za ove metode bila je:

- $0,001 \mu\text{g}/\text{m}^3$  za Levoglukozan
- $0,0009 \mu\text{g}/\text{m}^3$  za Manozan
- $0,0009 \mu\text{g}/\text{m}^3$  za Galaktozan

## **Analiza organskih markera OC i EC**

EC (elementarni ugljik) je dio čistog ugljika koji se obično emituje iz procesa izgaranja.

OC (organski ugljik) je frakcija ugljika pomiješana s organskim komponentama i ona koja se emituje ili iz procesa sagorijevanja, ili kao rezultat atmosferske oksidacije i/ili procesa kondenzacije.

Analiza organskih markera OC i EC izvršena je internom metodom zasnovanoj na standardnoj referentnoj metodi SRPS EN 16909:2017 korištenjem toplinskog optičkog protokola EUSAAR 2 kako je navedeno u standardnoj referentnoj metodi SRPS EN 16909 Ambijentalni zrak — Mjerenje elementarnog ugljika (EC) i organskog ugljika (OC) nataloženog na filterima, za koji je akreditiran Zavod za javno zdravlje Beograd. Interna metoda gotovo je ista kao standardna referentna metoda, ali je postavljena prije nego što je standardna metoda objavljena u Srbiji. IPH je trenutno u procesu ažuriranja akreditacije. Laboratorijske vježbe međusobnog uspoređivanja ipak su pokazale vrlo dobre rezultate metode.

Metoda analize uključivala je:

- Mjerenje na uređaju Lab OC-EC Aerosol Analyzer, Sunset Laboratory Inc.
- Kontrole kvaliteta.

Nesigurnosti su izračunate u odnosu na nesigurnost zapremine uzorkovanja, površine termografskog pika za relevantnu frakciju ugljika (OC ili EC) izmjerena na termogramu poduzorka napunjenog filtera, površina vrha za kalibracijski plin izmjerena na termogramu poduzorka napunjenog filtera kao i na termogramu standarda za vanjsku kalibraciju analiziran je volumen vanjske kalibracijske standardne otopine.

Što se tiče mjerne kampanje 2020-2021, rezultat za proširenu nesigurnost, pri čemu je x izračunata masena koncentracija odgovarajuće frakcije ugljika, bio je:

- $U=(0,5+0,1*x)$  za OC,
- $U=(0,3+0,11*x)$  za EC.

Granice detekcije vezane za ovu metodu su bile:

- $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  za OC
- $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  za EC

U cilju poboljšanja kvaliteta dobijenih podataka za organske markere, IPH je 2021. godine učestvovao u međulaboratorijskom poređenju OC i EC s vrlo dobrim rezultatima. Nakon međulaboratorijskog poređenja, mjerenje dobija nižu granicu detekcije metode godinu dana kasnije.

Što se tiče mjerne kampanje 2021-2022, rezultat za proširenu nesigurnost, pri čemu je x izračunata masena koncentracija dotične frakcije ugljika, je prema tome:

- $U=(0,05+0,1*x)$  za OC,
- $U=(0,1+0,11*x)$  za EC.

Granice detekcije vezane za ovu metodu su bile:

- 0,04 µg/m<sup>3</sup> za OC
- 0,33µg/m<sup>3</sup> za EC

### **Analitički rezultati**

Tabela 13 prikazuje prosječnu koncentraciju u µg/m<sup>3</sup> i odgovarajuću standardnu devijaciju (SD) za sve mjerene vrste.

Ovisno o odabranoj analitičkoj metodi, više jedinjenja nije bilo moguće izmjeriti iznad granice detekcije (ADL) dovoljan broj puta da bi bile relevantne za PMF model niti za izračun prosječne koncentracije. Ove su vrste identificirane u

Tabela 13 kao:

- Znak minus (-) kada su svi podaci o koncentraciji bili ispod granice detekcije metode (MDL),
- Znak plus (+) kada je broj uzoraka ADL bio 29% ili manji.

Što se tiče Elementarne analize, većina nivoa koncentracija bila je ispod MDL-a kada je korištena ICP-OES metoda i stoga ovi rezultati nisu mogli biti uključeni u ovo istraživanje.

Osim toga, Zn (jedini element koji je bio dovoljno zastupljen kada je korištena ICP-OES metoda) pokazao je neuobičajeno visok nivo. Prosječni nivoi Zn s različitim lokacija bili su 200 do 700 puta viši od onih nedavno izmjerenih u regiji u sličnim urbanim područjima. Ovako visok nivo zajedno s drugim slabim rezultatima dovodi do sumnje na kontaminaciju. Iz tih razloga nijedan od rezultata dobivenih iz ICP-OES metode ovdje nije korišten.

Što se tiče jonske hromatografije, brojni rezultati dobijeni ispod granice detekcije metode su ukazali na neadekvatnost te analitičke metode za uzorkovanja malih zapremina PM2.5. Na+ i Cl- bili su među ionima koji nisu detektovani a važni su tragovi morske soli, koja predstavlja obično mali, ali značajan dio PM2.5.

Što se tiče bezvodnih šećera s druge strane, analiza prvobitno ograničena na levoglukozan uspješno je proširena kako bi se izmjerili i manozan i galaktozan. Svi rezultati za bezvodne šećere pokazali su vrijednosti iznad MDL-a.

	Sarajevo		Tuzla		Zenica		Banja Luka		Bijeljina		Brod	
	Prosjek (µg/m <sup>3</sup> )	SD										
Al	-		-		-		-		-		-	
As	0,00699	0,00563	0,00686	0,00387	0,02257	0,01284	0,00211	0,00077	0,01283	0,00749	0,00686	0,00387
Cd	0,00085	0,00072	0,00044	0,00030	0,00108	0,00074	0,00061	0,00025	0,00040	0,00022	0,00044	0,00030
Co	-		-		-		-		-		-	
Cr	-		+		+		+		+		+	

	Sarajevo		Tuzla		Zenica		Banja Luka		Bijeljina		Brod	
Cu	-		-		-		+		-		-	
Fe	-		-		-		-		-		-	
Mn	0,00453	0,00247	0,00375	0,00183	0,03610	0,03244	0,01133	0,01224	0,00291	0,00027	0,00375	0,00183
Ni	+		+		+		+		+		+	
Pb	0,01453	0,01026	0,00960	0,00478	0,02334	0,01180	0,00929	0,00340	0,00812	0,00330	0,00960	0,00478
V	-		-		-		+		-		-	
Zn	*11,35647	8,11133	*14,72071	7,96330	*9,80347	5,13138	*7,45335	3,77896	*13,68638	7,39706	*3,83592	1,10229
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	6,72088	5,66253	8,75496	6,37894	12,97391	7,09257	6,52068	3,35438	7,18864	3,77389	5,18687	4,08349
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4,85086	4,07375	3,46188	2,10774	2,89716	1,57844	4,36488	2,25072	4,28666	2,32440	3,94316	2,51337
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	3,12683	3,04969	3,42089	2,76581	4,32165	2,83087	2,24009	1,41273	3,36945	1,99995	2,52341	1,77741
Cl	+		+		+		+		+		+	
Na <sup>+</sup>	+		+		+		+		+		+	
Mg <sup>2+</sup>	-		-		-		-		-		-	
K <sup>+</sup>	2,06985	1,45119	1,22536	0,42793	1,74805	0,79234	2,49399	1,62470	1,28594	0,48228	1,32356	0,57653
Ca <sup>2+</sup>	-		-		-		-		+		-	
OC	16,56153	15,69400	16,98529	9,32303	20,45732	10,77313	18,84537	8,76522	15,98242	8,21045	10,50078	6,36503
EC	2,58778	1,27603	2,11548	1,06134	2,84121	0,99552	2,78565	1,00173	1,83905	0,68836	1,32261	0,81706
Levoglukozan	1,30186	0,95600	0,98490	0,53000	1,64989	0,87665	1,62815	0,80455	1,49462	0,83845	1,52928	1,05892
Manozan	0,25671	0,21383	0,16144	0,09212	0,31444	0,15573	0,31444	0,15573	0,19356	0,10744	0,17801	0,14014
Galaktozan	0,09554	0,08524	0,06257	0,03687	0,11429	0,06338	0,11429	0,06338	0,09395	0,05295	0,07711	0,06046
PM 2.5	60,56475	53,72316	60,76448	32,20991	75,99298	36,70262	73,01956	37,40793	61,72345	26,31241	41,74085	17,57572

*Tabela 13: Kampanja 2020-2021 - Prosječne koncentracije i standardne devijacije (SD) PM 2.5 i hemijskih sastojaka*

\*Vrste isključene zbog precjenjivanja uslijed metode mjerena.

Što se tiče kampanje 2021-2022, tri vrste mjerene ICP-OES metodom (Al, Fe i Zn) bile su gotovo uvijek ispod MDL i ovi rezultati nisu mogli biti uključeni u ovo istraživanje. Važno je napomenuti da su ove tri vrste vrlo česte u svim okruženjima, uključujući laboratorije i stoga ih je vrlo teško izmjeriti na potrebnom niskom nivou detekcije.

Ni Co nije detektovan uprkos upotrebi ICP-MS metode i vjerovatno zbog samog nivoa Co u PM 2.5. Stoga, Co, koji je element praćenja drumskega saobraćaja, nije mogao biti korišten u ovoj istrazi.

	Sarajevo		Banja Luka	
	Prosjek ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SD	Prosjek ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SD
Al	+		-	
As	0,00343	0,00291	0,0012	0,00061
Cd	0,00049	0,00043	0,00048	0,00025
Co	-		+	
Cr	0,00252	0,00124	0,00578	0,00772
Cu	0,00459	0,006	0,00826	0,00735
Fe	-		+	
Mn	0,00264	0,00198	0,0087	0,00827
Ni	0,00274	0,00649	0,00366	0,00516
Pb	0,00946	0,00759	0,00837	0,00464
V	0,00141	0,00099	0,00141	0,00101
Zn	+		-	
$\text{SO}_4^{2-}$	5,6919	4,1963	4,76817	2,66704
$\text{NO}_3^-$	4,83253	3,31816	4,81249	2,43852
$\text{NH}_4^+$	2,17844	2,49869	0,94866	0,95079
$\text{Cl}^-$	0,83526	0,49588	2,44878	2,48198
$\text{Na}^+$	0,58568	0,2104	0,64703	0,27637
$\text{Mg}^{2+}$	+		0,74243	0,53759
$\text{K}^+$	1,96936	1,82231	1,62602	1,3644
$\text{Ca}^{2+}$	2,54301	0,68859	7,71129	4,23865
OC	20,5448	16,4091	36,4499	18,5935
EC	3,84588	1,9912	5,91295	2,37683
Levoglukozan	1,81023	1,3573	2,82139	1,33991
Manozan	0,22021	0,18549	0,2838	0,14972
Galaktozan	0,09815	0,09007	0,13711	0,07412
PM 2.5	53,5125	41,2993	86,3229	38,7478

Tabela 14: Kampanja 2021-2022 - Prosječne koncentracije i standardne devijacije (SD) PM 2.5 i hemijskih sastojaka

### Analiza ukupne mase

Među izmjerenim vrstama, OC je najzastupljeniji i objašnjava veliki dio cjelokupnog PM2.5. Omjer između prosječne OC i prosječne EC (Tabela 15) je bio sve vrijeme visok, od 6:1 za dva

najveća grada Sarajevo i Banja Luku do preko 8:1 za manje gradove. Saobraćaj, koji je najintenzivniji u velikim gradovima, ujednačava ovaj omjer. Na isti način, sagorijevanje uglja i mrkog uglja koje emituju više EC nego OC također imaju tendenciju izjednačavanja ovog omjera. Moguće je da je izgaranje ovako kaloričnog krutog goriva, kojim je lakše rukovati i skladištiti ga od drveta, češće u najvećim gradovima. Osim toga, lož ulje za grijanje je prilično uobičajeno ovisno o gradovima, a prirodni plin se koristi i u Sarajevu.

Masa OC je pokazala vrijednosti u visokoj korelaciji s masom PM 2.5, osim za Banja Luku. Ovo posljednje isključenje ukazuje na to da je važan izvor čestica koje ne potiču od sagorijevanja, utjecao na rezultate u Banjoj Luci. Nadalje, važno je napomenuti da je postotak prosječnog OC u odnosu na masu PM 2.5 (Tabela 13) prilično konstantan između 25 i 27% za sve gradove, uključujući i Banju Luku. To znači da je neslaganje određeno u Banjoj Luci više povezano s raskorakom između vremena registrovanja OC i PM 2.5 pikova nego s ukupnim iznosom OC. Drugim riječima, postoji značajan broj pikova PM2.5 koji su nepovezani s pikovima OC. Slična anomalija je na istoj lokaciji uočena 2015. godine (Almeida, 2020.).

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
Populacija	642 000	80 000	75 000	250 000	50 000	71000 – uključujući Slavonski Brod
Odnos OC / EC	6,4	8,1	7,3	6,7	8,9	8,1
Korelacija OC / PM 2.5	0,99	0,94	0,98	0,25	0,88	0,90
Korelacija EC / PM 2.5	0,80	0,76	0,81	0,13	0,86	0,68
$\Sigma$ vrsta[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	37,3	37,0	46,8	38,8	35,5	26,2
% mase objašnjeno	62%	61%	62%	53%	58%	63%

Tabela 15: Kampanja 2020-2021 - parametri za određivanje ukupne mase PM 2.5

U poređenju sa sličnom analizom (Perrone, 2017.), rezultati u BiH pokazuju 3:1 više OC u masi PM 2.5 nego u Zagrebu 2013. Isti trend je uočen i kod levoglukozana i K+ koji su 4:1 do 8:1 viši u odnosu na nivoe zabilježene u Zagrebu. Stoga postoji dobar razlog za sumnju da je široka zastupljenost individualnih kućnih peći, s uopćeno niskotemperaturnim ložištem i visokim omjerom emisije PM 2.5, najčešći izvor čestica pri loženju drva, kao i uglja i mrkog uglja.

Međutim, rekonstrukcija ukupne mase bi mogla biti podcijenjena zbog: 1) OC masu treba pretvoriti u masu organske tvari (OM) pomoću faktora između 1,4 i 1,8 (Chow, 2015.) čak i ako se bezvodni šećer zatim izdvoji od OC; 2) kao što je spomenuto, neke vrste koje se koriste za identifikaciju izvora porijeklom iz tla, nisu među otkrivenima; 3) druge važne vrste koje nisu otkrivene u ovoj studiji su one koje su tipične za morsku sol, posebno Na i Cl, koje zajedno čine gotovo 80% sastava morske soli. Prema Peronneu i sar. 2017, prašina tla i morska sol dostižu ukupno oko 2 µg/m<sup>3</sup> u Zagrebu 2013. Može se prepostaviti da je ovaj nivo barem ekvivalentan u Bosni 2020.-2021. U Peronne i sar. 2017. objašnjeno je 66% ukupne mase PM2.5.

Od nedostajućih vrsta su najvažnije one koje imaju značajan dio ukupne težine PM2.5, kao što su kalcij, silicij, željezo, aluminij, a od kojih ni jedna nije detektovana. Mjerenje ovih vrsta je teško jer se obično nalaze u pozadini, što ometa njihovo mjerenje. U ovoj studiji one su smatrani jednoliko raspoređenim u svim izvorima.

	Sarajevo	Banja Luka
Populacija	642 000	250 000
Odnos OC / EC	5,3	6,2
Korelacija OC / PM 2.5	0,97	0,96
Korelacija EC / PM 2.5	0,85	0,85
$\Sigma$ vrsta[µg/m <sup>3</sup> ]	45,7	69,3
% mase objašnjeno	85%	80%

Tabela 16: Kampanja 2020-2021 - parametri za određivanje ukupne mase PM 2.5

Analiza ukupne mase iz kampanje mjerenja 2021-2022 pokazuje slične rezultate kao i za prethodnu kampanju. OC je još uvjek najrasprostranjenija izmjerena vrsta. Masa OC je u visokoj korelaciji sa masom PM 2.5 za Sarajevo, a sada i za Banju Luku.

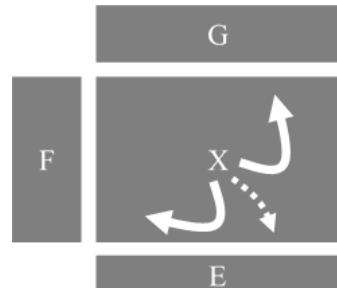
Kako su analitičke metode bile tačnije za drugu kampanju, zbir svih izmjerениh vrsta dostiže 80% do 85%. Kao što je ranije objašnjeno, rekonstruisana ukupna masa mogla bi biti čak i veća jer OC masa treba da se pretvori u masu organske materije (OM) korišćenjem faktora između 1,4 i 1,8. Taj nivo analitičkog mjerenja ukupne mase, uporediv sa drugim nedavnim studijama, čini rezultate modeliranja preciznijim.

## Modeliranje pozitivne faktorizacije matrice (PMF)

Temeljno načelo receptorskog modela je da se može pretpostaviti očuvanje mase i da se analiza ravnoteže mase može koristiti za identifikaciju i raspodjelu izvora čestica u zraku u atmosferi. Ovaj PMF je alat za multivariantnu faktorsku analizu koji koristi dvije matrice izmjerjenih koncentracija i povezanih nesigurnosti, koji pruža porodice rješenja koja rješavaju jednačinu ravnoteže mase.

$X = G \times F + E$ . gdje:

- X je izvorna matrica mjerenja i nesigurnosti,
- F je matrica čiji vektori predstavljaju profile p izvora,
- G je matrica čiji stubovi predstavljaju udjele p izvora,
- E je rezidualna matrica.



PMF faktorska analiza generalno proizvodi niz rješenja s različitim G i F matricama. Svako rješenje je jedinstveno i to se naziva rotacijskom dvostrukošću modela. Kako bi bilo moguće pronaći najbolje rješenje unutar serije, važno je izvesti oko 100 slučajnih proračuna.

Zatim, model pomaže u odabiru najboljeg rješenja koristeći ciljnu funkciju Q koja ima za cilj minimizirati razliku između stvarnih mjerena i modeliranih vrijednosti. Ova razlika je predstavljena rezidualnom matricom. Na rezidualnu matricu obično utječe izvanredne vrijednosti koje su ekstremne vrijednosti različite od srednjeg trenda svih podataka. Ti odstupnici mogu biti ili neželjena kontaminacija podataka ili biti istinski izuzeci.

Odabir rješenja s brojnim faktorima dovodi do sasvim sigurnog rješenja, s niskim Q. Ali cilj je također povezati rješenje koje nudi model sa stvarnošću okoline u kojoj se očekuje nekoliko porodica faktora ili se može objasniti (u ovoj studiji nekoliko skupina emitera onečišćujućih tvari u zraku).

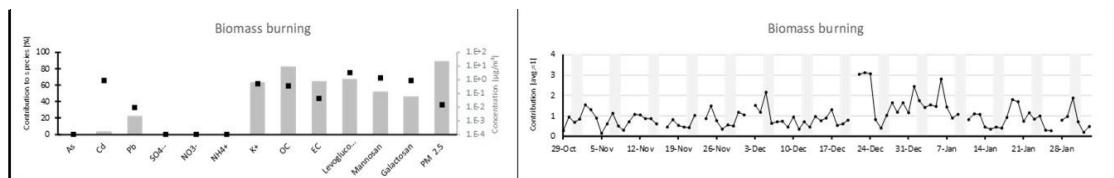
Koristan alat za odlučivanje o najboljem rješenju među svim izračunatim rješenjima je tada usporedba očekivanog Q ( $Q_{exp}$ ) izračunatog pomoću svih podataka, s Q robustom ( $Q_{robust}$ ) izračunatim isključujući tačke izvan određene skale nesigurnosti. Najbolje odgovara rješenje kada je razlika minimalna, kada je bilo vrlo malo tačaka koje je potrebno isključiti ( $Q_{robust}$  će biti manji od 2:1  $Q_{exp}$ ).

Nakon odabira najboljeg rješenja, metode procjene pogreške uključene u softver, PMF 5.0 će se koristiti za potvrdu ili odbijanje odabranog rješenja.

Bootstrap (BS) je prva od tih metoda i pomaže u otkrivanju i procjeni mogućih slučajnih pogrešaka zbog nerazmijernih učinaka malog skupa opažanja na rješenje. To doslovno pokazuje koliko su faktori snažno definisani. Prihvatljivo rješenje mora imati 80% iterativnih izračuna koje osiguravaju isto mapiranje faktora.

Pomak (Disp) je druga metoda i definira raspon rotacijsko dostupnog prostora za rješenje. Jake vrste imaju svoju vrijednost jednu po jednu "pomaknutu" malo u profilu svakog izračunatog faktora. Zatim se promatra učinak na ostale faktore. Ideja je vidjeti koliko se često faktori mijenjaju dovoljno za razmjenu identiteta ovisno o veličini pomaka. Prihvatljivo rješenje ne smije imati zamjenu identiteta za minimalni pomak.

Unutar ove studije rezultat je tada niz faktora (5 do 6) definiranih doprinosom faktora težini svake vrste (i obrnuto koncentracijom različitih izmjerениh vrsta u faktoru), i povezanim vremenima- serija definisana doprinosom svakog dnevnog mjerjenja ukupnoj težini faktora tokom mjernog razdoblja.



Slika 7: Tipičan rezultat s definicijom faktora (lijevo) i vremenskim nizom faktora (desno)

Ljestvice s lijeva na desno: Doprinos vrsti (%) / Koncentracija ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) / Doprinos (prosjek =1)

### Ulazni podaci i postavke u PMF analizi 2020-2021

Prethodna obrada ulaznih podataka i postavke kada se slijede PMF US-EPA smjernice sažete su u Tabeli 17.

Analiza PMF-a provedena je zasebno za svaki grad. Broj uzoraka za doređivanje PM 2.5 iznosio je 92 za svako od šest mjesta uzorkovanja. Nekoliko uzoraka je isključeno zbog određenih vrlo neobičnih i izolovanih događaja, u većini slučajeva isključen je samo jedan izolovani uzorak, ali je jednom prilikom isključeno 5 uzastopnih uzoraka. Posljednje su mogle biti povezane s epizodom prodora prašine u Sahari koja je započela tog razdoblja početkom februara 2021. Raspon modelovanih uzoraka je stoga bio između 93% i 100%, ovisno o mjestu uzimanja uzorka.

Vrijednosti ispod granice detekcije metode (MDL) zamijenjene su polovicom granice detekcije (DL/2) u skladu sa smjernicama.

Broj stvarno korištenih vrsta bio je između 12 i 13. Vrste su klasificirane kao "slabe" kada je broj uzoraka ADL bio < 55% i "loše" kada je broj uzoraka ADL bio < 35%. Međutim, samo je K+ postavljen kao "slab" do 17% zbog njegove važnosti za diskriminaciju izgaranja biomase.

Omjer signala i šuma (S/N) također je korišten za klasifikaciju vrsta. Ako je S/N za jednu vrstu bio niži od 1, tada je klasificiran kao slab ili loš ako je S/N<0,5.

Nesigurnost je odredio Institut za javno zdravstvo iz Beograda zajedno s podacima mjerjenja, a uzete su u obzir i koncentracije i nesigurnosti zasnovane na posmatranju.

Nesigurnosti koje nedostaju povezane s vrijednostima koje nedostaju, zamijenjene su sa 5/6\*DL prema preporukama smjernica.

Kako bi se uzeli u obzir nepoznati izvori nesigurnosti, dobivena analitička nesigurnost povećana je za nesigurnost ekstra modeliranja od 7% za sve vrste. To se shvata kao jačanje konačnog PMF rješenja. Za Sarajevo, međutim, nije dodana nikakva dodatna nesigurnost kako bi model mogao konvergirati rješenju.

Prva procjena broja faktora postignuta je postupnom analizom Q vrijednosti višestrukih ciklusa s povećanjem broja faktora. Kvalitet uklapanja doveo je do odluke o najboljem broju faktora koji će se koristiti (skalirani reziduali, usklađenost posmatranih nasuprot predviđenih dijagrama i histograma, Q/Q očekivani za vrstu). Mogućnost za tumačenje rezultata također je dovela do odluke o broju faktora (u smislu kemijskog profila i vremenskih serija) kao i do odluke da se pokrene ograničeni model ili ne.

Najbolji broj faktora bio je ili 5 (Bijeljina, Brod, Zenica i Tuzla) ili 6 (Banja Luka i Sarajevo). Kao što se vidi u Tabeli 8, PMF rješenje iz Sarajeva nije u potpunosti zadovoljilo kriterije iz EPA-inog korisničkog vodiča. Iako su rezultati poboljšani primjenom ograničenja, još uvijek je prisutna jedna zamjena iz DISP-analize. Stoga rezultate treba tumačiti imajući to na umu.

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
Period	2020-10-30 do 2021-02-03	2020-10-29 do 2021-02-02	2020-10-30 do 2021-02-03	2020-10-31 do 2021-02-04	2020-10-29 do 2021-02-02	2020-10-31 do 2021-02-04
Dani koji nedostaju (dani ponovnog punjenja uzorka)	2020-11-17 2020-12-03 2020-12-22 2020-01-11 2020-01-28	2020-11-16 2020-12-02 2020-12-21 2020-01-10 2020-01-27	2020-11-17 2020-12-03 2020-12-22 2020-01-11 2020-01-28	2020-11-18 2020-12-04 2020-12-23 2020-01-12 2020-01-29	2020-11-16 2020-12-02 2020-12-21 2020-01-10 2020-01-27	2020-11-16 2020-12-04 2020-12-23 2020-01-10 2020-01-29
Br. uzorka	92	92	92	92	92	92
% ADL   S/N   odabrana kategorija (jako, slabo, loše)						

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
As	72%   5,4   Jako	89%   7,1   Jako	99%   9,7   Jako	<b>37%   1,8   Slabo</b>	99%   9   Jako	89%   7,1   Jako
Cd	53%   4,5   Jako	<b>50%   3,3   Slabo</b>	91%   8,5   Jako	59%   4,9   Jako	<b>51%   3,5   Slabo</b>	<b>50%   3,3   Slabo</b>
Mn	50%   4   Jako	<b>24%   1,8   Loše</b>	95%   7,5   Jako	85%   6,8   Jako	12%   0,9   Loše	<b>24%   1,8   Loše</b>
Pb	<b>66%   4,7   Slabo</b>	74%   4,5   Jako	99%   8,2   Jako	<b>72%   4,5   Slabo</b>	<b>79%   4,6   Slabo</b>	<b>74%   4,5   Slabo</b>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	96%   9,5   Jako	99%   9,9   Jako	96%   9,7   Jako	96%   9,7   Jako	100%   10   Jako	98%   9,8   Jako
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	79%   7,9   Jako	86%   8,6 Jako	87%   8,7   Jako	93%   9,5   Jako	99%   9,9   Jako	87%   8,7   Jako
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	78%   5,4   Jako	90%   6   Jako	78%   5,2   Jako	74%   5   Jako	95%   6,3   Jako	71%   4,7   Jako
K <sup>+</sup>	49%   5,1   Jako	41%   4,1   Jako	66%   6,7   Jako	78%   7,9   Jako	65%   6,5   Jako	<b>27%   2,6   Slabo</b>
OC	100%   5,7   Jako	100%   6,4   Jako	100%   6,7   Jako	100%   6,6   Jako	100%   6,3   Jako	100%   5,3   Jako
EC	100%   3,1   Jako	100%   2,7   Jako	100%   3,5   Jako	100%   3,5   Jako	100%   2,5   Jako	100%   1,8   Jako
Levoglukozan	100%   5,9 Jako	100%   5,9   Jako	100%   5,9   Jako	100%   5,9   Jako	100%   5,9   Jako	100%   5,9   Jako
Manozan	100%   5,2   Jako	100%   5,2   Jako	100%   5,2   Jako	100%   5,2   Jako	100%   5,2   Jako	100%   5,2   Jako
Galaktozan	100%   5,9   Jako	100%   5,9   Jako	100%   5,9   Jako	100%   5,9   Jako	100%   5,9   Jako	100%   5,9   Jako
PM 2.5	<b>100%   9,7   Slabo</b>	<b>100%   10   Slabo</b>	<b>100%   10   Slabo</b>	<b>100%   10   Slabo</b>	<b>100%   10   Slabo</b>	<b>100%   9,9   Slabo</b>
Razlog za neuobičajenu kategoriju ako postoji	Pb kao slab jer je vrsta pokretala trend visokog Q/Qexp koji sprečava model da pronađe stabilno rješenje.	-	-	Pb kao slab jer je vrsta pokretala trend visokog Q/Qexp koji sprečava model da pronađe stabilno rješenje.	Pb kao slab jer je vrsta pokretala trend visokog Q/Qexp koji sprečava model da pronađe stabilno rješenje.	K+ kao Slab umjesto Loš, čak i ako je samo 27% ADL, ali prihvatljiv S/N i važna uloga u identifikaciji sagorijevanja biomase.  Pb kao Slab iz istog razloga kao i za druge stranice.

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
Isključeno iz modelovanja	24.11.2020. 30.01.2020. 31.01.2020. 01.02.2021. 02.02.2021. 03.02.2021.	23.11.2020.	21.11.2020.	22.11.2020.	-	05.12.2020.
Razlozi za isključenje	24/11 sumnjivo Mn izvanredan + zadnjih 6 dana uz nemiren od strane upada Saharske prašine.	Izolovani događaj koji sprečava model konvergirati u prihvatljivo rješenje.	Nedosljedan nivo NO <sub>3</sub> i visok Q/Qexp trend koji sprečavaju model konvergirati u prihvatljivo rješenje	Visok nivo bezvodnog šećera nedosljedan s vrlo niskim OC i EC koji sprečavaju model konvergirati u prihvatljivo rješenje.	-	Izolovani događaj s vrlo izolovanim izvorom EK koji sprečava model konvergirati u prihvatljivo rješenje.
% od ukupno modeliranih uzoraka	93,5%	98,9%	98,9%	98,9%	100%	98,9%

Tabela 17: Ulazni podaci i postavke PMF 5.0

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
Osnovno izvođenje						
Br. izvođenja	100	100	100	100	100	100
Generator pseudoslučajnih brojeva	22	22	22	22	22	22
Br. faktora – testna rješenja	4 do 7	4 do 6	4 do 7	4 do 7	4 do 6	4 do 6
Br. faktora – finalna rješenja	6	5	6	6	5	5

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
Dodatna neizvjesnost modeliranja	0%	7%	7%	7%	7%	7%
Odabir osnovnog izvođenja	86 umjesto 80	13 umjesto 22	27 kao što je predloženo	84 kao što je predloženo	81 kao što je predloženo	17 kao što je predloženo
Razlog, ako nije onaj predloženi	Bolje razlikovanje Mannosana	Inače faktor utjecaja SO4 pokazuje vrlo visok i izolovan uspon u novembru	-	-	-	-
Bootstrap (BS) analiza za osnovno izvođenje						
min. br. BS mapiranih / total	79 / 100	66 / 100	94 / 100	85 / 100	84 / 100	99 / 100
maks. br. zamjene na još jedan faktor	6	21	6	11	6	1
Displacement (DISP) analiza za osnovno izvođenje						
Kód pogreške   2. vrijednost   –prvi red zamjena	0   -1,780   0 0 0 0 0	Nije pokrenuta	0   -1,788   0 0 0 0 0	0   -0,003   0 0 0 0 0	0   -0,053   5 0 6 3 14	0   -0,014   0 0 0 0 0
Komentar procjene pogreške za osnovno izvođenje	Jedan BS ispod 80%	Jedan BS daleko ispod 80% sa 21% zamjene prema drugom faktoru	Oboje BS i DISP su prihvatljivi	Oboje BS i DISP su prihvatljivi	Puno zamjena (14) prema mješovitom izvoru sagorijevanja	Oboje BS i DISP su prihvatljivi

Tabela 18: Baza dijagnostike

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
Rotacijski alati – Fpeak						
Fpeak	0	0	0	0	0	0
Rotacijski alati – Ograničenja						
Primijenjena ograničenja	manozan povučen (meko povlačenje) za sve faktore osim izgaranja biomase	manozan povučen (meko povlačenje) za sve faktore osim izgaranja biomase	manozan povučen (meko povlačenje) za sve faktore osim izgaranja biomase	manozan povučen (meko povlačenje) za sve faktore osim izgaranja biomase + mješovito izgaranje	manozan povučen (meko povlačenje) za sve faktore osim izgaranja biomase	-
Razlog za ograničenja	manozan kao pouzdan pokazatelj izgaranja biomase ne bi trebao biti prezastupljen u drugim faktorima.	manozan kao pouzdan pokazatelj izgaranja biomase ne bi trebao biti prezastupljen u drugim faktorima.	manozan kao pouzdan pokazatelj izgaranja biomase ne bi trebao biti prezastupljen u drugim faktorima.	manozan kao pouzdan pokazatelj izgaranja biomase ne bi trebao biti prezastupljen u drugim faktorima.	manozan kao pouzdan pokazatelj izgaranja biomase ne bi trebao biti prezastupljen u drugim faktorima.	-
% dQ [treba biti što bliže 1%]	1,07%	1,11%	0,70%	0,74%	0,98%	-
Bootstrap (BS) analiza za ograničeno izvođenje						
min. br. BS mapiranih / total	87 / 100	93 / 100	91 / 100	99 / 100	91 / 100	-
maks. br. zamjene na još jedan faktor	6	6	8	1	8	-
Displacement (DISP) analiza za ograničeno izvođenje						
Kōd pogreške   2.vrijednost   Prvi red– zamjena	0   -27,478   1 0 0 0 1 0	0   -0,905   0 0 0 0 0	0   -5,670   0 0 0 0 0 0	0   0,000   0 0 0 0 0 0	0   0,000   0 0 0 0 0 0	-

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
Komentar procjene pogreške za ograničeno izvođenje	Samo jedna zamjena između faktora povezanog s Cd i faktora kore	Oboje BS i DISP su prihvatljivi	-			

*Tabela 19: Ograničene postavke i provjere valjanosti*

### **Ulazni podaci i postavke u PMF analizi 2021-2022**

Prethodna obrada ulaznih podataka i postavke kada se slijede PMF US-EPA smjernice sažete su u Tabeli 20.

PMF analiza je rađena odvojeno za gradove Sarajevo i Banju Luku, kao i za prethodnu kampanju. Ovdje su opisane samo razlike u odnosu na gore opisanu metodu.

Broj dnevnih uzoraka PM 2.5 (podsjećamo, jedan dnevni uzorak uključuje dva filtera jer su dva uzorkivača radila istovremeno na svakom mjestu), bio je 108 za svaku lokaciju. Nekoliko dnevnih uzoraka je isključeno zbog nekih vrlo neobičnih i izolovanih događaja, kao što je bio slučaj sa 2 uzorka u Sarajevu i 4 u Banjoj Luci. Stoga je udio modeliranih uzoraka bio 98%, odnosno 96%.

Broj vrsta koje je stvarno razmatrano je 19 za Sarajevo i 20 za Banju Luku. Vrste su klasifikovane kao "slabe" kada je broj uzorka ADL bio < 55% i "loše" kada je broj uzorka ADL bio < 35%. Izuzetak su napravljene za dvije vrste u Sarajevu zbog njihove važnosti za diskriminaciju nekih izvora. NH4+ je postavljen kao "jak" iako je ADL iznosio 54,6%, a Cl- je postavljen na "slab" iako je ADL bio 31,5%.

Da bi se uzeli u obzir nepoznati izvori nesigurnosti, data analitička nesigurnost je povećana za nesigurnost ekstra modeliranja od 4% za sve vrste.

Najbolji broj faktora za pouzdano rješenje bio je 8 i za Sarajevo i za Banju Luku.

	Sarajevo	Banja Luka
Period	2021-11-16 do 2022-03-10	2021-11-16 do 2022-03-10
Dani koji nedostaju (dani ponovnog punjenja uzorka)	2021-12-03 2021-12-04 2021-12-22 2021-12-23 2022-01-12 2022-02-01 2022-02-21 2022-02-22	2021-12-03 2021-12-21 2021-12-22 2022-01-11 2022-01-31 2022-02-20 2022-02-21
Br. uzorka	108	108
% ADL   S/N   odabrana kategorija (jako, slabo, loše)		
As	92%   5,0   Jako	93%   2,9   Jako
Cd	93%   6,3   Jako	99%   7,5   Jako
Cr	42%   2,6   Slabo	65%   4,7   Jako
Mn	87%   6,9   Jako	99%   7,9   Jako
Ni	44%   0,9   Slabo	82%   2,5   Jako
Pb	98%   5,4   Jako	99%   5,7   Slabo
Co	0%   0   Bad	1%   0,1   Jako
Cu	97%   3,7   Jako	96%   3,6   Slabo
V	43%   3,2   Slabo	88%   6,7   Jako
Al	2%   0   Loše	0%   0   Loše
Fe	0%   0   Loše	3%   0,1   Loše
Zn	5%   0,3   Loše	0%   0   Loše
Cl <sup>-</sup>	32%   3,1   Slabo	71%   7,1   Dobro
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	89%   9,0   Jako	99%   9,9   Jako
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	100%   10,0   Jako	100%   10,0   Jako

	Sarajevo	Banja Luka
Na <sup>+</sup>	99%   9,9   Jako	100%   10,0   Jako
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>55%   3,6   Jako</b>	30%   1,8   Slabo
K <sup>+</sup>	48%   4,8   Slabo	63%   6,2   Jako
Mg <sup>2+</sup>	20%   2,1   Loše	54%   5,2   Slabo
Ca <sup>2+</sup>	31%   1,8   Loše	<b>85%   4,8   Slabo</b>
OC	100%   8,6   Jako	100%   8,8   Jako
EC	100%   6,0   Jako	100%   6,8   Jako
Levoglucosan	100%   5,9   Jako	100%   5,9   Jako
Mannosan	100%   5,2   Jako	100%   5,2   Jako
Galactosan	100%   5,9   Jako	100%   5,9   Jako
PM 2.5	<b>100%   9,7   Slabo</b>	<b>100%   9,9   Slabo</b>
Razlog za neuobičajenu kategoriju ako postoji	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> je prešao sa slabog na jak Cl- je prešao sa lošeg na slab budući da su ove vrste važne za razlikovanje nekih sekundarnih aerosola i odležale morske soli ili prašine iz tla.	Cu je prešao iz jakog u slab, Pb je prešao iz jakog u slab Ca je prešao iz jakog u slab budući da su ove tri vrste bile loše predviđene modelom i imale su Q/Qexp iznad željenog praga od 2.
Isključeno iz modelovanja	2022-03-02 2022-01-01	2021-11-16 do 2021-11-19
Razlozi za isključenje	03/02 sumnjivo Mn 01/01 sumnjivo Cu	19/11 Ekstremno jako izražen Na+ 16 to 18/11 Mnogo nemapiranog SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup> tokom početka mjerena što nije od iznimne važnosti za studiju.
%od ukupno modeliranih uzoraka	98%	96%

Tabela 20: Ulagani podaci i postavke PMF 5.0

	Sarajevo	Banja Luka
Osnovno izvođenje		
Br. izvođenja	100	100
Generator pseudoslučajnih brojeva	22	22
Br. faktora – testna rješenja	6 to 10	6 to 10
Br. faktora – finalna rješenja	8	8
Dodatna neizvjesnost modeliranja	4%	4%
Odabir osnovnog izvođenja	88 kao što je predloženo modelom	40 kao što je predloženo modelom
Razlog, ako nije onaj predloženi	-	-
Bootstrap (BS) analiza za osnovno izvođenje		
min. br. BS mapiranih / total	86 / 100	99 / 100
maks. br. zamjene na još jedan faktor	5	1
Displacement (DISP) analiza za osnovno izvođenje		
Kôd pogreške   2. vrijednost   –prvi red zamjena	0   -0,002   0 0 0 0 0 0 0	0   -0,018   0 0 0 0 0 0 0

	Sarajevo	Banja Luka
Komentar procjene pogreške za osnovno izvođenje	Oba BS i DISP su validni	Oba BS i DISP su validni

Tabela 21: Baza dijagnostike

### Optimizacija rješenja modela od “osnovnog izvođenja” do “ograničenog rješenja”

U modelu faktorizacije pozitivne matrice, najbolje dobijeno rješenje nije jedinstveno. Zbog slobodne rotacije matrica postoji porodica rješenja koja su jednakom prikladna zbog tzv. rotacijske dvosmislenosti.

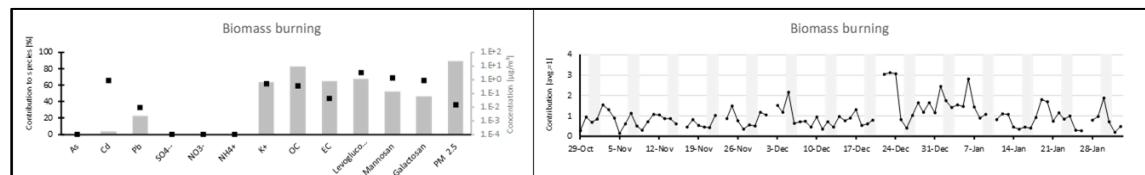
U ovom istraživanju većina rješenja je ograničena s obzirom na to da je manozan tačan pokazatelj sagorijevanja biomase čak i u regiji gdje je mrki ugalj (lignite) uobičajeno gorivo. U odabranim ograničenim rješenjima manozan je maksimalno povučen („meko povlačenje“,  $dQ = 0,50\%$ ) u faktorima kod kojih se doprinos izgaranja biomase ne bi trebao pojaviti.

Zahvaljujući širem panelu izmjerениh vrsta, dva rješenja iz kampanja uzorkovanja 2021.-2022. nisu trebala nikakva ograničenja da bi se optimizirala budući da su osnovna izvođenja uspješno prošla BS i DISP testove kvalitete. Dakle, obje su označene kao „Osnovno izvođenje“, kao što je Brod bio prve zime.

## Rezultati

### Prikaz rezultata

Rezultat za svako mjesto uzimanja uzorka je niz faktora (5 do 6) definisanih doprinosom faktora masi svake vrste (i obrnuto koncentracijom različitih izmjerениh vrsta u faktoru) i povezanim vremenima- serija definisana doprinosom svakog dnevnog mjerjenja ukupnoj jačini faktora tokom razdoblja.



Slika 8: Primjer rezultata s definicijom faktora (lijevo) i hronološkim nizom faktora (desno)

Ljestvice s lijeva na desno: Doprinos vrsti (%) / Koncentracija ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) / Doprinos (prosjek =1)

Na lijevoj strani Slike 6 crne tačke pokazuju uticaj faktora (ovdje sagorijevanje biomase) ukupnoj masi svake vrste. U ovom primjeru 60% OC nalazi se u biomasi kao faktoru. To znači da OC može objasniti izvore koji tvore faktor gorenja biomase.

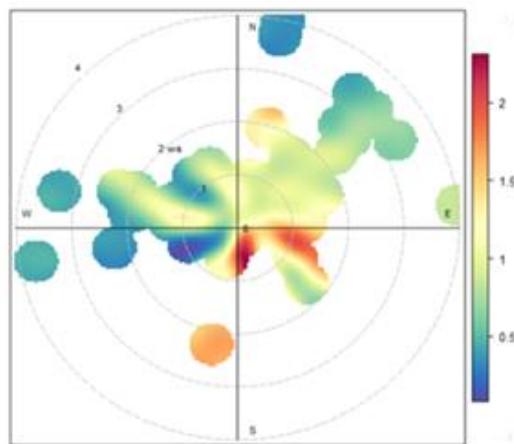
Na lijevoj strani Slike 6 sive trake pokazuju koncentraciju svake vrste u dodijeljenom faktoru. U ovom primjeru koncentracija levoglukozana je oko  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dok je koncentracija manozana oko  $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Na desnoj strani Slike 6 tačke prikazuju dio faktora modeliranog tog dana u poređenju s njegovom kumulativnom masom tokom cijelog razdoblja. U ovom primjeru tzv. hronološke serije, dok je dnevni udio faktora u prosjeku 1%, nekoliko dana oko 24. decembra pokazuje 3% cjelokupnog faktora gorenja biomase izračunatog za 91 akumulirani dan. Budući da je ljestvica te grafike prilagodljiva, to znači da kada je skala niža (do 4%) može se reći da bi modelirani faktor trebao biti povezan s prilično kontinuiranim izvorom, dok ako je skala veća (oko 8%) modelirani faktor bi trebao biti povezan s diskontinuiranim izvorom.

Desna strana Slike 8 također prikazuje sive trake koje predstavljaju vikende. Očekuje se da će se faktor čije bi emisije inače bile značajnije tokom radnih dana pokazati smanjenje tokom ovih dana. Na primjer, emisije iz saobraćaja obično pokazuju sedmično smanjenje tokom barem jednog dana vikenda.

Slika 8 prikazuje dnevni relativni doprinos prikazan u skali u boji sa sličnim granicama kao i za sam hronološki niz. Svaki dan je predstavljen tačkom čiji položaj ovisi o ishodištu smjera vjetra (sjever je gore) i brzini vjetra (iz središta). Tačke se zatim spajaju u jedan uzorak. Ovi takozvani polarni dijagrami izrađeni su uz korištenje Openair R paketa razvijenog u svrhu analize podataka o kvalitetu zraka (Carslaw & Ropkins, 2012.).

Raspon boja rezultat je Gausovog izglađivanja neparametarske regresije vjetra (NWR) koncentracije težine na površini prema njihovoj blizini, definisanim intervalima brzine i smjera vjetra. NWR su odabrani jer je broj mjerena bio ograničen. Zbog efekta izglađivanja na ekstremne vrijednosti, treba tumačiti samo uzorak boje, a ne dimenziju.



Slika 9: Polarni grafikon hronološke serije

### Identifikacija različitih izvora – kampanja 2020-2021

Identifikacija i imenovanje vjerovatnih izvora za svaki faktor predviđen rješenjem modela određeni su korištenjem raspona relativne mase uočene za ove vrste u hemijskim profilima SpecieEurope (Pernigotti, 2016.) i različite literature koja se odnosi na slična društveno-geografska okruženja (vidi Reference, str. 62).

Diskriminacija između faktora napravljena je izolovanjem poznatih šablonu rezultata iz različitih izvora. Kada su u pitanju regionalni izvori, sekundarni aerosoli su uobičajeni i često u obliku SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> i NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Više pogledati u poglavlju o sekundarnim aerosolima.

Sagorijevanje biomase također je bio jedan od faktora koji je bio očigledan u mnogim gradovima. Ovaj faktor je dobro identifikovan kroz visok doprinos OC, obično veći od EC i koji obično ide zajedno s jasnim doprinosom K<sup>+</sup>. Kao što je ilustrovano u literaturi, najbolji marker za faktor izgaranja biomase je manozan zajedno s galaktozanom.

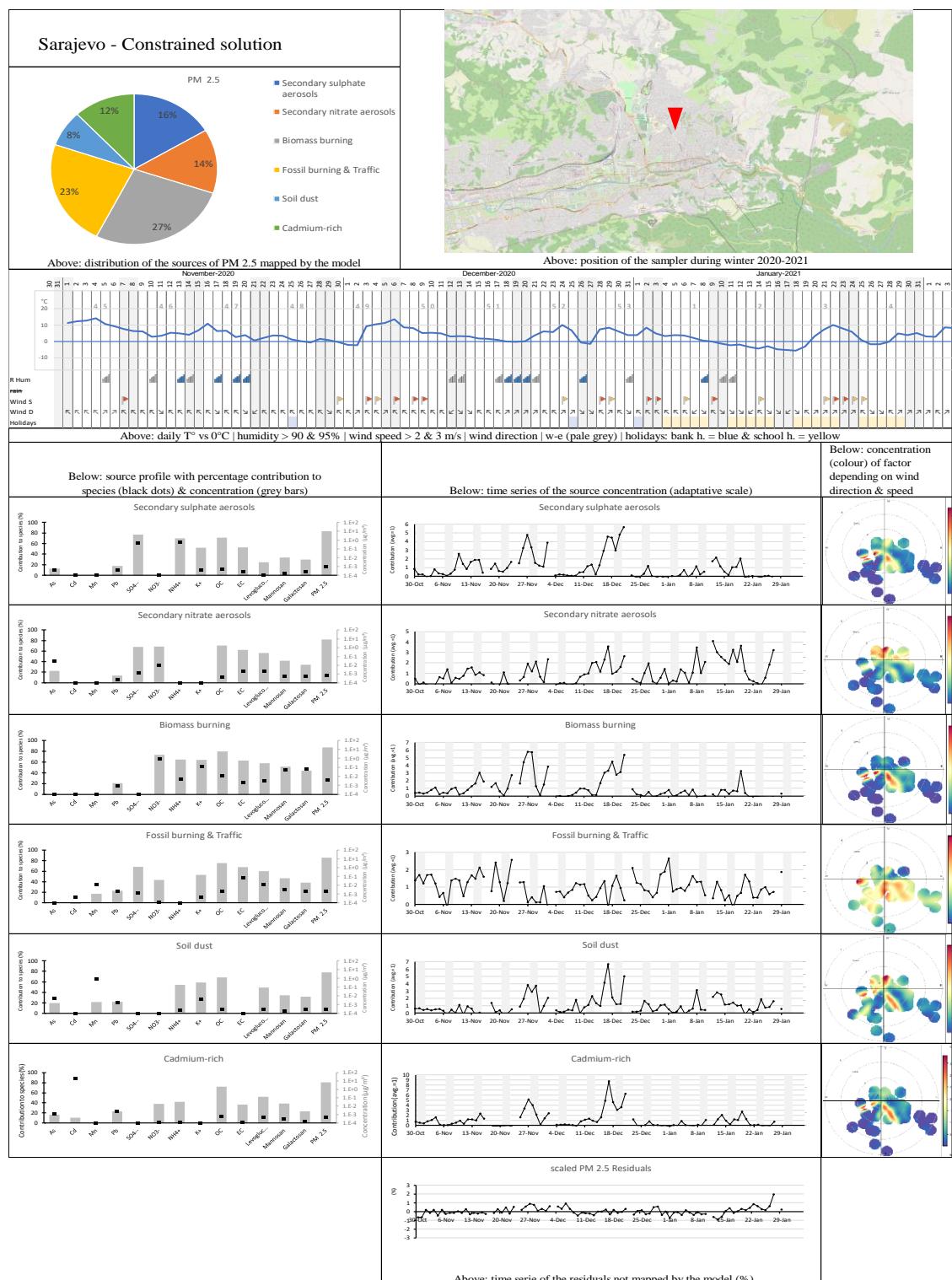
Još jedan faktor koji je uvijek prisutan je prašina porijeklom iz tla. Jasno je identifikovana po velikom doprinosu As. U regionu Balkana, As je prilično čest u rudnicima i usjecima padina, te gornjem tlu i stoga je dobar pokazatelj izvora.

Drugi faktori pokazuju veću varijabilnost u njihovim karakteristikama rezultata u ovoj studiji, vjerojatno zbog mješavine izvora koje nije bilo moguće dalje raščlaniti iz skupa vrsta koje su uspješno izmjerene.

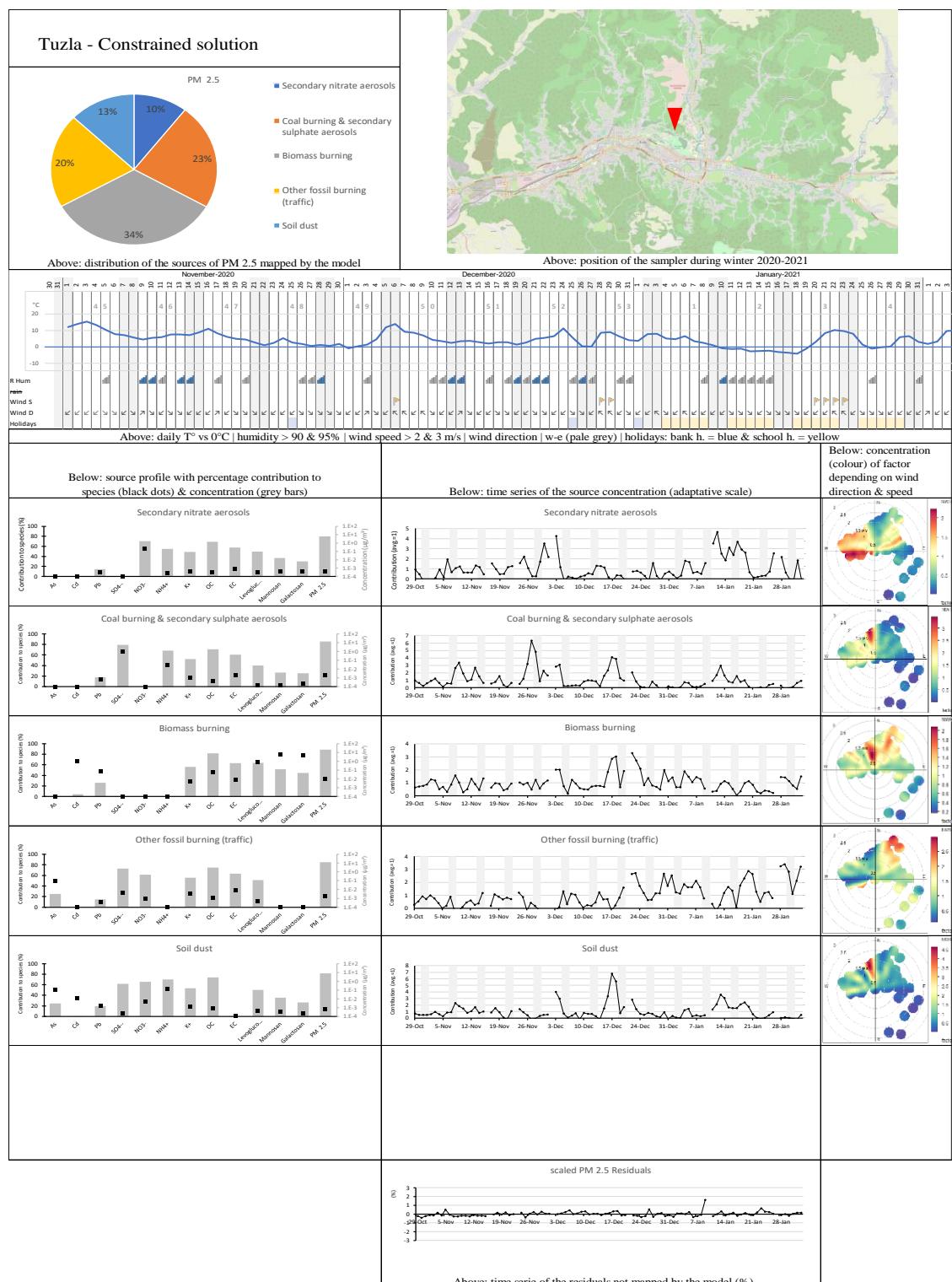
Signal za izgaranje fosilnih goriva često je mješavina različitih izvora kao što je sagorijevanje uglja, moguće sagorijevanje nafte i vjerojatno izduvni gasovi iz saobraćaja. Skup vrsta otežava razlikovanje saobraćaja od drugih izvora izgaranja fosila. Ali sagorijevanje uglja ima tipično veći doprinos EC od OC zajedno s visokim doprinosom SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Međutim, važno je napomenuti da lignit emituje manje SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> od uglja i da se obje vrste sagorijevaju u BiH.

Povremeno postoje naznake visokog udjela Mn i ti su se faktori do sada pripisivali industriji. Jednom prilikom (Banja Luka) pojavio se rezultat s visokim udjelom K+ koji se dosad nije mogao pripisati poznatom izvoru.

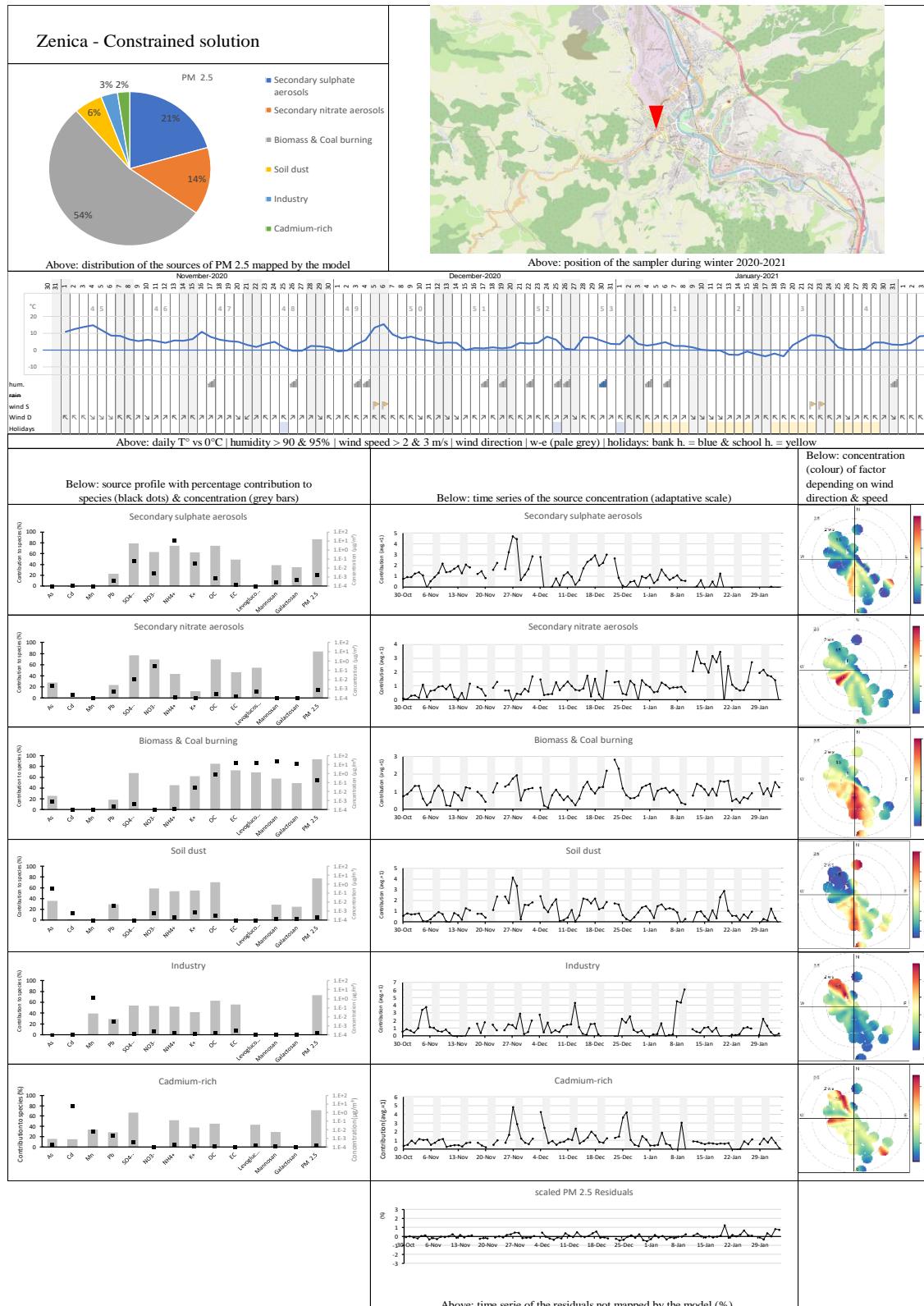
## Sarajevo – ograničeno rješenje, zima 2020/2021



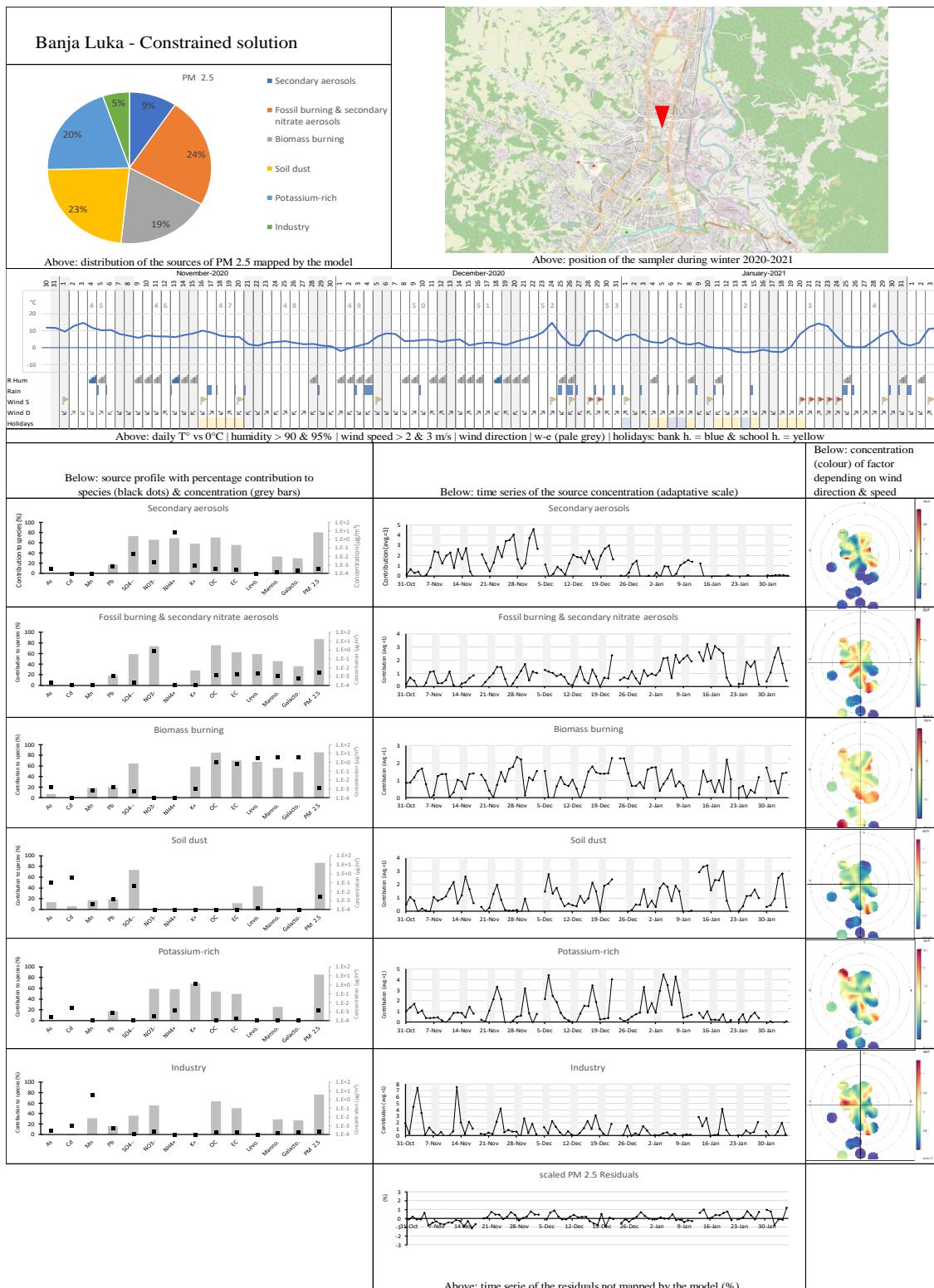
## Tuzla – ograničeno rješenje, zima 2022/2021



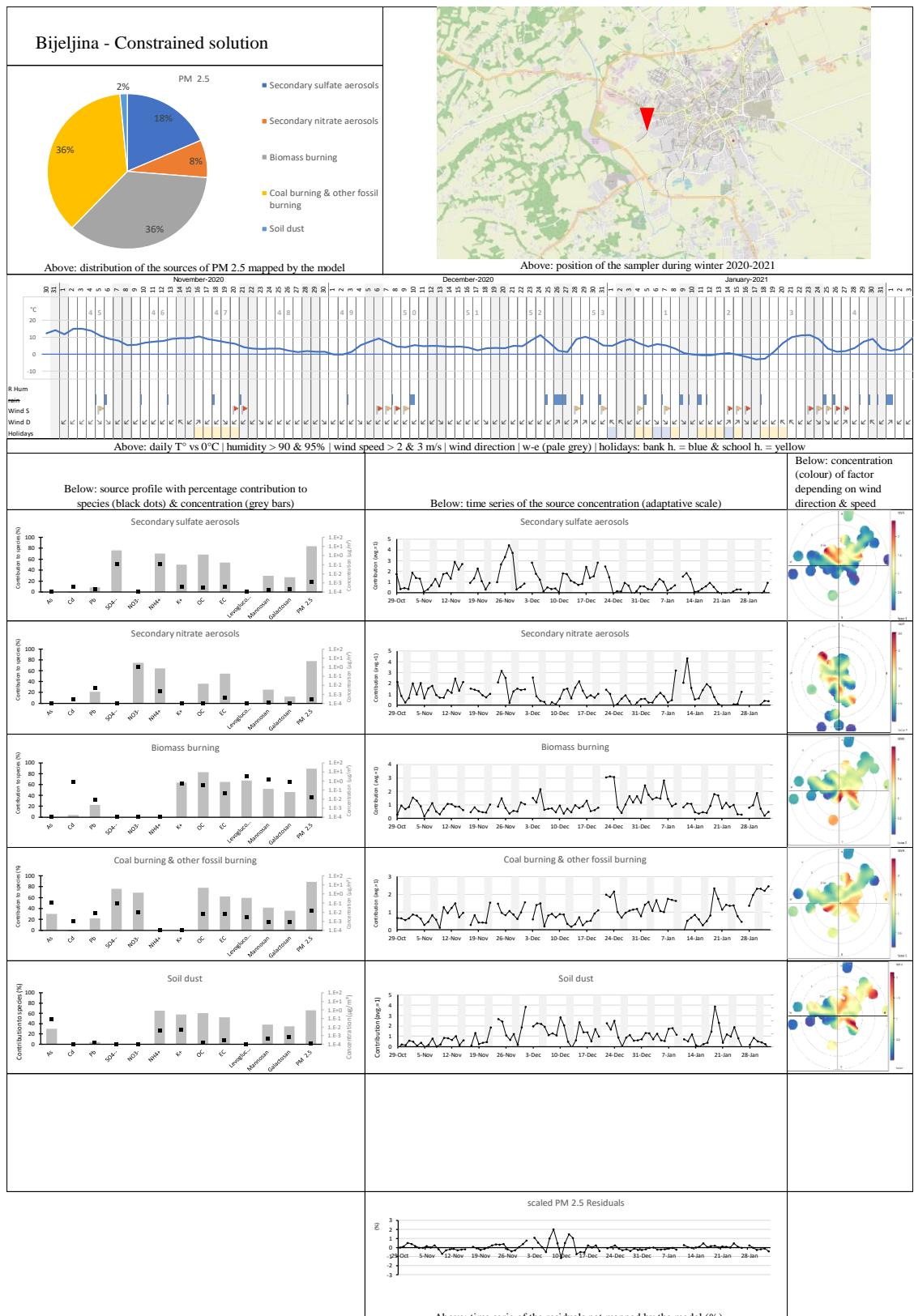
Zenica – ograničeno rješenje, zima 2020/2021



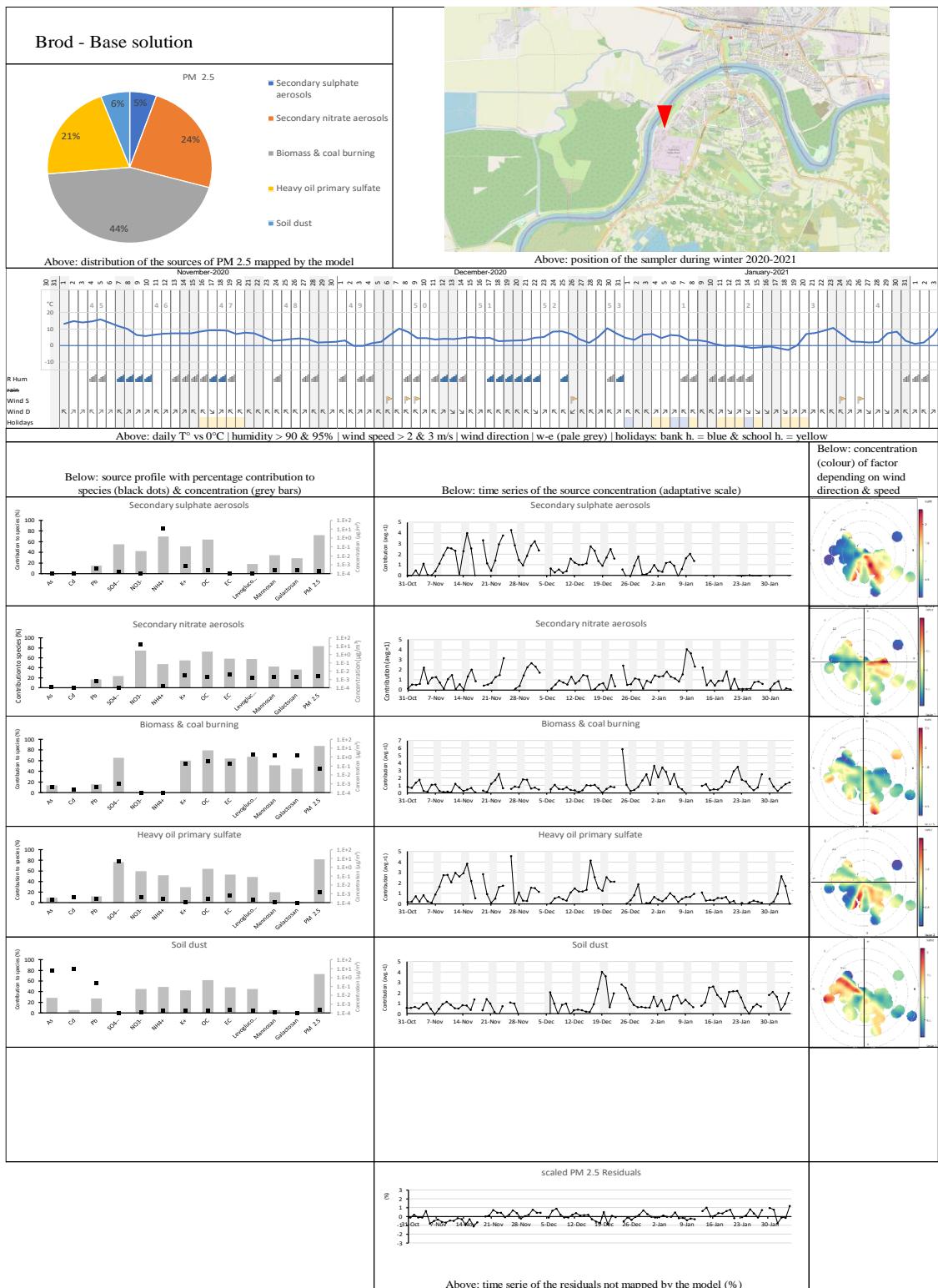
## Banja Luka – ograničeno rješenje, zima 2022/2021



## Bijeljina – ograničeno rješenje, zima 2020/2021



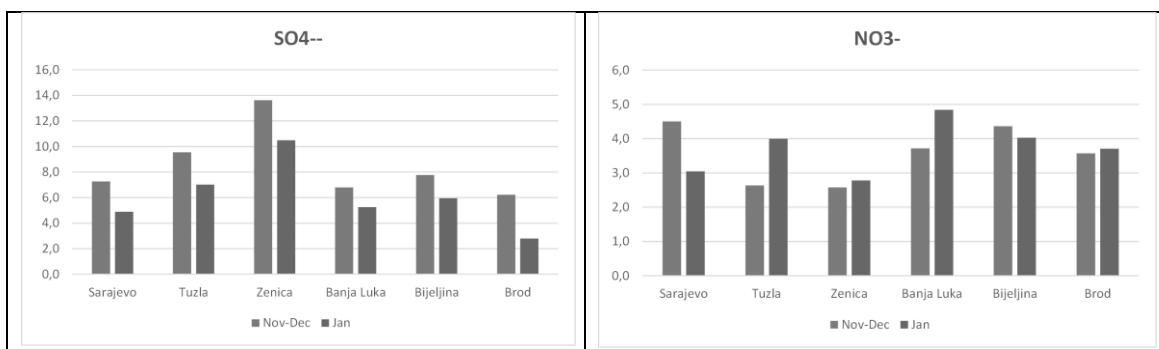
**Brod – osnovno rješenje, zima 2022/2021**



## Sekundarni aerosoli

Dvije vrste jona, sulfatni ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) i nitratni ( $\text{NO}_3^-$ ), analizirani su iz uzoraka filtera i korišteni kao predstavnici za sekundarne anorganske aerosole (SIA), koji uglavnom postoje zajedno s jonima amonijaka. SIA nastaje u atmosferi transformacijom prekursora plinske faze – uglavnom  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_x$  – koje emituju i antropogeni i biogeni izvori (Amato, 2016.). Stvaranje plinske faze SIA može trajati od nekoliko sati do nekoliko dana, ovisno o vremenskim uvjetima (npr. temperatura, vlažnost), sunčevu zračenje i koncentracija različitih oksidansa. S visokim sadržajem vode u aerosolu (AWC), npr. tokom uslova magle, također postoje vrlo intenzivni procesi transformacije u vodenoj fazi koji proizvode sulfate i nitratre (Chunrong Chen, 2021.). Stoga se mogu očekivati varijacije u komponentama SIA koje reaguju na različite meteorološke uslove (Ogulei, 2006.) (Prakash, 2017.) i epizode stabilne atmosferske inverzije (Srivastava, 2018.).

FHMZ i RHMZ su dali zapažanja i usmeno komunicirali o vremenskoj situaciji koja se dogodila tokom mjerne kampanje. Novembar i decembar 2020. često su pokazivali visoku relativnu vlažnost zraka, maglu i ili oblačne vremenske uvjete. Januar je pokazao više vedre vremenske prilike uz promjenjivu količinu padavina. Slika 10 pokazuje da su nivoi sulfata bili značajno veći tokom novembra-decembra u svih šest gradova. Za nitratre rezultati su više varirali.



Slika 10: Koncentracije ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sulfata i nitrata tokom novembra – decembra 2020. i januara 2021.

Svako sagorijevanje goriva koja sadrže sumpor emitovat će  $\text{SO}_2$ , ali i dio sulfata. Posljednje se obično smatra malim, u modeliranju disperzije emisije sumpora iz industrijskih peći obično se postavljaju na 95% kao  $\text{SO}_2$  i 5% kao  $\text{SO}_4^{2-}$ . Međutim, studija iz Kine (Dai Q, 2019.) iz područja s ekstenzivnim loženjem uglja u stambenim prostorima pokazala je da bi primarni emitovani sulfat mogao porasti do 40-50% tokom zime. S obzirom da imamo sličan obrazac emisije u BiH, mogli bismo očekivati da se značajan dio sulfata direktno emituje, a ne da biva sekundarno formiran u atmosferi. To će vjerojatno proizvesti PMF rezultate s većim preklapanjem između sulfatnih i drugih lokalno emitovanih pokazatelja grijanja stambenih objekata ugljem kao što su OC i EC.

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
Faktor: Sekundarni sulfatni aerosol	16%	23% (podijeljeno sa izvorima sagorijevanja uglja)	21%	9%	18%	5%
Faktor: Sekundarni nitratni aerosol	14% (podijeljeno sa izvorima sagorijevanja fosilnih goriva)	10%	14%	24% (podijeljeno sa izvorima sagorijevanja fosilnih goriva)	8%	24%

Tabela 22: Usaporedba faktora nastajanja sekundarnih aerosola

Mjesto uzimanja uzoraka u Brodu pokazalo je jedan faktor koji značajno ukazuje na amonij i koji objašnjava oko 80% cjelokupnog izmjerenoog amonijaka. Ovaj faktor bi se mogao nazvati spontanim primarnim amonijem zbog ovog jakog i izolovanog signala. Doprinos tog faktora u  $\text{SO}_4^{2-}$  - čini se zanemarivim. Međutim, čini se da je relativna koncentracija  $\text{SO}_4^{2-}$  - slična onoj unutar signala sekundarnih sulfatnih aerosola prikazanih za druga mjesta poput Zenice.

Stoga je moguće da je jaka emisija sulfata, specifična za lokaciju Broda, a vezana uz tešku naftu, ujednačila doprinos sulfata u ovom prvom faktoru koji bi inače bio mnogo veći. Zato se ovaj prvi faktor naziva primarnim sulfatnim faktorom, čak i ako se čini da je njegov doprinos za  $\text{SO}_4^{2-}$  zanemariv.

### Sagorijevanje biomase

Sagorijevanje biomase je važan izvor PM 2.5 čestica u regiji Balkana i često je povezano sa zastarjelim pećima, niskotemperaturem ložištima, vlažnim i tvrdim drvima. Klasični signali sagorijevanja biomase pri pokretanju PMF modela mogu biti udjeli OC i  $\text{K}^+$  zajedno s anhidrošećerom poput levoglukozana, manozana i galaktozana. Sagorijevanje biomase također često pokazuje doprinos EC, ali uvjek s manjim doprinosom nego OC.

Značajno je naglasiti da je najčešće drvo koje se loži u BiH bukva i da izgaranje tog drveta emituje 10 puta manje levoglukozana po masi izgorjelog drveta od ostalih tvrdih drva poput hrasta (Collet S, 2016). Osim toga, u Poljskoj je pokazano da izgaranje uglja (posebno lignita) može proizvesti prilično visok signal levoglukozana, za razliku od manozana i galaktozana (Rybicki, 2020.). Budući da u BiH djeluje nekoliko rudnika lignita i aktivno tržište lignita (Eurostat, 2021.), oni su uobičajeni izvor energije čak i u pojedinačnim domaćinstvima, a posebno u gradovima. Međutim, različite politike i programi poticaja provedeni tokom posljednje dekade doprinijeli su progresivnom brzom promovisanju grijanja biomasom, a posebno korištenjem peleta.

Zbog ova dva gore spomenuta specifična razloga, levoglukozan nije odabran kao primarni pokazatelj sagorijevanja biomase, već je umjesto toga odabran manozan budući da je usko povezan sa sagorijevanjem biomase.

U tabeli ispod naveden je prosječni udio izgaranja biomase, a navedena su i sedmična povećanja. U nekim slučajevima može se vidjeti da se ovi usponi podudaraju s niskim temperaturama, što bi trebalo imati smisla jer se povećava potreba za grijanjem. Međutim, to nije uvijek slučaj i postoje i drugi meteorološki faktori osim temperature koji mogu utjecati na udio faktora, kao što su događaji atmosferskih inverzija, obrasci vjetra i padavine.

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
Faktor: sagorijevanje biomase	27%	34%	54% (zajedno sa izvorima sagorijevanja uglja)	19%	36%	44% (zajedno sa izvorima sagorijevanja uglja)
Period uspona (broj sedmica)	48, 49, 51, <b>52</b>	49, 51, <b>52</b>	48, <b>52</b> , 3	48, <b>52</b> , 3	<b>52</b> , <b>53</b> , 1	<b>52</b> , <b>53</b> , 1, 2
Period sa temperaturama blizu ili ispod 0°C (broj sedmica)	48, 49, 51, <b>2</b> , <b>3</b> , <b>4</b>	<b>48</b> , 49, 51, <b>2</b> , <b>3</b> , <b>4</b>	<b>48</b> , <b>49</b> , <b>51</b> , <b>2</b> , <b>3</b> , <b>4</b>	<b>48</b> , <b>49</b> , <b>2</b>	<b>48</b> , <b>49</b> , <b>2</b>	<b>49</b> , 2, <b>3</b>
				Važnost negorivog izvora specifičnog za lokaciju u Banjoj Luci vjerojatno je ujednačila veličinu faktora gorenja biomase zbog neobične protuteže nesagorijevanja.		

Tabela 23: Poređenje faktora biomase

### Sagorijevanje fosilnih goriva

Faktor sagorijevanja fosilnih goriva karakteriše veći doprinos EC nego OC i generalno nizak doprinos K<sup>+</sup>. Glavni izvori čestica porijekлом iz fosilnih goriva u BiH su mrki ugalj i lignit, u elektranama i daljinskom grijanju ili individualnom grijanju domaćinstava, zajedno s dizelskim i benzinskim motorima. Raspon izmјerenih parametara ne dopušta jasno razlikovanje izvora koji koriste ugalj od izvora koji koriste tekuća goriva osim ako se njihove hronološke serije vrijednosti međusobno ne razlikuju. Očekuje se da će izvori sagorijevanja uglja imati svoje vrhunce vezano uz najhladnije periode, dok se tokom vikenda očekuje smanjenje izvora

izduvnih gasova iz saobraćaja. Sagorijevanje goriva za potrebe grijanja je, međutim, uobičajeno u BiH, što je dodatno otežalo izolaciju izduvnih gasova iz saobraćaja.

Iz tih razloga model često nije uspijevao odvojiti izvore koji potiču iz fosilnih goriva od drugih izvora. Stoga je analiza podijeljena i raspoređena u donjoj tabeli kako bi se lakše poredila temeljna načela.

Kada faktor ima značajan udio  $\text{SO}_4^{2-}$  tada je razumno sumnjivo gorivo mrki ugalj ili lignit (Prcanović, 2018).

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
Sagorijevanje fosila (mrki ugalj/lignit)		23% (zajedno sa sekundarnim sulfatnim aerosolima)	54% (zajedno sa izgaranjem biomase)	24% (zajedno sa sekundarnim nitratnim aerosolima)	36%	

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
		<p>Visok doprinos <math>\text{NH}_4^+</math> i <math>\text{SO}_4^{2-}</math> što ukazuje na sekundarni izvor sulfatnog aerosola.</p> <p>Ali vremenska serija pokazuje uspone povezane s najhladnjim sedmicama, a faktor također doprinosi povećanju EC-a.</p> <p>Iz tih razloga se sumnja da je ovaj faktor mješavina izgaranja uglja i sulfatnog aerosola.</p>	<p>Vrlo visok doprinos bezvodnom šećeru i OC sugeriše izvor izgaranja biomase.</p> <p>Ali vrlo visok doprinos EC-u pokazuje da izvori koji spaljuju fosilna goriva također čine veliki dio, vjerovatno oko ½.</p> <p>Vremenska serija prikazuje prilično konstantan izvor (nema značajnih usponu, maksimalna vrijednost je bila 3%)</p> <p>Polarni prikaz prikazuje širenje iz smjera univerziteta i brdskih naselja.</p>	<p>Visok doprinos <math>\text{NO}_3^-</math> sugerišu sekundarni izvor aerosola nitrata.</p> <p>Ali značajan doprinos EC-u u kombinaciji s nedostatkom drugih mogućih faktora sugeriše da je izvor izgaranja fosilnih goriva uklapljen u ovaj faktor.</p>	<p>Značajan doprinos u EC prema <math>\text{SO}_4^{2-}</math> i As što sugeriše izvor sagorijevanja uglja.</p> <p>Vremenska serija prikazuje prilično konstantan izvor.</p> <p>Polarni prikaz prikazuje širenje uglavnom iz smjera grada.</p>	

Tabela 24: Poređenje faktora sagorijevanja fosilnih goriva (mrki ugalj/lignite)

Sagorijevanje fosilnih goriva i saobraćaj	23%	20%				
	Visok udio EC značajan za metale i bezvodne šećere suggerira i izduvne i neizduvne izvore saobraćaja. Vremenske serije pokazuju ponavljajući trend pada tokom vikenda. Polarni prikaz pokazuje veliko širenje izvora.	Visok udio EC i značajno visok odnose prema vrijednosti As suggeriše i izduvne i neizduvne izvore saobraćaja. Vremenske serije pokazuju ponavljajući trend pada vikendom. Polarni prikaz pokazuje širenje u smjeru od glavnih naselja uz vjetar.				

Tabela 25: Poređenje faktora sagorijevanja fosilnih goriva i saobraćaja

### Primarni sulfat koji nastaje sagorijevanjem teškog ulja u Brodu

Primarni sulfat koji nastaje sagorijevanjem teškog ulja objašnjava oko 80% cjelokupnog  $\text{SO}_4^{2-}$  i mali dio EC. Taj oblik rezultata, s vrlo niskim  $\text{K}^+$  i niskim OC, u skladu je s onim koji se zove "sagorijevanje petrohemiske i teške nafte u prigradskim naseljima" u bazi podataka SpecieEurope (JRC, 2017.). Prijeklo tog faktora vjerovatno je u velikoj mjeri iz rafinerije koja se nalazi južno od mjesta uzimanja uzorka, ali može biti i iz nekih toplana u Brodu i susjednom hrvatskom gradu Slavonskom Brodu (Jeričević, 2019.). Također se iz polarnog grafikona može vidjeti da se visoke koncentracije ovog faktora često poklapaju s vjetrovima koji dolaze s juga, gdje se nalazi rafinerija. Međutim, važno je naglasiti da je rafinerija imala vrlo nisku aktivnost tokom razdoblja uzorkovanja i posljednje dvije godine. Ovaj faktor ima značajan udio od 21% ukupnog PM 2.5.

### Zemljišna prašina

Faktor zemljišne praštine okarakterisan je ponavljajućim značajnim udjelom koncentracije As. U ovoj studiji između 30% i 60% ovog elementa obično se objašnjava faktorom zemljišne praštine. Vrijedi napomenuti da središnji dio Balkanskog poluotoka pokazuje složenu geologiju i

ima određene geološke formacije i rudna ležišta bogata As (Tervainen T, 2013). U tom kontekstu rudarska jalovina, infrastrukturni zemljivođi radovi i resuspenzija zemljane prašine mogu biti neki direktni izvori čestica sa značajnom količinom As. Također, metalurške i električne elektrane koje prerađuju takvu rudu mogu biti neki važni izvori As koji se adsorbira na ispuštene čestice. Stoga se As koristi u ovoj studiji kao pokazatelj prašine tla i resuspenzije tla.

Čini se da je ovaj faktor često izazvan nekim lokalnim i povremenim izvorima koji mogu značajno varirati ovisno o lokaciji uzimanja uzorka i mjestu. Ovi oblaci faktora prašine u tlu prikazani su u hronološkim serijama nekim iznenadnim porastima, a na polarnim dijagramima nekim preferiranim smjerom vjetra s kontrastnim udjelima.

	Sarajevo	Tuzla	Zenica	Banja Luka	Bijeljina	Brod
Faktor: Zemljivođna prašina	8%	13%	6%	23%	2%	6%
	Vjerovatno zbog dva neobična, ali neidentifikovana događaja u blizini, a inače zbog ponovnog obustavljanja saobraćaja.	Vjerovatno ga pokreće jedan značajan izvor koji se ne nalazi u blizini mjesta uzorkovanja.	Vjerovatno zbog ponovne obustave saobraćaja.	Vjerovatno ga pokreće nekoliko značajnih izvora koji se ne nalaze u blizini mjesta uzorkovanja.		Vjerovatno zbog obližnje ceste.

Tabela 26: Poređenje faktora zemljivođne prašine

## Ostali faktori

### Faktor industrije u Zenici i Banjoj Luci:

Faktor industrije objašnjava oko 80% mangana. Taj je metal nekada bio povezan s metalnom industrijom, naročito kada nije bio karakteristika tla u blizini lokacije. Polarni grafikon iz Zenice pokazuje specifičan oblik za sjeverozapadne vjetrove, a područje industrijske čeličane se nalazi 1,5 km uz vjetar. Za Banju Luku, kombinacija hronološke serije i polarnog grafikona omogućuje zaključak za opštu pozadinu koju karakteriše nekoliko koncentrisanih događaja u toku dva pojedinačna dana a od kojih svaki objašnjava po 12% od tog faktora. Međutim, nije moguće navesti konkretan izvor. Udio industrijskog metalnog faktora u cijelom PM 2.5 je samo oko 5% kako u Banjoj Luci tako i u Zenici.

### Faktor porasta sadržaja kadmija u Sarajevu:

Jedan faktor među potvrđenim modeliranim rješenjima objašnjava oko 90% kadmija izmijerenog tokom razdoblja. Udio faktora porasta kadmija u cijelom PM 2.5 prilično je visok i doseže 12%. I hronološka serija i polarni grafikon pokazuju da bi glavne izvore trebalo povezati s dva događaja krajem novembra i sredinom decembra, pri čemu bi jedan jedini dan objašnjavao 10% tog faktora. Čini se da su oba izolovana događaja blisko povezana s faktorom

zemljane prašine. Mogući izvor može biti neka izolovana vatra miješanih materijala u blizini u to vrijeme ili neki češći izvori kao što je izgaranje fosilnih goriva (Huremović, 2020), ali posljednje otežava objašnjenje porasta vrijednosti.

#### **Faktor porasta prisustva kadmija u Zenici:**

Jedan faktor utvrđen pomoću validirane modelirane otopine objašnjava oko 80% kadmija izmjerenoj tokom razdoblja. Kombinacija nekoliko porasta u hronološkoj seriji i generalno žutih polarnih grafikona omogućava zaključak za opštu pozadinu obogaćenu s nekoliko koncentrisanih događaja koji dolaze iz dva uža mjesta smještena na zapadu-sjeverozapadu od mjesta uzimanja uzorka. Međutim, nije moguće istaknuti konkretan izvor. Udio kadmij faktora u cijelom PM 2.5 je samo oko 3% u Zenici.

#### **Izraženo prisustvo kalija u Banjoj Luci:**

Faktor izraženog prisustva kalija objašnjava oko 60% kalija, dok sagorijevanje biomase objašnjava samo 20% kalija. Kombinacija hronološke serije i polarnog grafikona omogućava zaključak da postoji prilično kontinuiran izvor u pozadini, ali koji se razlikuje od faktora gorenja biomase. Postoji značajna korelacija između faktora kalija i faktora zemljишne prašine, koji su vjerovatno povezani sa sličnim vremenskim nizom udjela barem u novembru i decembru. Vrijedno je razmotriti spajanje ova dva faktora u jedan faktor zemljишne prašine. Ali faktor zemljишne prašine predstavlja već 23% modeliranog PM 2.5 i stoga je sumnivo dodati faktor bogat kalijem koji predstavlja 20% modeliranog PM 2.5. Nije moguće osim dodatnim informacijama ili mjerjenjima ukazati na konkretan izvor te količine kalija u Banjoj Luci.

#### **Diskusija o mjernoj kampanji 2020-2021**

Sekundarni aerosoli uzimaju veliki dio izmjerenoj PM2.5. Zajedno, aerosoli sekundarnog sulfata i sekundarnog nitrata predstavljali su između 20% i 35% izmjerenih PM2.5. Ovi aerosoli su produkti prirodne atmosferske oksidacije prekursora koji se emituju uglavnom antropogenim aktivnostima ( $\text{NH}_4$  poljoprivredom,  $\text{NO}_x$  svim vrstama sagorijevanja i  $\text{SO}_2$  sagorijevanjem uglja). Budući da ova transformacija traje između nekoliko sati i nekoliko dana, može se smatrati da sekundarni aerosoli potiču iz područja i regija udaljenih od mjesta uzorkovanja. Međutim, doprinos lokalnih sekundarnih aerosolnih emisija bi također bio moguć tokom epizoda temperturnih inverzija. Ovi stabilni atmosferski uslovi ograničavaju kretanje vazdušnih masa preko područja i podstiču akumulaciju lokalnih izvora emisije kao i njihovu transformaciju na licu mesta.

Emisije izgaranjem biomase poput drva, peleta ili žbunja također predstavljaju veliki dio PM2.5. Čini se da je udio grupe izvora sagorijevanja biomase veći u malim gradovima, gdje predstavlja oko 35% PM2.5, nego u većim gradovima, gdje predstavlja između 19% i 25%. Ovo bi moglo biti povezano s većim dijelom drugih lokalnih izvora koji smanjuju relativni dio sagorijevanja biomase. To mogu biti veće opterećenje saobraćaja u zoni uzorkivača, češće korištenje sagorijevanja uglja za grijanje stanova u većim nego u malim gradovima itd.

Zbog ograničenog broja izmjerениh vrsta dobijenih hemijskom analizom, dio PM2.5 koji se emituje izgaranjem fosilnih goriva (ugalj, mrki ugalj, dizel, benzin) teško je odvojiti od nekih drugih grupa izvora. U ovoj studiji oni se često miješaju u rezultatima sa drugim vrstama izvora kao što su sekundarni aerosoli i sagorijevanje biomase. Međutim, moguće je reći da je doprinos sagorijevanja uglja i lignita ambijentalnom PM2.5 između 14% i oko 25% i da se u nekoliko slučajeva može odnositi na velike instalacije daljinskog grijanja ili industrijske instalacije u susjednim područjima.

Dio PM2.5 koji se ispušta iz vozila izolovan je samo za Tuzlu i uključuje i izduvne i ne-izduvne emisije. Doprinos saobraćaja ambijentalnom PM2.5 je oko 20% u ovim rezultatima.

Udio PM2.5 koji se odnosi na prašinu tla koji se prirodno emituje ili resuspendira ljudskom aktivnošću, uvijek je identificiran. Doprinos tla ovisio je o lokaciji uzorkovanja i varirao je između 2% i 13%. Jedna lokacija za uzorkovanje čestica u Banjoj Luci, međutim, ima rezultat uglavnom u rasponu sa doprinosom zemljишne prašine koji je u velikoj mjeri poremećen značajnim izvorom neorganskih čestica koje nije bilo moguće objasniti nakon mjerne kampanje 2020-2021.

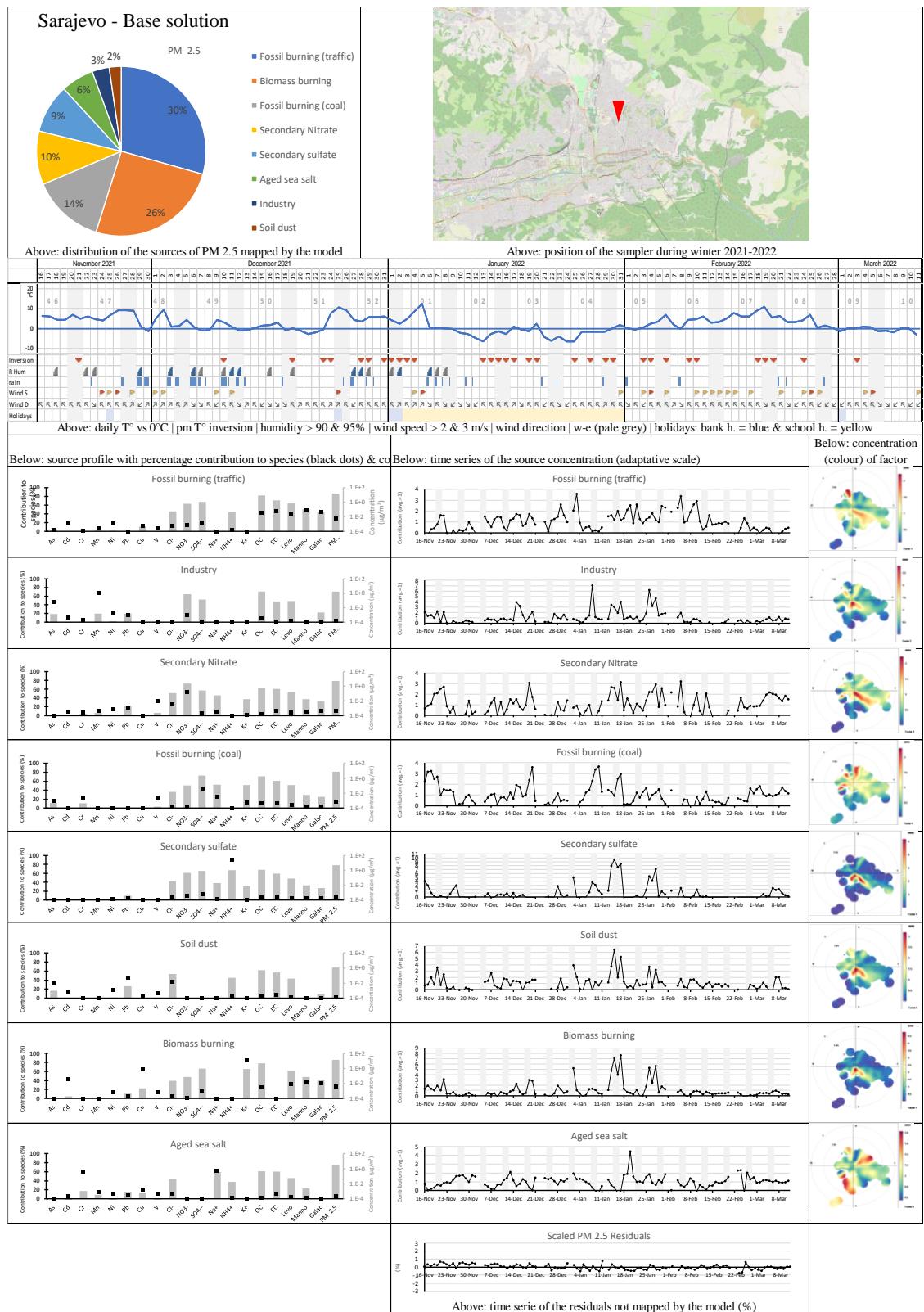
Ukupna masa svih izmjerениh vrsta predstavlja oko 60% ukupne mase uzorkovanog PM2.5. Ovaj omjer je uobičajen za vrstu analize koja se koristi. To znači da su neke vrste koje nisu izmjerene, ali koje su imale značajan dio ukupnog PM2.5 - poput kalcija, silicija, željeza, aluminija - bile ravnomjerno raspoređene u svim raspoređenim izvorima. Ali budući da su ove vrste više povezane sa faktorom prašine u zemljишtu nego sa ostalim faktorima, stoga je vjerovatno da izvor zemljишne prašine ima veći udio PM2.5 nego što je izračunao PMF. Vjerovatno se čak može udvostručiti i shodno tome smanjiti udjele drugih izvora. Rezultate treba tumačiti imajući to na umu.

Konačno, sa ciljem da se zaključi sa zadovoljavajućim analitičkim mjeranjem, partneri su se dogovorili da se sprovede druga kampanja uzorkovanja tokom zime 2021-2022, sa drugačijim tehničkim aranžmanima nego tokom zime 2020-2021. Ovi novi aranžmani imali su za cilj da dobiju širi raspon mjerenih vrsta, a time i preciznije rezultate PMF modela. Ova kampanja je sprovedena u Sarajevu i Banja Luci, gdje je model receptora imao najviše poteškoća da riješi kvalitetnu raspodjelu izvora. Njihova vrlo složena urbana i topografska okruženja, posebno u Sarajevu, zahtijevaju izuzetno precizne podatke da bi PMF model proizveo pouzdane rezultate.

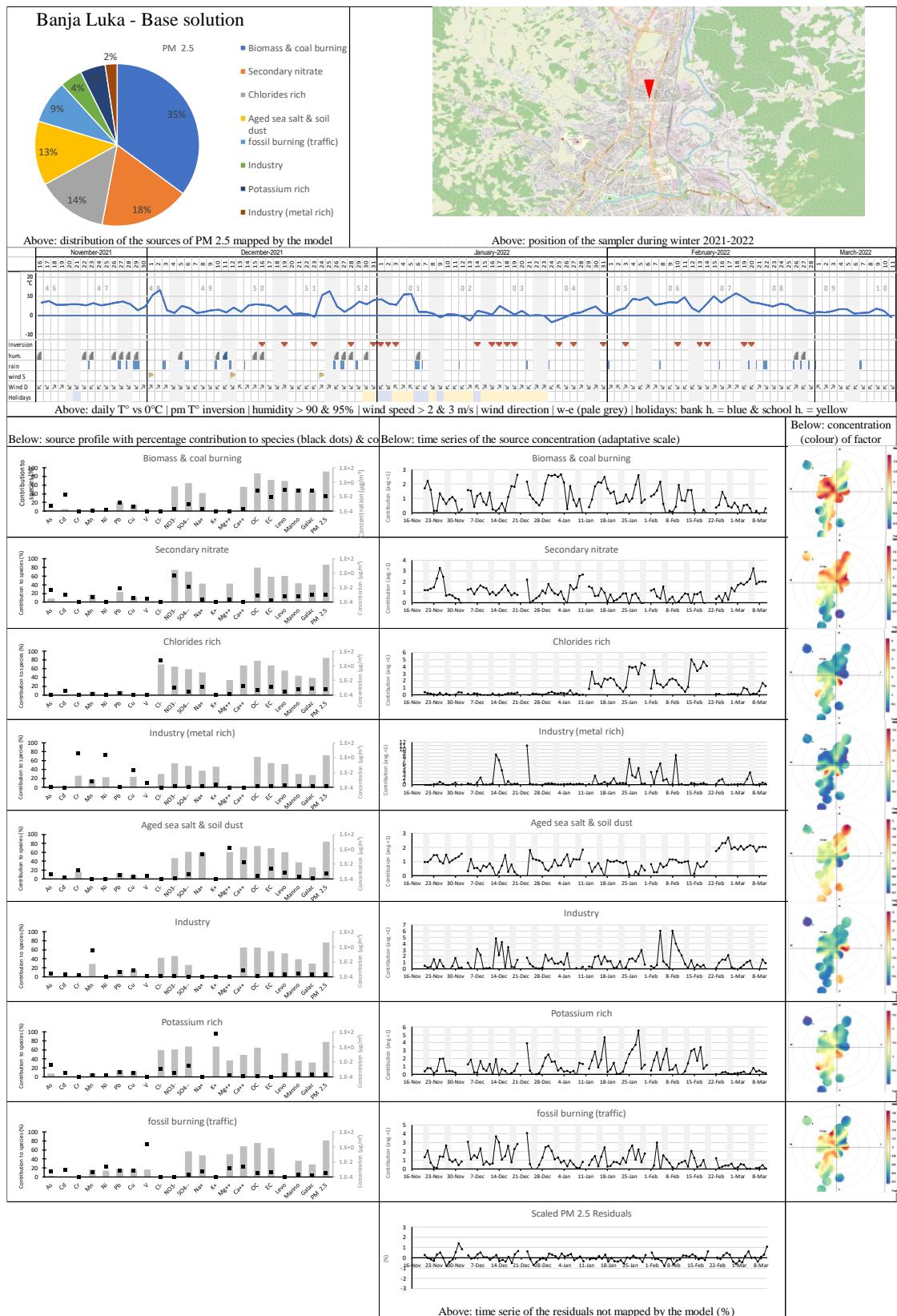
### **Identifikacija različitih izvora – kampanja 2021-2022**

U nastavku su prikazi za Sarajevo i Banju Luku.

## Sarajevo – osnovno rješenje, zima 2021/2022



## Banja Luka - osnovno rješenje, zima 2021/2022



## **Sagorijevanje fosilnih goriva**

Širi raspon mjerena u periodu 2021.-2022. dopušta razlikovanje dva izvora sagorijevanja fosilnih goriva u Sarajevu. Međutim, samo jedan izvor sagorijevanja fosilnih goriva je izdvojen među ostalima u Banjoj Luci.

Faktor sagorijevanja fosilnih goriva iz saobraćaja u Sarajevu karakterizira veći doprinos EC nego OC. Aktivnost tog izvora pruža dodatne informacije o izvoru sa obje vremenske serije koje ukazuju na više nivoa tokom radnih dana nego tokom vikenda, i sa polarnom grafikom koja ukazuje na dva značajna izvora NW i SE uzorkovača, što je u skladu sa pozicijom glavnih puteva u blizini.

Faktor sagorijevanja fosila iz uglja u Sarajevu karakterizira značajan doprinos  $\text{SO}_4^{2-}$ . Vremenska aktivnost tog izvora pokazuje dobro slaganje između njegovih vrhova i tri perioda sa negativnim temperaturama tokom 51., 2., 3., 9. i 10. sedmice. Polarni grafikon prikazuje žuto polje u svakom smjeru sa malom brzinom vjetra što sugerira da je nekoliko izvora raspoređeno oko tačke uzorkovanja.

Faktor sagorijevanja fosila iz saobraćaja u Banjoj Luci karakteriše visok doprinos vanadijuma (V) za koji se smatra da je indikacija sagorijevanja teškog ulja i dizela (Pitiranggon, 2021). Vremenski obrazac, međutim, ne ukazuje na jasnu aktivnost u radnom danu. Polarni grafikoni ponovo pokazuju da su izvori emisije ovog faktora rasprostranjeni oko mjesta uzorkovanja. Stoga se vjeruje da je ovaj faktor povezan sa saobraćajem, a dio je vjerovatno povezan sa sagorijevanjem ulja za potrebe grijanja.

Količina izvora fosilnog sagorijevanja u ukupnim finim česticama u Banjoj Luci je neočekivano niska (samo 9%), dok je sagorijevanje biomase veoma veliko (35%) u poređenju sa rezultatima kampanje 2020-2021 (19%). Stoga je razumno vjerovati da je dio izvora sagorijevanja fosila koji se odnosi na sagorijevanje uglja zapravo pomiješan sa faktorom sagorijevanja biomase. Dio od 35% na dijagramu na prethodnoj stranici je stoga označen kao "sagorijevanje biomase i uglja".

Ukupna količina sagorijevanja fosila modelirana za Sarajevo je mnogo veća za zimu 2021-22 nego za zimu 2020-21. Glavne razlike između dvije zime bile su mnogo duži period inverzije tokom druge zime koji je zadržavao zagađenje blizu nivoa tla i normalnija antropogena aktivnost tokom druge zime nego ranije, kada su oštira ograničenja vezana za pandemiju Covid-19 uticala na zajednicu.

Takav trend nije moguće uočiti za Banju Luku jer je faktor sagorijevanja fosila pomiješan sa faktorom sekundarnih nitratnih aerosola za zimu 2021-22. Dakle, nije moguće reći da li je izvor sagorijevanja fosila između dvije zime u Banjoj Luci povećan ili smanjen.

Lokalitet:	Sarajevo			Banja Luka	
Zima:	2020-2021		2021-2022	2020-2021	
Faktori:	Sagorijevanje fosilnih goriva i saobraćaj 30% 23% [13,5 µg/m³]	Fosilna goriva (saobraćaj) [15,3 µg/m³] Fosilna goriva (ugalj) 14% [7,2 µg/m³]		Sagorijevanje fosilnih goriva i sekundarni nitratni aerosoli 9% [7,7 µg/m³]	
Razlog u skladu sa otiskom: – Vremenske serije: – Polarni grafikon:		<u>Fosilna goriva (saobraćaj):</u> Visok doprinos EC i značajan za metale i bezvodne šećere sugerije i izduvne i ne-izduvne izvore saobraćaja.  <u>Vremenske serije:</u> pokazuju stalni opadajući trend tokom vikenda.  <u>Polarni grafikon:</u> precizira pravce u skladu sa pravcem prema glavnim putevima.  <u>Fosilna goriva (ugalj):</u> Visok doprinos $\text{SO}_4^{2-}$ zajedno sa značajnim doprinosom EC sugerise izvor sagorevanja uglja.  Vremenska serija prikazuje više pikove u isto vrijeme kada su temperature ispod nule °C.  Polarni prikaz pokazuje opće širenje izvora svuda unaokolo.		Visok doprinos V za koji je dogovoren da bude potpis sagorijevanja teškog ulja i dizela.  Vremenske serije pokazuju ponavljajući opadajući trend tokom vikenda (pokazuju na izvor saobraćaja), ali i neke pikove u isto vrijeme kada temperature ispod nule °C (pokazuju prema izvoru grijanja).  Polarni prikaz pokazuje opće širenje izvora svuda unaokolo.	

Tabela 27: Ukupno poređenje faktora sagorijevanja fosila

### Sagorijevanje biomase

Važno je napomenuti da je za ovu drugu analizu testirana metoda identifikacije temperaturnih inverzija. RHMZ je od 10. decembra sproveo dnevnu analizu SkewT dijagrama (modelirane temperature na različitim nadmorskim visinama prema meteorološkim modelima). FHMZ je koristio jednostavniji pristup mjerena za identifikaciju inverzije, upoređujući temperature u

nivou tla na različitim nadmorskim visinama, u gradu i na brdima. Ove metodologije su pomogle da se identifikuju moguće epizode inverzije u popodnevnim satima svakog dana, što je na grafikonima predstavljeno crvenim trouglom okrenutim nadole. Izvanredno je kako se nivo PM 2.5 odnosi na neke lokalne izvore jer se čini da se sagorijevanje biomase povećava kada postoji niz dana sa popodnevnom temperaturnom inverzijom.

Faktor sagorijevanja biomase je uvijek bio izolovan, i za zimu 2020-21 i 2021-22. To je bilo moguće zahvaljujući kombinaciji tragača OC i K<sup>+</sup> zajedno sa bezvodnim šećerom poput levoglukozana, manozana i galaktozana. Razlika za zimu 2021-22 je u tome što je skup podataka bio dovoljno širok i dugačak da dovede do stabilnog i pouzdanog rješenja modela bez ikakvih ograničenja na manozanu da bi se odredio faktor biomase.

Faktor sagorijevanja biomase u Sarajevu karakterizira kombinacija OC, K<sup>+</sup> i bezvodnih šećera. Izvor je diskontinuiran i koincidentan sa hladnim događajima što ukazuje na izvore uređaja za grijanje. Polarni dijagram prikazuje tačku, što znači da su izvori bili aktivni u tom području tokom perioda sa mirnim vjetrom.

Faktor sagorijevanja biomase u Banjoj Luci karakterizira isti tip otiska. Međutim, još jedan faktor nazvan "izraženo prisustvo kalija" zahvatio je tu određenu K<sup>+</sup> vrstu. Taj izvor je prilično konstantan za Banju Luku i mnogo veći (35%) u posljednjoj zimi 2021-22 nego što je ranije procijenjeno tokom zime 2020-21 (19%). Ova razlika zajedno sa odsustvom K<sup>+</sup> u signalu sugerira da se faktor biomase u 2021-22. može pomicati s drugim faktorom za grijanje kao što je fosilni ugalj koji inače nije prisutan.

Lokalitet:	Sarajevo		Banja Luka	
Zima:	2020-2021		2020-2021	
	2020-2021	2021-2022	2020-2021	2021-2022
Faktori:	Sagorijevanje biomase 26% [16,1 µg/m <sup>3</sup> ]	Sagorijevanje biomase 27% [13,3 µg/m <sup>3</sup> ]	Sagorijevanje biomase 19% [13,3 µg/m <sup>3</sup> ]	Sagorijevanje biomase & sagorijevanje uglja 35% [31,6 µg/m <sup>3</sup> ]

Lokalitet:	Sarajevo		Banja Luka	
Zima:	2020-2021	2021-2022	2020-2021	2021-2022
Razlog u skladu sa otiskom: – Vremenske serije: – Polarni grafikon	Značajan doprinos OC i K <sup>+</sup> zajedno sa značajnim doprinosom bezvodnim šećerima sugerije izvore sagorijevanja biomase. Vremenska serija prikazuje više pikova u isto vrijeme kada su temperature bile ispod nule °C što ukazuje na izvor grijanja. Polarni prikaz sa glavnim doprinosom centralne tačke sugerije lokalni izvor koji je aktivan uglavnom u danima bez vjetra.		Visok doprinos OC zajedno sa značajnim doprinosom bezvodnih šećera ukazuju na izvore sagorijevanja biomase. K <sup>+</sup> nedostaje u ovom otisku, ali Banja Luka je izuzetna po još jednom faktoru, izraženo prisustvo kalija koji hvata K <sup>+</sup> na štetu drugog. Vremenske serije, čak i ako su prilično kontinuirane (između 0 do 3%), pokazuju slaganje pikova sa vremenom kada su temperature bile ispod nule °C (pokazuje prema izvoru grijanja). Polarni prikaz pokazuje opću rasprostranjenost izvora svuda okolo što se slaže sa hipotezom kućnog grijanja.	

Tabela 28: Ukupno poređenje faktora sagorijevanja biomase

### Sekundarni aerosoli

Sekundarni aerosoli su identifikovani korištenjem istih vrsta kao referentnih kada je to bilo moguće (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nije dovoljno detektovan u Banjoj Luci da bi se koristio).

Faktor za sekundarne nitratne aerosole karakteriše visok doprinos tog faktora NO<sub>3</sub><sup>-</sup> i razdvajanje sa periodima inverzije. Vidljivo je na oba mesta gdje se pikovi javljaju na početku i na kraju perioda mjerena i općenito kada nije bilo inverzijskih situacija. Budući da su sekundarni nitrati proizvod hemijske atmosferske transformacije, smatra se da se njihovi izvori nalaze na značajnoj udaljenosti od mjesta uzorkovanja. To je vidljivo kroz polarne grafike koje prikazuju pozadinu, a uglavnom dolaze iz sjevernih sektora gdje se nalazi većina antropogenih izvora, kako u Sarajevu (Tuzla, Brčko i Hrvatska) tako i u Banjoj Luci (Hrvatska).

Faktor sekundarni sulfatni aerosol karakteriše visok doprinos i SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> i NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Literatura i rezultati iz prethodne kampanje pokazali su da je ovaj faktor proizvod hemijske transformacije atmosfere bilo putem dalekosežnog transporta ili akumulacije iz lokalnih izvora sagorijevanja uglja pod visokom vlagom i temperaturnim inverzijama. Taj faktor je bilo moguće razlikovati samo u Sarajevu i njegove vremenske serije pokazuju prilično dobar odnos njegovih vrhunaca sa epizodama inverzije. Čini se da ovdje dominiraju manje-više lokalni izvori.

Ukupna količina sekundarnih organskih aerosola (SOA) je slična između dva mesta za zimu 2020-21, kao i za zimu 2021-22. Ali postoji značajan pad između dvije zime u pogledu

sekundarnih nitrata. Međutim, to smanjenje se može objasniti jer se vjerovalo da su sekundarni nitratni aerosoli pomiješani s faktorom sagorijevanja fosila za zimu 2020-21. i da su bolje razlikovani nakon druge kampanje mjerena tokom zime 2021-22.

Lokalitet:	Sarajevo		Banja Luka	
Zima:	2020-2021		2020-2021	
	2021-2022		2021-2022	
Faktori:	Sekundarni nitratni aerosoli 14% (uz sagorijevanje iz fosilnih izvora) [8,1 µg/m <sup>3</sup> ]	Sekundarni nitratni aerosoli 10 % [5,3 µg/m <sup>3</sup> ]	Sekundarni nitratni aerosoli 24% (uz sagorijevanje iz fosilnih izvora) [16,8 µg/m <sup>3</sup> ]	Sekundarni nitratni aerosoli 18% [15,8 µg/m <sup>3</sup> ]
	Sekundarni sulfatni aerosoli 16% [9,7 µg/m <sup>3</sup> ]	Sekundarni sulfatni aerosoli 9 % [4,8 µg/m <sup>3</sup> ]	Sekundarni sulfatni aerosoli 9% [6,7 µg/m <sup>3</sup> ]	– – % [– µg/m <sup>3</sup> ]
Razlog u skladu sa otiskom: — Vremenske serije: — Polarni grafikon:	Značajan doprinos faktora NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> u vezi sa sekundarnim nitratom inače u paru NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> i SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> u pogledu sekundarnog sulfata. Vremenska serija pokazuje jači doprinos sekundarnog nitrata kada nije bilo značajne temperaturne inverzije. Vremenska serija sekundarnog sulfata prikazuje nasuprot tome jači vrh paralelno sa epizodama inverzije. Polarni grafikoni povezani sa sekundarnim nitratom prikazuju opštu pozadinu iz sjevernog sektora uskladenu sa disperzijom dugog dometa, dok je polarni dijagram povezan sa sekundarnim sulfatnim prikazom lokalnog izvora sa malom brzinom vjetra u skladu s atmosferskom situacijom inverzije.			Značajan doprinos faktora NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> u vezi sa sekundarnim nitratom. Sekundarni sulfatni aerosoli nisu identificirani vjerovatno zato što NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> nije dovoljno često otkriven hemijskom analizom. Vremenska serija prikazuje jači doprinos sekundarnog nitrata kada nije bilo značajne temperaturne inverzije (tj. na početku i na kraju perioda mjerena). Polarni dijagrami povezani sa sekundarnim nitratom prikazuju opštu pozadinu iz sjevernog sektora uskladenu sa disperzijom dugog dometa.

Tabela 29: Ukupno poređenje faktora sekundarnih aerosola

## Faktor odležale morske soli

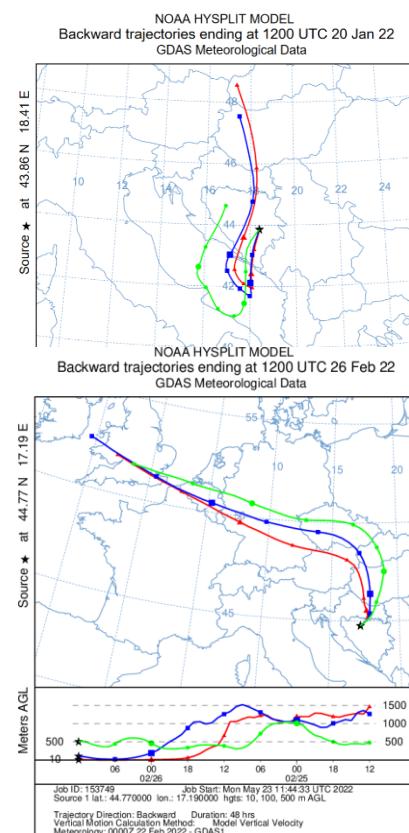
Faktor odležale morske soli nije bilo moguće razlikovati za zimu 2020-21 jer ni  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  ni  $\text{Mg}^{2+}$  nisu izmjereni u dovoljno visokoj rezoluciji. Tokom zime 2021-22, a nakon promjena u analitičkoj metodi, ovi joni su bili dovoljno zastupljeni u mjerjenjima da bi mogli razlikovati taj faktor.

Faktor odležale morske soli karakteriše značajan doprinos  $\text{Na}^+$  kao i  $\text{Mg}^+$ . U vremenskom okviru od njegove proizvodnje na moru i detekcije na kopnu, većina  $\text{Cl}^-$  teži da se kombinuje sa drugim vrstama pod atmosferskim hemijskim reakcijama i više nije značajan u rezultatima merenja (Xu, 2021).

Kako bi se osigurala ispravna identifikacija faktora odležale morske soli, neke su putanje unatrag izračunate pomoću Hysplit modela iz NOAA. Povratak od datuma viših pikova za ovaj faktor pokazuje da su visoki pikovi odležale morske soli često povezani sa sekvencama jakih vjetrova/oluja koje se dešavaju bilo iznad Sjevernog Atlantika ili Sredozemnog mora.

Mape povratka pored prikazuju tačku na svakih 6 sati položaja zračne mase sa povratnim putanjama izračunatim iz pozicije (crna zvijezda) u 12:00 sati 20. januara u Sarajevu (gornja slika) i u Banjoj Luci 26. februara (donja slika). Razmatraju se tri različite zračne mase: na nivou tla (crveno), na 10 metara visine (plavo) i na 500 metara visine (zeleno).

To pokazuje da je viši pik odležane morske soli u Sarajevu 20. januara vezan za zračnu masu koja je tranzitirala cijeli dan iznad Jadranskog mora u olujnim uvjetima (oluja Elpis) samo 10 sati prije nego što je stigla iznad Sarajeva.



Inače pokazuje da je pik odležane morske soli u Banjoj Luci 26. februara bio povezan sa zračnom masom koja je prilično brzo putovala preko sjeverne Evrope sa sjevernog Atlantika sa umjerenim vertikalnim kretanjem od 1000-1500m.

Viši pik je tada bio vezano za vazdušnu masu koja je bila iznad površine Atlantika, u olujnim uslovima (oluja Eunice), 2 dana prije dolaska iznad Banje Luke.

Drugi proračuni povratka također su provedeni kao negativna kontrola i pokazali su da su se dani manjeg doprinosa odležale morske soli poklopili s zračnom masom koja je dolazila iz kontinentalnih područja.

Lokalitet:	Sarajevo		Banja Luka	
Zima:	2020-2021		2020-2021	
Faktori:		Odležana morska sol 6% [3,3 µg/m³]		Odležana morska sol (sa izvorima zemljane prašine) 13% [11,4 µg/m³]
Razlog u skladu sa otiskom: – Vremenske serije: – Polarni grafikon:		Značajan doprinos $\text{Na}^+$ . Vremenske serije prikazuju više pikove u isto vrijeme kada je tok vjetra dolazio od Jadranskog mora u olujnim uvjetima i sa niskim vertikalnim miješanjem. Veće koncentracije na polarnom grafikonu na sjevernom i južnom rubu ukazuju na to da su izvori povezani sa jakim vjetrovima.		Značajan doprinos $\text{Na}^+$ . (Značajan doprinos uz $\text{Ca}^{2+}$ i $\text{Mg}^{2+}$ ukazuje na učešće zemljije prašine u faktoru) Vremenske serije prikazuju više pikove u isto vrijeme kada je tok vjetra dolazio iz olujnih uvjeta u sjevernom Atlantiku sa niskim vertikalnim miješanjem. (Značajan plato na kraju perioda zajedno sa tokom sjevernog vjetra s kopna sa vrlo niskim vertikalnim miješanjem ukazuju na učešće zemljije prašine) Veće koncentracije na polarnom grafikonu na sjevernom i južnom rubu sugeriraju da se izvor odnosi na jake vjetrove čak i ako postoji značajna pozadina.

Tabela 30: Ukupno pređenje faktora odležale morske soli

I količina i trendovi ovog faktora razlikuju se između dvije lokacije. U Sarajevu ovaj faktor predstavlja 6% modeliranih faktora, što je visoko u poređenju sa godišnjim prosjekom u regionu, ali je još uvijek moguće tokom zime, budući da se olujni uslovi na moru češće javljaju zimi nego u prosjeku tokom godine. Osim toga, vremenska serija prikazuje nekoliko visokih pikova koji su povezani sa velikom brzinom vjetra prema polarnim dijagramima. Ovo je usklađeno s transportom finih čestica na velike udaljenosti.

Što se tiče Banje Luke, ovaj faktor predstavlja 13% modeliranih faktora, što je izuzetno visoko za region. Osim toga, vremenske serije prikazuju relativno kontinuirani izvor iako polarni dijagrami sugeriraju da su visoke koncentracije ovog faktora povezane s velikom brzinom vjetra. Što se tiče završnog platoa vremenske serije od 22. februara, putanje unatrag pokazuju da je taj period karakterizirao transport zračnih masa sa kopna sa vrlo niskim vertikalnim razmjenama. Ove povratne putanje zajedno sa velikom pojavom u signalu i  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$  dovode do zaključka da je faktor odležale morske soli u Banjoj Luci zapravo pomiješan sa faktorom zemljije prašine koji inače nije identifikovan (pogledajte zemljije prašina ispod) .

## Zemljijašna prašina

Za oba zimska perioda izolovan je faktor zemljijašne prašine. Ovo je bilo moguće zahvaljujući pokazatelju As koji bi trebao biti dobar marker izvora zemljine kore u regionu Balkana. Faktor prašine tla u Sarajevu karakterizira As, a budući da je izvor koincidentan sa sušnim periodima, to sugerira izvor suspenzije zemljijašne prašine. Polarni dijagram prikazuje tačkasti, ali blago difuzni uzorak, što znači da je izvor lokalni i da ga umanjuju jaki vjetrovi. Ukupan iznos je uporediv između dvije godine s obzirom na sezonsku varijabilnost.

Iznenađujuće, s obzirom na to da je faktor zemljijašne prašine bio prilično značajan u Banjoj Luci tokom zime 2020-21, nije se mogao izolovati u Banjoj Luci tokom zime 2021-22. Međutim, sumnja se da je zemljijašna prašina pomiješana sa odležanom morskom soli koja je uveliko (vidi gore) bila prisutna u Banjoj Luci tokom druge zime.

Lokalitet:	Sarajevo		Banja Luka	
Zima:	2020-2021		2020-2021	
Faktori:	Zemljijašna prašina 8% [4,5 µg/m³]	Zemljijašna prašina 2% [1,2 µg/m³]	Zemljijašna prašina 19% [14,3 µg/m³]	– nediskriminirano –% [– µg/m³]
Razlog u skladu sa otiskom: – Vremenske serije: – Polarni grafikon:		Značajan doprinos As. Vremenska serija prikazuje veće pikove tokom sušnih perioda. Periodi inverzije imaju veliki uticaj na glavne pikove. Polarni presjeci sa centralnim, ali difuznim maksimumom sugeriraju lokalni izvor koji je aktivan uglavnom u danima bez vjetra. Sve ovo zajedno može ukazivati na izvor resuspenzije zemljijašne prašine.		

Tabela 31: Ukupno pođenje faktora zemljijašne prašine

## Faktor izraženog prisustva hlorida u Banjoj Luci

Faktor izraženog prisustva hlorida izolovan samo u Banjoj Luci objašnjava oko 70% Cl<sup>-</sup>. Vremenski niz tog faktora je prilično neobičan jer se čini da su emisije odgovorne za taj faktor aktivne tokom samo šest sedmica (12.01. – 19.02.) inače uopšte nisu. Polarni dijagram ukazuje na najmanje dva glavna pravca od mjesta uzorkovanja. Period aktivnosti tog faktora koincidentan je sa suhim vremenom sa temperaturama nešto ispod nule. Ova kombinacija navodi na zaključak da na ovaj faktor može u velikoj mjeri utjecati osušena sol s ceste koja ostaje na asfaltu (Almeida, 2020) i resuspendirana s aerosolima zemljijašne prašine.

U međuvremenu, ovaj faktor predstavlja 14% od svih 8 modeliranih faktora čak i ako je bio aktivan samo 1/3 vremena. Osim toga, izvanredno je da oba vrha vremenske serije i glavni pravci polarnih dijagrama vrlo dobro nadopunjaju odgovarajuće padove faktora odležane morske soli. Budući da se vjeruje da je pozadina faktora odležane morske soli izvor zemljишne prašine, logično je zaključiti isto za faktor bogat hloridima. Kombinovani izvor bi pomogao da se objasni velika količina ovog faktora za čitav period.

### Izraženo prisustvo kalija u Banjoj Luci

Slično zimi 2020-21, Banju Luku karakteriše izraženo prisustvo kalijuma koje objašnjava većinu  $K^+$ , 95% za zimu 2021-22. Podsjećamo, faktor izraženog prisustva kalijuma za zimu 2020-21 obuhvatio je 60% svih izmјerenih  $K^+$ , a 40% predstavlja faktor sagorijevanja biomase.

Udio tog faktora u ukupno modeliranom PM2.5 sada je manji, 6% umjesto dosadašnjih 20%. Prikaz vremenskih serija najviši je u radnim danima, što ukazuje na poslovne aktivnosti. Ali polarni dijagrami ukazuju na najmanje dva smjera u općoj pozadini što sugerira raštrkani broj izvora. Čini se da je vremenska serija odvojena od oba perioda temperatura ispod nule, kao i vremenske serije faktora sagorijevanja biomase, stoga ne bi trebalo sumnjati da je faktor gorenja biomase spojen ovdje. Gornja tla na području Banje Luke su uglavnom kisela i poznata su po niskom  $K^+$  (Marković, 2015) pa ni ovdje ne treba sumnjati na faktor zemljишne prašine. Nije moguće ukazati na konkretan izvor finih čestica napunjениh kalijumom u Banjoj Luci bez pribavljanja dodatnih informacija ili daljih mjerena.

### Industrija

Faktor industrije objašnjava između 57 do 80% mangana, koji je obično vezan za metalnu industriju, barem kada nije zajedno sa markerom tla. Udio tog faktora je sličan između dva grada, oko 3 do 4%.

Banja Luka ima dodatni faktor koji karakteriše značajan doprinos i Cr i Ni kao i Cu. Poznato je da je kombinacija Cr i Ni signal elektrana na ugalj, ali odsustvo svih drugih tragova osim metala, a posebno odsustvo  $SO_4^{2-}$  dovodi do odbacivanja izvora sagorijevanja uglja ovdje. Osim toga, činjenica da polarni dijagrami ukazuju na izolirane smjerove podržava zaključak da je ovaj dodatni faktor također faktor industrije koji je bogat Cr i Ni.

Lokalitet:	Sarajevo		Banja Luka	
Zima:	2020-2021	2021-2022	2020-2021	2021-2022
Faktori:	– nediskriminirano	Industrija 3%	Industrija 5%	Industrija + Industrija (Cr-Ni rich)
	–%	[1,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	[3,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	4% + 2% [3,9 + 2,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

Lokalitet:	Sarajevo		Banja Luka	
Zima:	2020-2021	2021-2022	2020-2021	2021-2022
Razlog u skladu sa otiskom: – Vremenske serije: – Polarni grafikon:		Značajan doprinos Mn. Vremenske serije ukazuju na vrlo varijabilne pikove koncentracije tokom radnih dana, bez obzira na vremenske varijacije. Polarne parcele sa centralnim, ali difuznim maksimumom sugeriraju lokalni izvor koji je aktivan uglavnom u danima bez vjetra. Ovo može ukazivati na izvor resuspendiranja zemljišne prašine.		<u>Za industrijski faktor: značajan doprinos Mn.</u> Vremenske serije ukazuju na značajne pikove koncentracije tokom radnih dana, bez obzira na vremenske varijacije, osim ako ne pada kiša. Polarni grafikoni ukazuju na glavni izvor koji se nalazi istočno od mjesta uzorkovanja. <u>Za industrijski faktor (metal):</u> značajan doprinos i Cr i Ni kao i Cu, ali ne i V. Vremenske serije pokazuju vrlo varijabilne pikove koncentracije tokom radnih dana, bez obzira na vremenske varijacije osim ako ne pada kiša. Polarni prikazi ukazuju na dva glavna izvora na jugu i jugozapadu.

Tabela 32: Ukupno poređenje faktora industrije

### Kombinirana rasprava za kampanje provedene 2020-21 i 2021-22

Ova studija je isključivo fokusirana na PM2.5, koji je od posebnog značaja jer je dovoljno mali da se transportuje duboko u ljudska pluća i njegove najugroženije dijelove i izaziva plućne bolesti. Zaključci ovog izvještaja fokusirani na PM2.5 ne dozvoljavaju predviđanje efekata ili koncentracija drugih zagađivača zraka.

Sveukupni rezultati pokazuju visoke nivoe PM2.5 – u prosjeku dnevno 62 µg/m<sup>3</sup>. Općenito, studija sugerira da se oko 25% PM2.5 emituje iz sagorijevanja drva i peleta, koji se koriste za grijanje. Čini se da oko 20% PM2.5 dolazi od sagorijevanja fosilnih goriva, uključujući ugalj za grijanje i motore vozila. Čini se da dio pozadinskih ili transportnih aerosola velikog dometa predstavlja više od 25% ukupnog PM2.5.

Studija takođe pokazuje korisnost rezultata dobijenih pomoću PMF modela kada se koristi softver USEPA PMF 5.0, sa analitičkim rezultatima PM2.5 dnevno prikupljenim na filterima. Rezultati su zatim dalje istraženi koristeći lokalne meteorološke podatke, uključujući vremenske serije i polarne dijagrame, što je u nekim slučajevima povećalo razumijevanje odakle i kada potiču različiti izvori zagađenja.

Drugi krug mjerena i modeliranja tokom zime 2021-22 potvrđio je glavne doprinose PM2.5 u Sarajevu. Time je indirektno ojačao rezultate za ostalih 5 gradova za zimu 2020-21, potvrđujući korištenu metodologiju. U Banjoj Luci, međutim, rezultati su pokazali određene razlike, odnosno da je količina PM2.5 bila oko  $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dnevno u prosjeku tokom zime 2021-22, što je više nego što je utvrđeno tokom zime 2020-21. PM2.5 identifikovan u Banjoj Luci je iz lokalnih izvora i imao je složen hemijski sastav. Ovo treba dalje proučavati.

Prva kampanja uzorkovanja sprovedena za ovu studiju održana je tokom zime 2020-2021 u 6 gradova (Sarajevo, Zenica, Tuzla, Banja Luka, Bijeljina i Brod) Bosne i Hercegovine, a druga tokom zime 2021-2022, ali samo u Sarajevu i Banjoj Luci. Ovo posljednje je urađeno korištenjem preciznije metodologije koja omogućava mjerjenje većeg broja zagađivača u odnosu na složeniji okoliš u ova dva grada. U zavisnosti od lokacije uzorkovanja, tokom prve zime izolovano je između 5 do 6 različitih grupa izvora PM2.5. Tokom druge zime izolovano je 8 grupa izvora PM2.5 u oba grada.

Vremenske serije su analizirane s obzirom na okolnu geografiju i ljudske aktivnosti, zajedno sa vremenskim podacima koje su dali FHMZ i RHMZ. Ove analize su dale neke korisne uvide za identifikaciju glavnih grupa izvora PM2.5. Opća raspodjela izvora je slična onoj koja je dostupna u drugim studijama u regionu i ukratko je opisana u nastavku.

U obje zimske kampanje potvrđeno je da su sekundarni nitratni aerosoli značajan dio izmjerениh PM2.5. Sekundarni nitrati su često između 10 i 20% ukupnog PM2.5. Njegovi obrasci prostornih i vremenskih varijacija snažno ukazuju na regionalni doprinos koji dolazi iz ostatka Evrope sa sjevera.

Sekundarni sulfatni aerosoli pokazali su složeniju situaciju. Sekundarni sulfati su predstavljali između 9 i 16% izmjerениh finih čestica tokom dvije uzastopne zime. Modeliranje tijekom obje zime dovelo je do sumnje da bi sekundarni sulfatni aerosoli mogli biti uglavnom rezultat lokalnih emisija direktno iz sagorijevanja uglja i lokalne, kemijske transformacije u nitrate ili sulfate u uvjetima vlažne temperaturne inverzije (Chunrong Chen, 2021).

Također je potvrđeno da je sagorijevanje biomase značajan izvor PM2.5. U Sarajevu je udio ovog faktora među izmjerenim finim česticama bio dosljedan tokom dvije kampanje, sa 27% odnosno 26%. Identifikacija i raspodjela sagorijevanja biomase u Banjoj Luci nije bila tako koherentna u dvije kampanje, vjerovatno zbog specifične složenosti sastava finih čestica na ovom konkretnom mjestu. Doprinos sagorijevanja biomase tokom prve zime također je varirao između gradova uzorkovanih i bio je najveći u malim gradovima gdje je mogao doprinijeti do 35% ukupnog PM2.5. Vrijedi spomenuti i to da je druga kampanja mjerena i modeliranja donijela mnogo više jasnoće o različitim izvorima koji utiču na kvalitet zraka, direktno u Sarajevu, ali indirektno i u ostalih 5 gradova, budući da je validirala metodologiju korištenu u studiji.

Nakon nadogradnje metodologije uzorkovanja i mjerjenja bilo je moguće bolje razlikovati fine čestice koje se emituju iz saobraćaja. Rezultati su dali udio od 30% u Sarajevu i 9% u Banjoj Luci za zimu 2021-22. Razlika zvuči velika, ali kada se gledaju koncentracije (15,3 prema 7,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), količina sitnih čestica iz saobraćaju u Sarajevu je samo udvostručena u odnosu na Banju Luku, što je u skladu sa saobraćajnim redom (pogledajte odjeljak o modeliranju disperzije MATCH za više detalja).

Sagorijevanje fosila uglja izdvojeno je od sagorijevanja fosilnih goriva iz saobraćaja u Sarajevu tokom zime 2021-22 i procjenjuje se na 14% ukupnog PM2.5. Nažalost, nije bilo moguće izolovati samo fosil ugla koji gori u Banja Luci.

Faktor zemljишne prašine bio je dobro diskriminiran u Sarajevu i tokom druge zime, sa niskim doprinosom koji je koherentan sa većinom drugih gradova (u rasponu između 2-8%) tokom prve zime. Doprinos u Tuzli je, međutim, procijenjen na 13% u prvoj zimi. Banja Luka je izvan granica u pogledu zemljишne prašine – prva zima je dala iznenađujuće visoku vrijednost od 23%, dok model tokom druge zime uopšte nije bio u mogućnosti razlikovati ovaj faktor. Ovo treba dalje istražiti.

Faktor industrije igra sporednu ulogu u ukupnoj količini PM2.5 u Sarajevu. Nije identifikovan tokom kampanje 2020-21, ali je procijenjen na 3% godinu dana kasnije. U Banjoj Luci je taj faktor prvo procijenjen na 5% i ponovo je pronađen sa konzistentnim iznosom od 6%, ali odvojen u dva različita faktora. Ovi nalazi su u skladu sa iznosom od 3% identificiranim i u Zenici.

Nadograđena metodologija korištena za zimsku kampanju 2021-22 omogućila je da se identificuje faktor odležane morske soli koji je dugotrajni zagadivač koji može biti relevantan posebno tokom zimskog perioda. U Sarajevu je procijenjen na 6%, što je visoko, ali još uvijek moguće tokom zime i slično procjeni preuzetoj iz drugih studija.

Nije iznenađujuće da je sagorijevanje u svrhu grijanja glavni izvor finih čestica u Bosni i Hercegovini. Ova studija pokazuje da je sagorijevanje drva odgovorno za značajan dio ukupnih PM2.5, između 19% i 36%, s većim dijelom u manjim gradovima. Sagorijevanje uglja, za potrebe grijanja ili za proizvodnju električne energije čini 14% ovih finih čestica u Sarajevu. Udio čestica uglja vjerovatno je sličan u drugim gradovima, ali tačnu količinu nije bilo moguće procijeniti u ovoj studiji. Sagorijevanje uglja je vjerovatno također odgovorno za značajan dio sekundarnih sulfatnih aerosola, posebno tokom perioda temperaturne inverzije, i predstavljaju između 5% i 21% ukupnog PM2.5.

Očekivano, sagorijevanje za transport je povezano sa količinom saobraćaja. Može porasti i do 30% u Sarajevu, koji je vjerovatno najprometniji grad od šest u kojima su uzorkovane fine čestice.

Zagađivači dugog dometa poput nitratnih sekundarnih aerosola također su značajni u količini PM2.5, ali su također izvan dosega bilo koje lokalne strategije smanjenja.

Prirodni izvori mogu biti značajni u količini do 10%, npr. za odležanu morsku so, uglavnom zimi, i za zemljишnu prašinu, uglavnom tokom sušnih perioda.

## **DRUGI DIO: JEDNOGODIŠNJE MODELIRANJE DISPERZIJE I RASPODJELA IZVORA KORIŠTENJEM MATCH MODELA SARAJEVA I BANJE LUKE**

Urbana područja u Bosni i Hercegovini (BiH) pate od lošeg kvaliteta zraka i često se premašuju standardi kvaliteta zraka definisani za zaštitu zdravlja ljudi. Na primjer, prosječni nivo PM2.5 izmјeren 2019. bio je dvostruko veći od granične vrijednosti EU (Svjetska banka, 2019.). Prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) iz 2022. godine, BiH je 6. među 50 evropskih zemalja kada je riječ o stopi smrtnosti koja se može pripisati zagađenju zraka. Sarajevo i Banja Luka su dva grada u BiH koja nose veliki dio zdravstvenog opterećenja uzrokovanog zagađenjem zraka.

Sarajevo je smješteno u dolini okruženoj složenim terenom sa strmim planinama. Banja Luka je također okružena planinama, ali u manjoj mjeri. Doline su prirodno zaštićene od vjetra, zbog čega zrak u dolini stagnira. Nadalje, noću kada se zrak ohladi i postane težak, on tone u dno doline sa okolnih vrhova brda i tako potiče razvoj inverzija (Largeron i Staquet, 2016). Poznato je da ovi stabilni vremenski uslovi ograničavaju kretanje zračnih masa i u velikoj mjeri ograničavaju ventilaciju zraka, što ima veoma negativan uticaj na opterećenje zagađenja zraka (Olofson et al., 2009) (Grundström et al., 2015). Ta atmosferska složenost zahtijeva korištenje jedinstvenog modela disperzije s nekoliko visinskih slojeva polja vjetra. U ovoj studiji korišten je 3D Eulerov model kako bi se mogla uzeti u obzir razmjena mase između protoka zraka.

Emisije dolaze iz mnogo različitih izvora kao što su industrija, saobraćaj, elektrane na ugalj i daljinsko i kućno grijanje. Ranije je pokazano da sektori kao što su sagorijevanje u stambenim zgradama, elektrane, industrija i otpad imaju visoke emisije čestica u BiH (Svjetska banka, 2019.)

Posao inventara emisija je dugoročan zadatak za koji su često potrebne godine da se poboljša. Metodologije prikupljanja podataka, upravljanje godišnjim ažuriranjima, održavanje relevantnih kompetencija i praćenje međunarodnih standarda zahtijevaju dugoročno planiranje i trud. Stoga, uobičajen način da se osigura da je inventar emisija dovoljno dobar da prikaže stvarnost na licu mjesta je korištenje u modelu disperzije. Mapa kvaliteta zraka i vremenske varijacije se zatim upoređuju sa satnim mjerjenjima zagađivača zraka iz zvaničnih i kalibriranih stanica za praćenje. Stručnjaci za kvalitet zraka bi tada trebali biti u mogućnosti da odrede preostale zadatke koje treba preuzeti u kontinuiranim naporima ka pouzdanom i ažuriranom inventaru emisija.

Sve tri komponente – praćenje kvaliteta zraka, inventar emisija zagađujućih materija i modeliranje kvaliteta zraka – su od vitalnog značaja za formulisanje efikasnih strategija smanjenja kroz planove za kvalitet zraka i na kraju propise o emisijama. Ali identifikacija izvora

i procjena njihovog doprinosa su od sveobuhvatnog značaja za izgradnju kapaciteta za formulisanje preciznih i dobro ciljanih strategija ublažavanja za smanjenje nivoa zagađenja zraka (Evropska komisija, 2020).

## **Pozadina projekta**

Glavni cilj studije bio je simulirati koncentracije zagađivača zraka  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{PM}_{2.5}$  u Sarajevu i Banjoj Luci koristeći nove skupove podataka o lokalnim emisijama iz tri sektora emisije (izvori daljinskog grijanja, mali stambeni izvori grijanja i saobraćaj). Lokalne emisije su dalje kombinovane sa regionalnim inventarima emisija iz Copernicus Službe za praćenje atmosfere (CAMS, 2019) koji su obezbijedili mrežnu distribuciju evropskih i globalnih antropogenih emisija, kao i globalnih prirodnih emisija.

Drugi cilj je bio razdijeliti doprinose izvora na opće nivoe zagađenja zraka od glavnih doprinosioca koristeći podatke o emisijama visoke rezolucije (novi lokalni inventari emisija). Raspodjela izvora povezuje izvor emisije sa nivoima koncentracije otkrivajući lokaciju i opseg nivoa zagađenja zraka u vezi sa određenim sektorom izvora. Ove informacije su važne za menadžere kvaliteta zraka kako bi formulirali ciljana smanjenja emisija, koja se mogu uključiti u akcioni plan.

U široj perspektivi, rezultat modeliranja disperzije može se dalje primijeniti u analizi scenarija kako bi se odredili i ocijenili efekti određenih akcionalih planova za smanjenje emisija.

## **Metode**

Modeliranje atmosferske disperzije (u daljem tekstu: modeliranje disperzije) je numerička simulacija načina na koji zagađivači putuju sa vjetrom iz svojih izvora. U zavisnosti od tipa modela i njegove formulacije, modeliranje disperzije može uključiti ne samo vremenske uticaje, već i topografiju, hemijsku transformaciju atmosfere i neke od efekata turbulencije. Postavljanje modela disperzije kako je urađeno u ovoj studiji obuhvata nekoliko koraka uključujući:

1. *Priprema ulaznih podataka o emisiji.* Ovo može uključivati različite tipove izvora (tačkasti, linijski, površinski, mrežni i zapreminske izvore) koji se obično dijele na različite sektore emisije, kao što su saobraćaj, mobilne mašine, industrije, grijanje u domaćinstvu itd.
2. *Meteorološki podaci.* Ovisno o području proučavanja i tipu primijenjenog modela disperzije, to može biti u obliku podataka posmatranja na jednoj lokaciji ili u obliku mreže podataka iz modela numeričkog predviđanja vremena (NWP). Često, ali ne uvijek, model disperzije koristi meteorološke podatke vremenskih serija za modeliranje koncentracije zagađivača za odabrani vremenski period, kao što je jedna godina. U ovoj studiji korišteni su podaci po satu iz NWP modela.
3. Priprema tzv. fiziografskih podataka, što je topografija i datum korištenja zemljišta za područje proučavanja.

4. Pokretanje modela disperzije. Većina modela izračunava koncentraciju zagađivača na kartezijanskoj mreži za niz uzastopnih vremenskih koraka.
5. Postprocesiranje rezultata. Ovo često uključuje izračunavanje relevantnih statističkih mjera (kao što su godišnji prosjeci i percentili) i izdvajanje podataka o vremenskim serijama na odabranim tačkama kako bi se uporedili rezultati sa podacima praćenja.
6. Gore navedeni koraci se mogu ponovo pokrenuti sa prilagođenim postavkama ili ažuriranim ulaznim podacima ako se rezultati modela ne slažu dovoljno sa podacima praćenja.
7. Za studije raspodjele (za relevantne kategorije emisija), postavka modela se može koristiti za ponovno pokretanje modela uz skaliranje odabrane kategorije emisije, a zatim naknadnu obradu ovog rezultata kako bi se dobila mapa doprinosa sektora do ukupne koncentracije.

### **Konsolidacija podataka o lokalnim emisijama**

Jedna od komponenata IMPAQ projekta bila je poboljšanje inventara emisija u tri grada u svakom entitetu – istih šest gradova koji su ispitani u studiji o raspodjeli izvora PMF-a. Dok je nekoliko gradova u Federaciji izradilo prilično usklađene inventare emisija, gradovima u Republici Srpskoj nedostaju podaci o emisijama za nekoliko sektora.

U Sarajevu postoji dovoljno podataka o saobraćaju da se izvrši proračun podataka o emisiji iz saobraćaja, dok za ostale gradove nedostaju podaci o saobraćaju za pojedinačne puteve. Samo nekoliko najvećih industrija prijavljuje svoje emisije u Evropski registar ispuštanja i prijenosa zagađivača (E-PRTR).

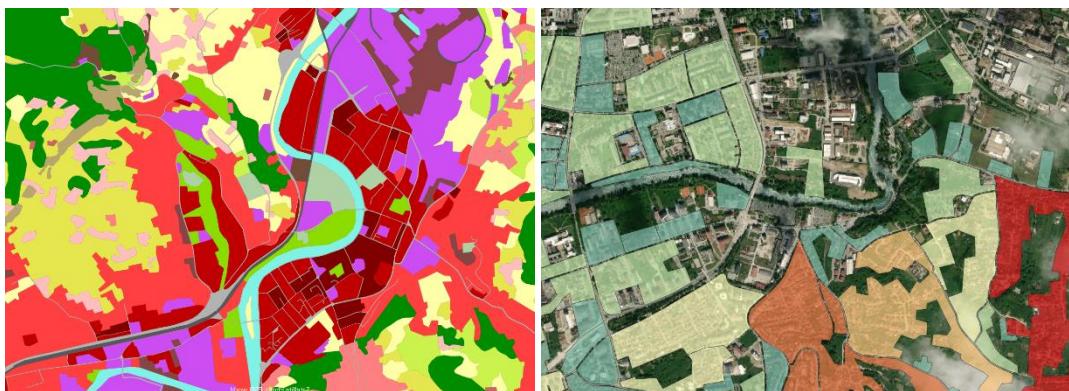
Sva značajna industrijska postrojenja u oba entiteta moraju obnavljati ekološke dozvole svakih pet godina. Nažalost, podnošenje ekoloških dozvola ne uključuje nikakvu procjenu emisija, odnosno potrošnje goriva. Svi zahtjevi za dodatnim neformalnim informacijama su propali u RS-u, a u Federaciji su obavljeni prema prethodnim procjenama uz formalnu podršku ministarstva okoliša.

Početkom 2021. godine odlučeno je da se implementira alternativni metod inventarizacije emisija. Ideja je bila umjesto sproveđenja inventara odozdo prema gore napraviti inventar emisija odozgo prema dolje u vezi sa dva značajna izvora zagađivača zraka u zimskom periodu, korištenje energije za grijanje i sagorijevanje goriva od strane saobraćaja.

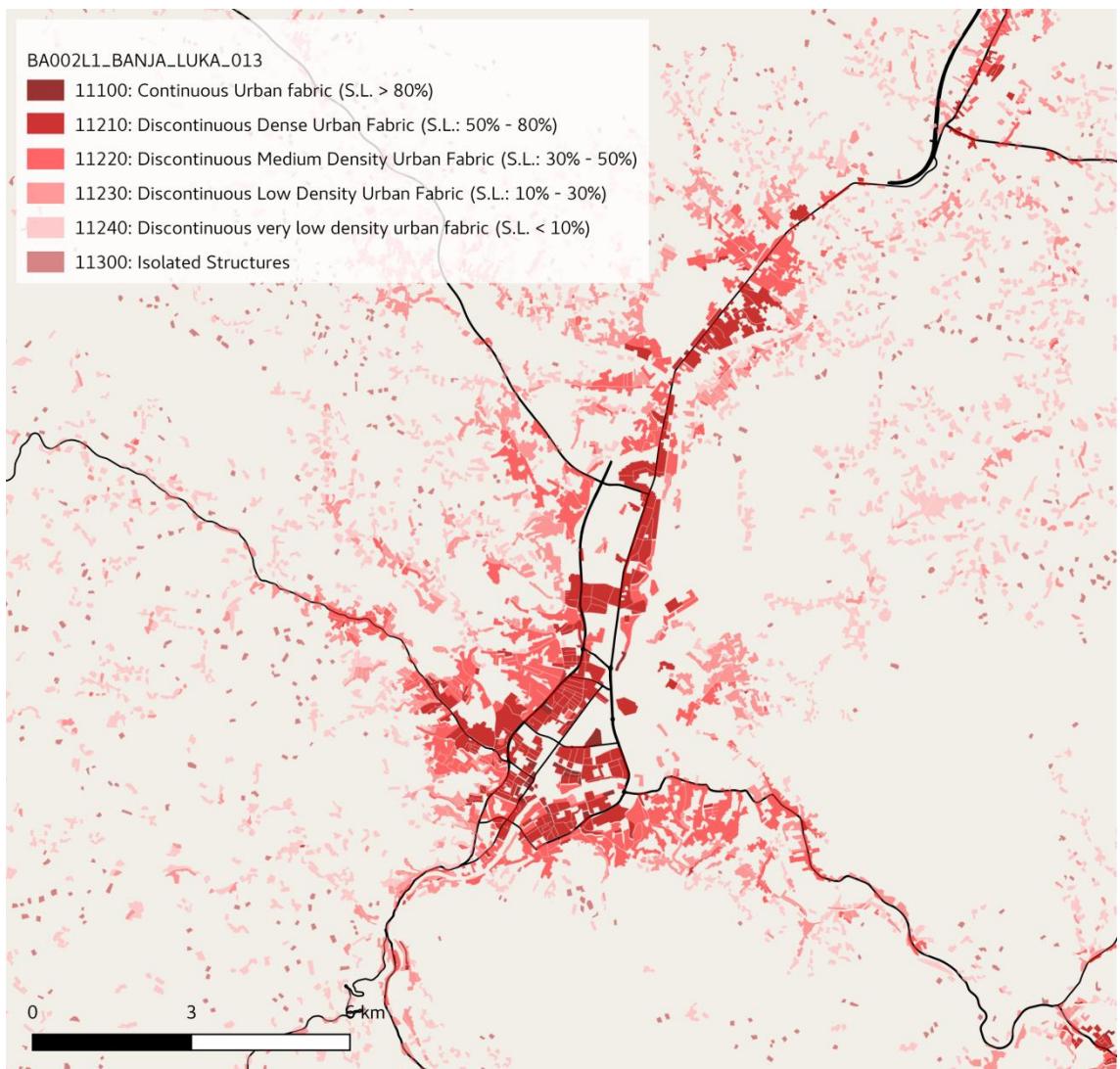
Što se tiče emisija grijanja iz individualnih domaćinstava ili stanova, postavljena je originalna metodologija kako bi se dobila geografska distribucija emisija. Detaljna metodologija je dalje opisana ovdje u nastavku, ali je sažeta na sljedeći način.

Glavni ulazi su:

- Poligoni korištenja zemljišta iz skupa podataka UrbanAtlas 2012. Ovaj skup podataka pokriva površinu i sadrži klase korištenja zemljišta za sve veće općine u većini Europe. Skup podataka uključuje podatke o populaciji u svakom poligonu,
- Potrošnja goriva iz lokalnih istraživanja i statistike (Anketa o potrošnji energije u domaćinstvima u BiH 2015),
- Izvještaj o tipologiji zgrada u Bosni i Hercegovini (Arnautović et al., 2016).



*Slika 11: Urbanistički atlas Zenica i korištenje energije po poligonom nakon usklađivanja u Banjoj Luci*



*Slika 12: Urbanistički atlas Banje Luke 2012. kategorije korištenja zemljišta za koje se pretpostavlja da doprinose emisijama iz grijanja stambenih objekata. Glavni putevi su prikazani za orientaciju.*

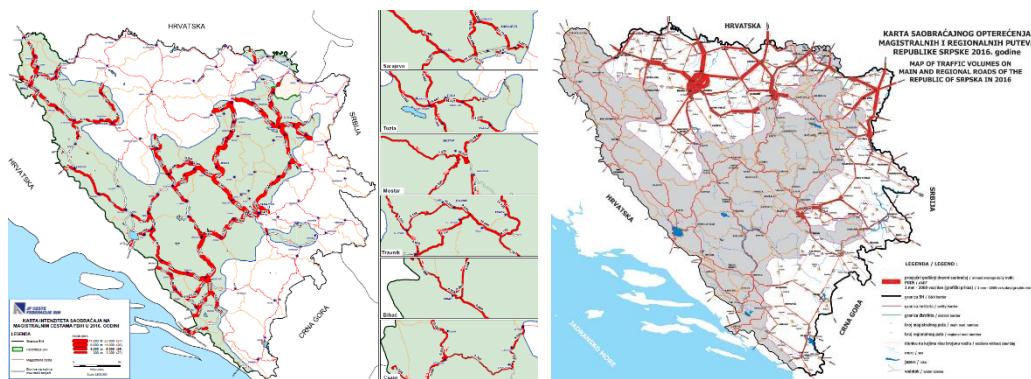
Za svaku klasu urbanizacije određena je mješavina tipova zgrada. Za to je korištena tipologija stambenih zgrada u Bosni i Hercegovini (Arnautović et al., 2016). Sastav zgrade i potrebe za toplinskom energijom po tipu stanovanja zatim su raspoređeni na sva izračunata područja (Sarajevo, Zenica, Tuzla i Banja Luka).

Kombinacijom ovih skupova podataka sa vrstom goriva koje koriste pojedinačna domaćinstva ili tzv. kondominijum, bilo je moguće rasporediti potrošnju energije na sve poligone koji sadrže stambene jedinice. Nadalje, u svakom poligonu mogla se procijeniti potrošnja energije po vrsti goriva, što je olakšalo izračunavanje povezanih emisija.

Ukupni rezultati potrošnje energije zatim su upoređeni sa dostupnom statistikom korištenja energije prema izvještaju o tipologiji zgrada.

Svi osnovni podaci, obrađeni podaci, metodologija i GIS-fajlovi objavljeni su na HIVE portalu za razmjenu podataka kako bi bili slobodno dostupni svim zainteresiranim stranama.

Što se tiče saobraćaja i njegove geografske distribucije, odabran je pristup na nivou cijele zemlje. Korištena su dva izvještaja o saobraćaju iz 2016. godine za Federaciju (JP Ceste Federacije BiH, 2017) i za Republiku Srpsku (Putevi Republike Srpske, 2020). Ovi izvještaji se oslanjaju na mrežu stalnog i privremenog automatskog brojanja saobraćaja i na kraju izvještaja uključuju modeliranje saobraćaja koji nije bilo moguće primiti u GIS formatu.



Slika 13: Brojanje saobraćaja i modeliranje glavnih cesta u BiH za 2016. godinu

Saobraćaj računajući iz ova dva izvještaja pokriva dio magistralnih puteva oba entiteta (Magistralna cesta). One pokrivaju samo dio puteva u BiH. Ti podaci nisu bili dostupni u elektronskom formatu i SMHI ih je prvo morao ručno implementirati u GIS bazu podataka.

Važno je napomenuti da ova dva izvještaja ne obuhvataju saobraćajne tokove sa segmenata autoputa. Zahtjevi za informacijama su na različite načine dostavljani operateru autoputa, ali su bili bezuspješni.

Tako je ukupan saobraćaj u BiH procijenjen korištenjem registrovanog voznog parka za godinu od interesa koji je dostupan od strane nadležnih organa za ceste i transport oba entiteta. Godišnja kilometraža procijenjena je u odnosu na hrvatske statističke podatke za 2016. godinu jer godišnja kilometraža nije bila dostupna za BiH. Godišnja kilometraža zavisi od klase i starosti vozila.

Ovaj način procjene godišnje kilometraže ne uključuje kilometražu stranih vozila na bosanskim cestama. Taj inostrani promet se procjenjuje na 3% za privatna vozila i 15% za teška vozila (TRT Trasporti e Territorio, 2017). Umjesto toga, pretpostavlja se da broj stranih vozila u BiH nadoknađuje broj vozila registrovanih u BiH, ali voze u inostranstvu.

Godišnja kilometraža po kategoriji distribuirana je nakon u postojećoj putnoj mreži korištenjem pojednostavljene metodologije. Da bi se dobila brojka saobraćaja za cijelu putnu mrežu, bilo bi poželjno potpuno modeliranje saobraćaja. Budući da su za takvu vrstu modela potrebne pomoćne informacije i da je izvan okvira trenutnog projekta, uzet je jednostavniji pristup. Godišnji prosječni dnevni saobraćaj (AADT) na putevima na kojima su mjerena bila dostupna oduzima se od ukupnog procijenjenog saobraćajnog rada (protok pomnožen dužinom puta) za entitet. Ostatak AADT toka se zatim distribuiru na ostale segmente puta prema težinskoj klasifikaciji koja se prepostavlja za svaki tip puta u mreži puteva Openstreet-map.

Isti proračuni su obavljeni za oba entiteta. Svi osnovni podaci, obrađeni podaci, metodologija i programi za obradu podataka objavljeni su na HIVE portalu za razmjenu podataka.

Emisija iz vozila procijenjena je korištenjem COPERT 5.4 modela emisije.

Osnovu za model je uglavnom dao RHMZ, uključujući:

- Mjesečne meteorološke informacije,
- Sastav goriva iz Rafinerije Brod,
- Statistička potrošnja energije iz zavoda za statistiku oba entiteta, kada se koriste neki faktori konverzije za usklađivanje sa COPERT 5.4,
- Vozni park iz službenih registarskih dosjea Ministarstva prometa, koristeći starost vozila po kategorijama iz Hrvatskog zavoda za statistiku kao aproksimaciju.
- Godišnji prosječni dnevni promet (AADT) iz Hrvatskog zavoda za statistiku kao aproksimacija (Centar za vozila Hrvatske, 2018).

Urađena je saradnja sa RHMZ-om kako bi se dala procjena emisija. Neka prilagođavanja mogu biti potrebna barem u pogledu voznog parka teških vozila i karakteristika goriva.

Proračuni za Federaciju su obavljeni nakon razgovora sa Centrom za razvoj i podršku (CRP) koji je prethodno izvršio COPERT proračune za Federaciju.

Model COPERT je vođen za oba entiteta. Svi osnovni podaci, obrađeni podaci i izvorni COPERT dosje objavljeni su na HIVE portalu za razmjenu podataka kako bi bili besplatno dostupni svim zainteresiranim stranama.

## **Emisije regionalnog nivoa**

Pored inventarisanih lokalnih emisija koje su fokusirane na glavne faktore zagađivača zraka, postoji više drugih manjih, ali relevantnih izvora zagađenja. Ovi drugi doprinosi se odvijaju kako na lokalnom, tako i na regionalnom nivou u okruženju. Kako bi se ovi drugi izvori uzeli u obzir, kompilacija emisije se vrši pomoću regionalne baze podataka o emisijama Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) (CAMS, 2019).

CAMS regionalna baza podataka o emisijama obično je izgrađena na podacima o emisijama koje se nacionalno prijavljuju Okvirnoj konvenciji UN-a o klimatskim promjenama (UNFCCC), Konvenciji o dalekosežnom prekograničnom zagađenju zraka (CLRTAP) i Direktivi EU o nacionalnim granicama emisija (NEC direktiva). Zbog grešaka ili nepotpunosti ili nedosljednosti dopunjeno je drugim podacima o emisijama, posebno emisijama IIASA GAINS.

Budući da je većina inventara emisija podijeljena na standardizirane sektore emisija (između ostalih: javna energija, industrija, drumski transport, avijacija, otpad, poljoprivreda...) moguće je kompletirati lokalni inventar, fokusiran samo na neke sektore odabirom sektora koji nedostaju i /ili emisijama okolnih, ali neinventariziranih područja.

CAMS regionalna baza podataka o emisijama sama po sebi nije prikladna za modeliranje disperzije zraka na lokalnom nivou jer je rezolucija za ovaj skup podataka oko  $8 \times 5,5$  km za proučavano područje. Kako bi se rezolucija prilagodila potrebama modela, regionalni skup podataka o emisiji je izrezan za Bosnu i Hercegovinu, ponovo uzorkovan na 500 metara i ponovo projektovan u lokalnu geografsku projekciju, MGI 1901 Balkanska zona 6 (EPSG:3908). Dobijeni skup podataka se tada mogao koristiti za Sarajevo i Banja Luku.

Supstance u CAMS skupu podataka o emisijama koje se koriste su sljedeće i odgovaraju potrebama razmatranog modeliranja (Kuenen, o.a., 2021.):

- NOx (azotni oksidi)
- PM<sub>10</sub>
- PM<sub>2.5</sub>
- SO<sub>2</sub>
- CO (ugljični monoksid)
- CH<sub>4</sub> (metan)
- NH<sub>3</sub> (amonijak)
- NMVOC (nemetanska isparljiva organska jedinjenja)

### **Kreiranje modela za Sarajevo**

Za Sarajevo je bilo nekoliko projekata prikupljanja podataka o emisijama tokom posljednje decenije.

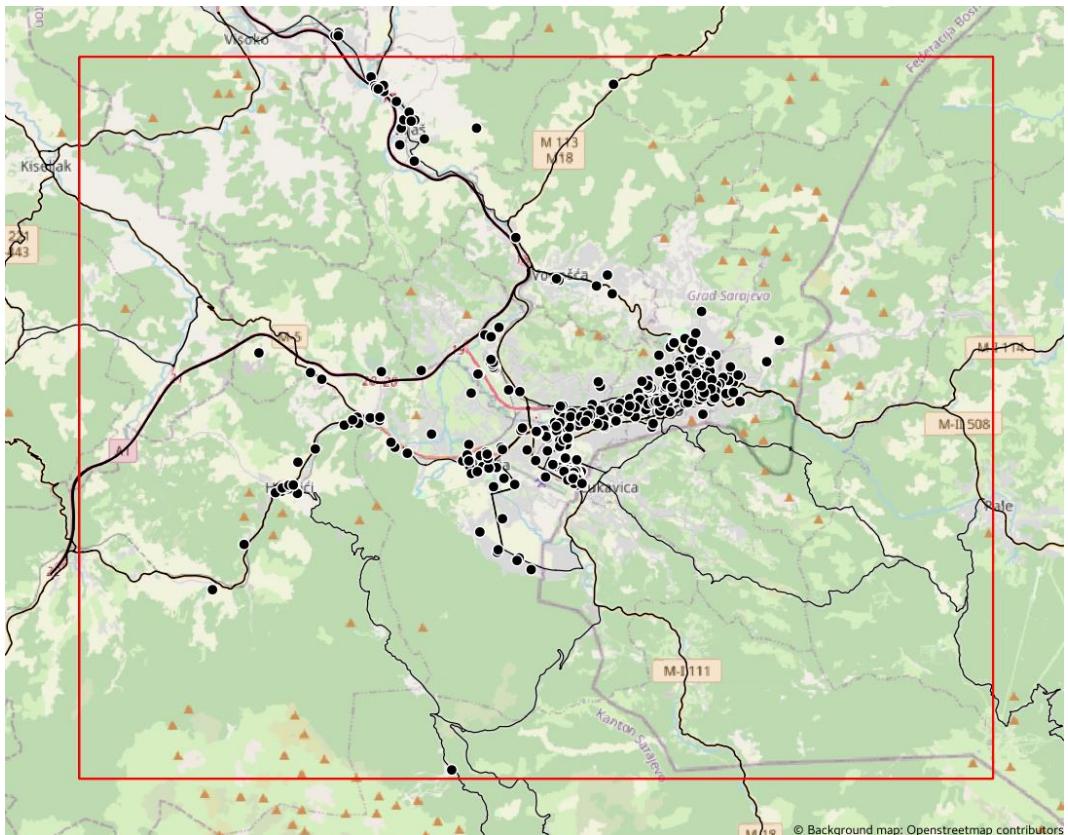
Sektori za koje postoje lokalni podaci o emisijama su:

- Javna energija: tačasti izvori, uglavnom objekti daljinskog grijanja, kao što su stambene zgrade i javne zgrade, ali i neki industrijski objekti
- Ostalo stacionarno sagorijevanje: grijanje individualnih kuća i slično
- Transport: drumski saobraćaj.

Za svaki od ovih sektora, emisije na regionalnom nivou su zamijenjene lokalnim podacima o emisijama.

### Tačkasti izvori

E3 je nedavno razvio skup podataka koji sadrži 613 lokacija izvora za Sarajevo (Slika 14). Većina izvora u skupu podataka su objekti za grijanje stambenih ili poslovnih zgrada, kao što su objekti kojima upravljaju Toplane Sarajevo.

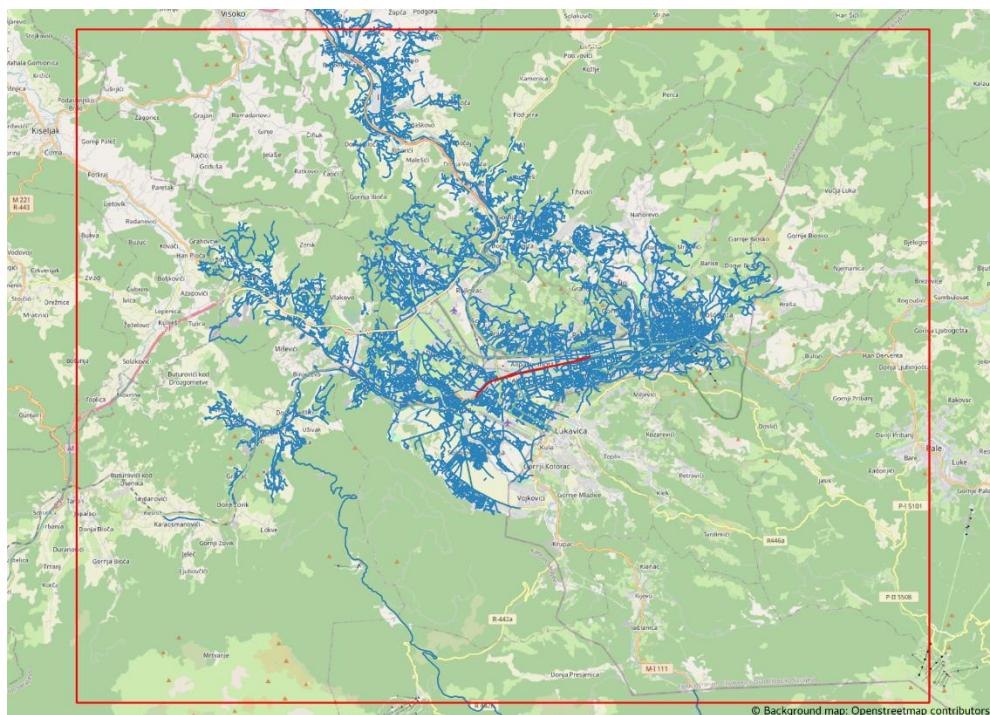


Slika 14: Tačkasti izvori u Sarajevu (crne tačke) i modelirano područje (crveni pravougaonik)

Za svakog modeliranog zagađivača, emisije iz tačkastih izvora su rasterizirane u mreže koje odgovaraju postavci modela disperzije.

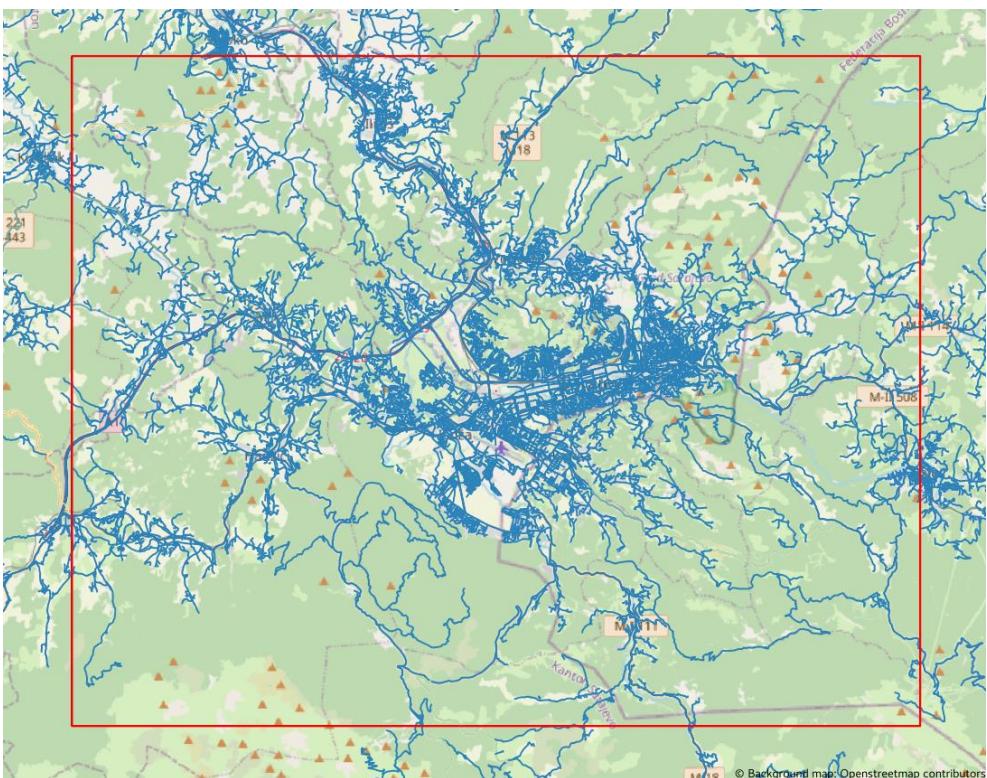
### Saobraćaj

Skup podataka o emisiji saobraćaja je obezbijedio E3 i sadrži glavne puteve unutar grada Sarajeva (Slika 15).



Slika 15: Mreža puteva uključena u inventar emisija Sarajeva.

Budući da ova putna mreža uglavnom pokriva urbane dijelove Sarajeva i ne uključuje ceste izvan Federacije Bosne i Hercegovine, skup podataka je proširen na sljedeći način: Putna mreža iz Openstreetmap projekta je izdvojena za područje. Koristeći postojeći skup podataka o emisiji, izvučene su statistike za svaki tip ceste u Openstreetmap mreži. Statističke vrijednosti emisija i saobraćajnih tokova zatim su primijenjene na puteve koji nisu obuhvaćeni lokalnim skupom podataka. Metoda je bila ograničena samo na veće puteve (Slika 16).



Slika 16: Mreža puteva u Sarajevu.

Za prva pokretanja MATCH modela, emisije saobraćaja su ponovo skalirane kako bi bile jednake ukupnim vrijednostima iz originalnog (lokalnog) skupa podataka. Budući da su rezultirajuće koncentracije bile mnogo niže od uočenih koncentracija, ovo prilagođavanje je kasnije uklonjeno. Za čestice, trošenje i resuspenzija su uključeni korištenjem agregiranih faktora emisije (ETC/ATNI, 2021). Prije uvoza emisija u model MATCH, emisiona mreža puteva je rasterizirana u rezoluciji od 500 metara, u skladu sa mrežom za model disperzije.

### **Rezidencijalno grijanje**

Većina većih stambenih zgrada, kao i javnih zgrada, griju se daljinskim grijanjem i objektima lociranim oko stambenog bloka (etažno). Emisije iz ovih objekata su uglavnom uključene u skup podataka o tačkasitim izvorima. Za razliku od toga, skup podataka o grijanju stambenih objekata sadrži prvenstveno zgrade s jednom ili nekoliko porodica.

Za čestice ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ) i  $SO_2$ , korišten je skup podataka koji je nedavno razvio E3, dok je za  $NOx$  odabran stariji skup podataka zbog emisije  $NOx$  za novi skup podataka koji nije bio spreman.

Za objekte koji pripadaju dijelu područja modeliranja u Republici Srpskoj, emisija grijanja je procijenjena metodom korištenjem Urban Atlasa i podataka o tipologiji zgrada koja je razvijena u okviru projekta (vidi dio Grijanje stambenih objekata u nastavku).

Poligoni emisije grijanja za različita stambena područja su rasterizirani u mreže koje odgovaraju modelu disperzije.

### **Regionalne emisije**

Sektori emisije su definisani prema “Odabranoj nomenklaturi za izvor zagađenja zraka” (SNAP). Lokalne emisije visoke rezolucije raspoređene su u tri sektorske kategorije: Javna energija (tačkasti izvori većih toplinskih objekata stambenih zgrada, javnih kuća i neke industrije), ostalo stacionarno sagorijevanje (individualni stambeni izvori grijanja) i transport (izvori cestovnog saobraćaja). Preostale regionalne emisije iz CAMS-a smještene su u preostale sektore kao što se može vidjeti u Tabeli 33. Imajte na umu da su za tri sektora za koja postoje lokalni podaci korišteni samo lokalni podaci.

### **Cjelokupne emisije**

Ukupne emisije glavnih zagađivača zraka za domenu modela Sarajevo potekle su iz lokalnog skupa podataka o emisijama koje su izračunali E3, Ceteor, SMHI i iz CAMS regionalne baze podataka o emisijama. U modelu MATCH sektori su izraženi kao SNAP kategorije.

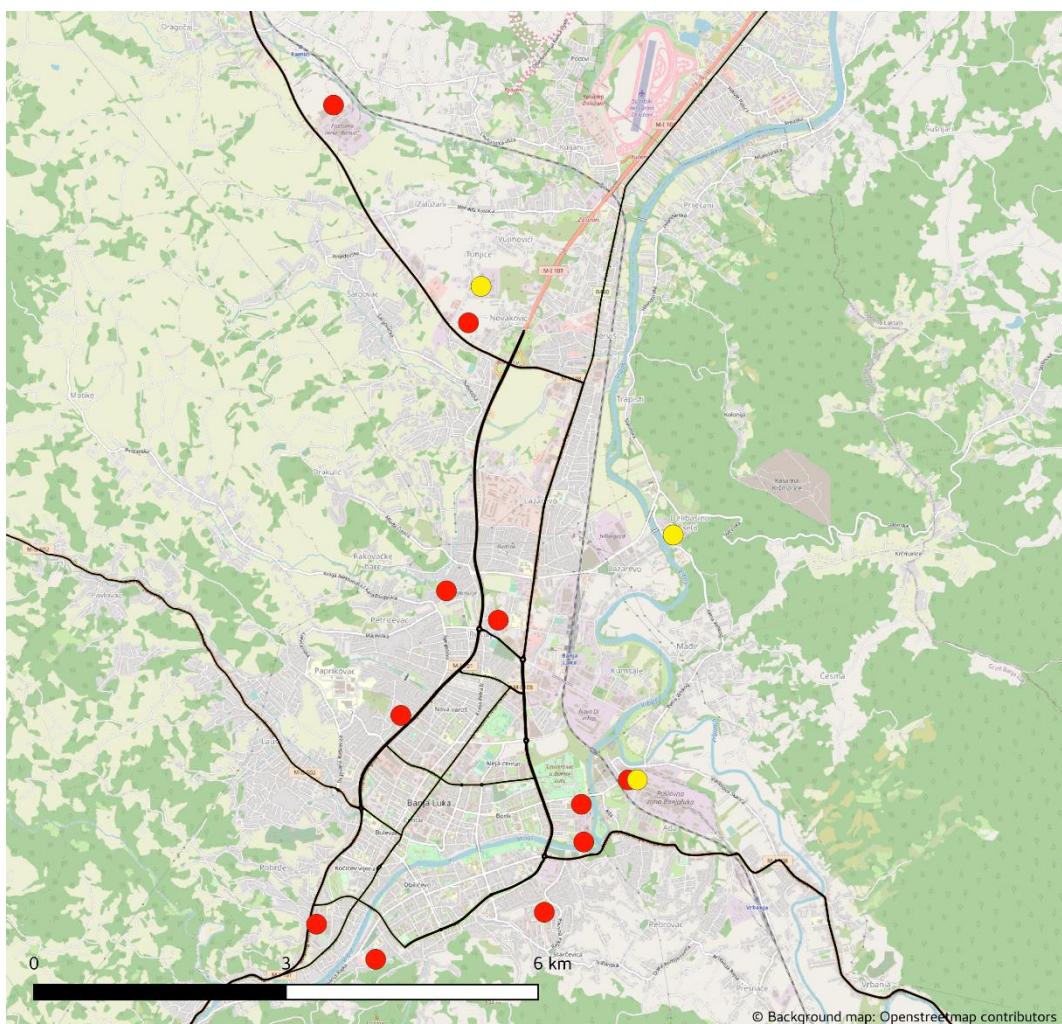
Sektor	NOx	SO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>
Javna energija	639.7	396.7	12.2	6.6
Ostalo stacionarno sagorijevanje	326.3	617.1	1689.8	1601.5
Industrijsko sagorijevanje i procesi*	89.6	911.4	431.8	160.6
ostaci*	0	0	83.7	9.6
rastvarači*	0	0	0	0
Saobraćaj	3458.1	2.2	1418.8	1163.4
Drugi mobilni izvori*	0	0	0	0
Otpad*	102.5	6.1	325.3	304.4
Poljoprivreda*	0	0	38.1	8.4

Tabela 33: Ukupne emisije (tone/godišnje) glavnih zagađivača zraka za domenu modela Sarajevo iz skupa lokalnih podataka o emisijama zajedno sa CAMS regionalnom bazom podataka o emisijama (\*)

### **Postavljanje modela za Banju Luku**

#### **Tačkasti izvori**

Na zahtjev IMPAQ projekta 2021. godine, Ceteor je identifikovao 11 tačkastih izvora (uglavnom toplana) u Banjoj Luci za koje je poznata instalirana snaga. Za neke od njih bili su dostupni i podaci o korištenoj energiji (Eko Toplane Banja Luka d.o.o., 2021.). Za one izvore kojima su nedostajali podaci o utrošenoj energiji, prepostavili smo 30% potrošnje instalirane snage tokom godine, na osnovu izvora za koje su ti podaci dostupni.



Slika 17: Takasti izvori u Banja Luci. Crvene tačke označavaju objekte za grijanje, a žute industrijske objekte

Za tačkaste izvore postrojenja za grijanje, njihove emisije su procijenjene korištenjem baze podataka EEA 2019 za faktore emisije (EMEP/EEA, 2019).

Što se tiče industrijskih izvora, postoje tri izvora za koja su dostupne potrebne informacije.

Poznato je više izvora, međutim, nedostaju im potrebne informacije za izračunavanje emisija. Ovo je važno područje mogućih poboljšanja, ne samo u cilju postizanja kvalitetnih mapa zagađenja, već i u cilju što detaljnijeg informisanja o izvorima zagađenja za grad.

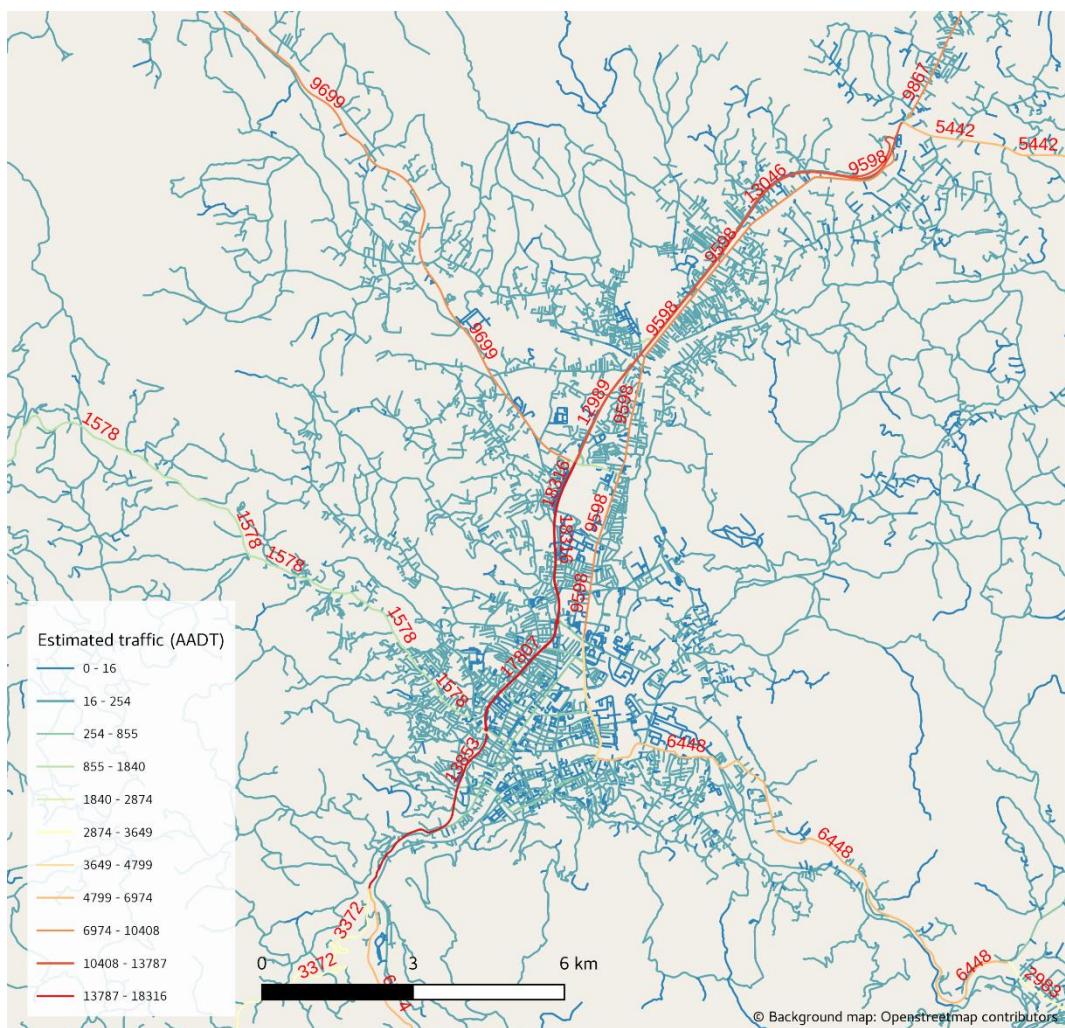
Konačno, skupovi podataka izvora iz tačaka su rasterizovani na rezoluciju od 500 m, u skladu sa mrežom za model disperzije.

### **Saobraćaj**

Za glavne putne pravce van grada Banjaluke vrši se brojenje saobraćaja koje vrši Uprava za puteve. Unutar grada, međutim, postoji potreba za procjenom saobraćaja. To je urađeno

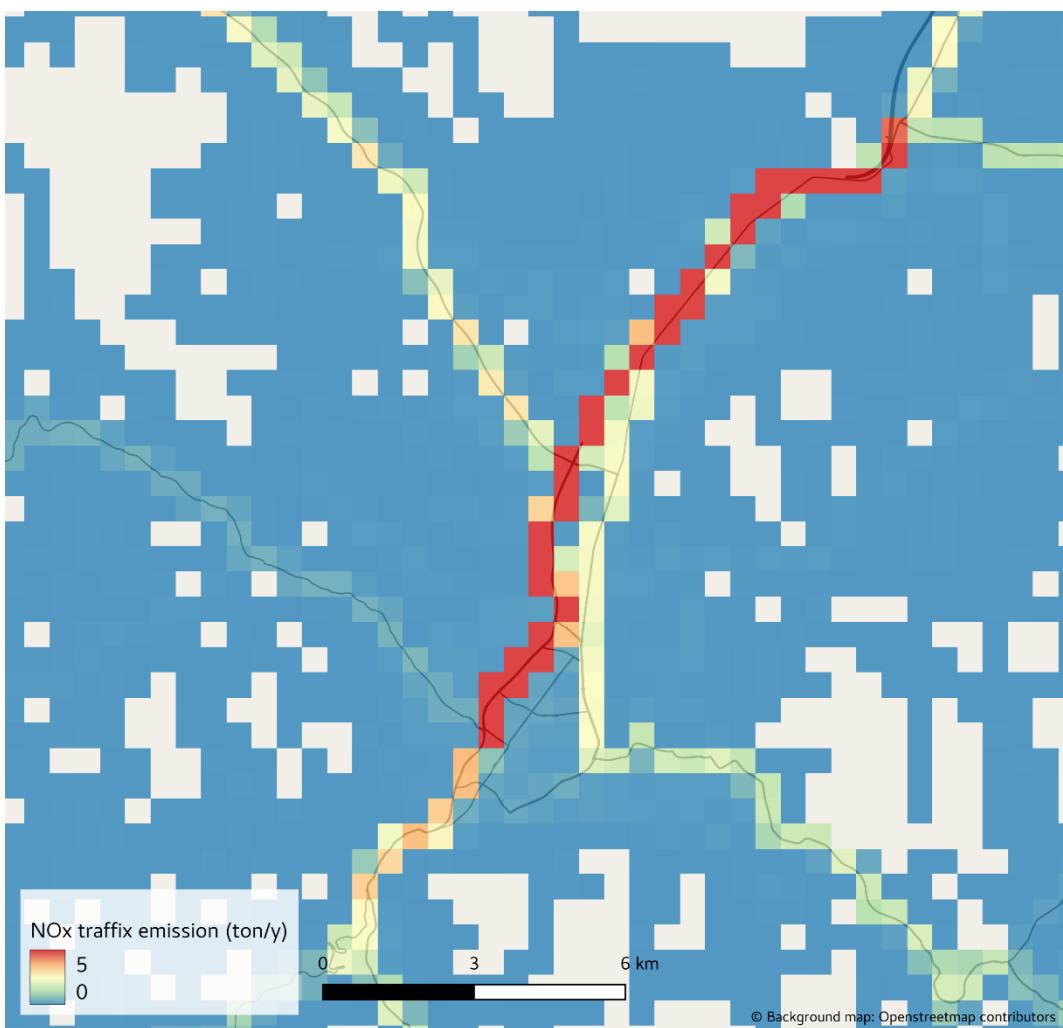
korištenjem metode predstavljene gore u odjeljku „Konsolidacija podataka o lokalnim emisijama“.

Metoda je koristila ukupni promet iz COPERT modeliranja za Republiku Srpsku, koji je modeliran u saradnji sa RHMZ. Ukupan promet je zatim mapiran na putnu mrežu iz Openstreetmap projekta, gdje svaki put ima težinski faktor u zavisnosti od tipa puta.



Slika 18: Procijenjeni saobraćajni tokovi (AADT) za Banja Luku. Crveni brojevi označavaju puteve za koje postoje podaci o broju saobraćaja

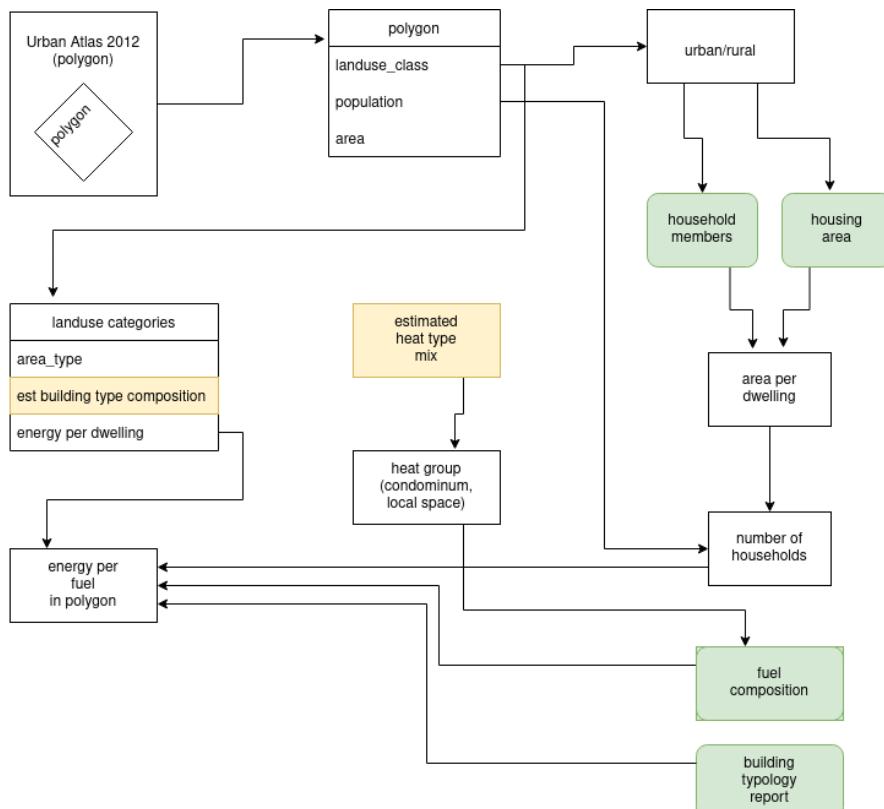
Nakon što je dobijena procjena saobraćajnih radova za glavne puteve, za svaki od ovih puteva, emisije dobijene iz COPERT modela su raspoređene u odnosu na saobraćajne radove. Rezultat je putna mreža u GIS formatu, koja je rasterizirana u ćelije od 500m koje odgovaraju mreži za modeliranje. Primjer mape za NO<sub>x</sub> prikazan je na Slika 19.



Slika 19: Emisije NO<sub>x</sub> iz saobraćaja za Banju Luku, rasterizirane na 500 m čelija

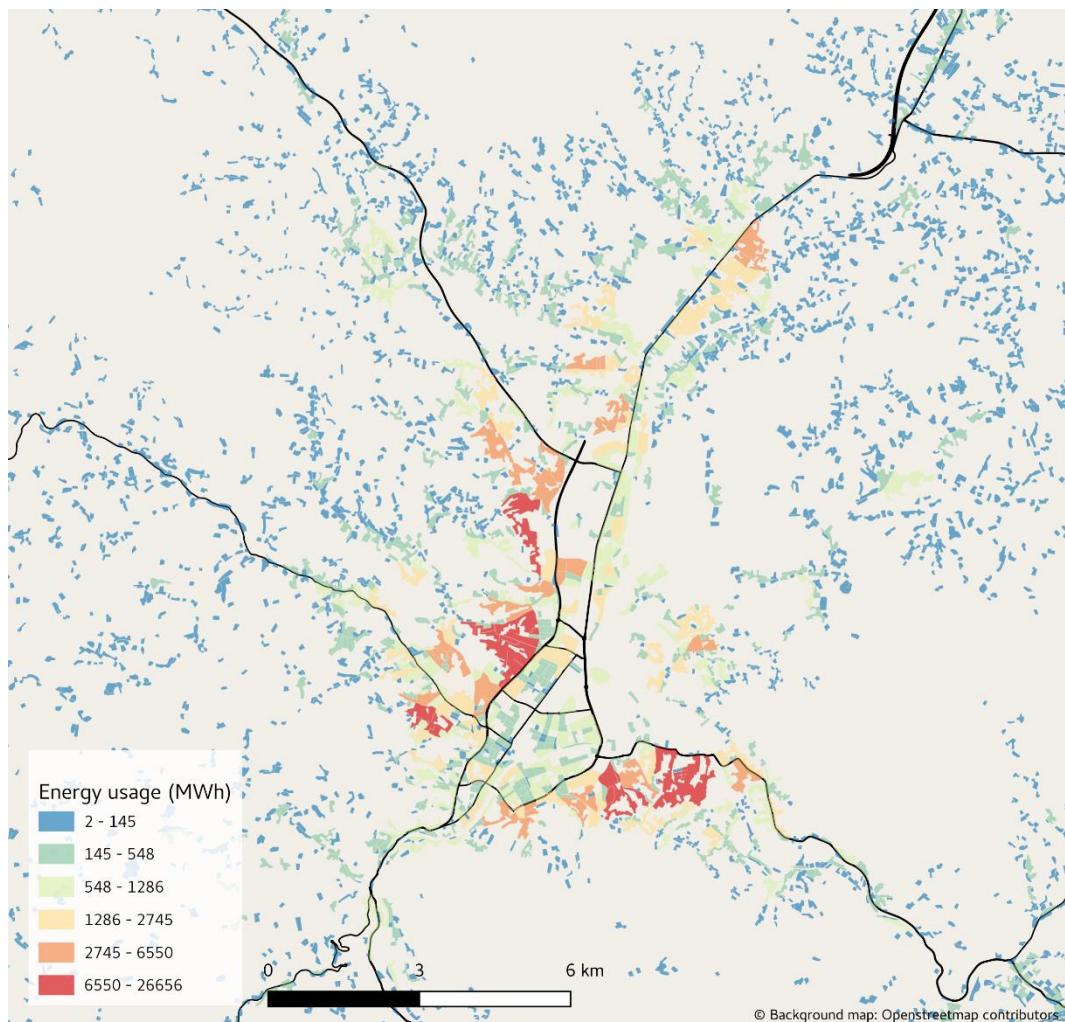
## Stambeno grijanje

Emisije od grijanja pojedinačnih zgrada procijenjene su korištenjem skupa podataka Urban Atlas 2012 (EEA Copernicus, 2018), u kombinaciji sa izvještajem o tipologiji zgrada (Arnautović et al., 2016) i drugih izvora statističkih podataka za Republiku Srpsku (Agencija za statistiku Bosne i Hercegovine, 2015.). Područja u kojima su korištene procjene prikazana su svjetlo narandžastom bojom na Slika 20.



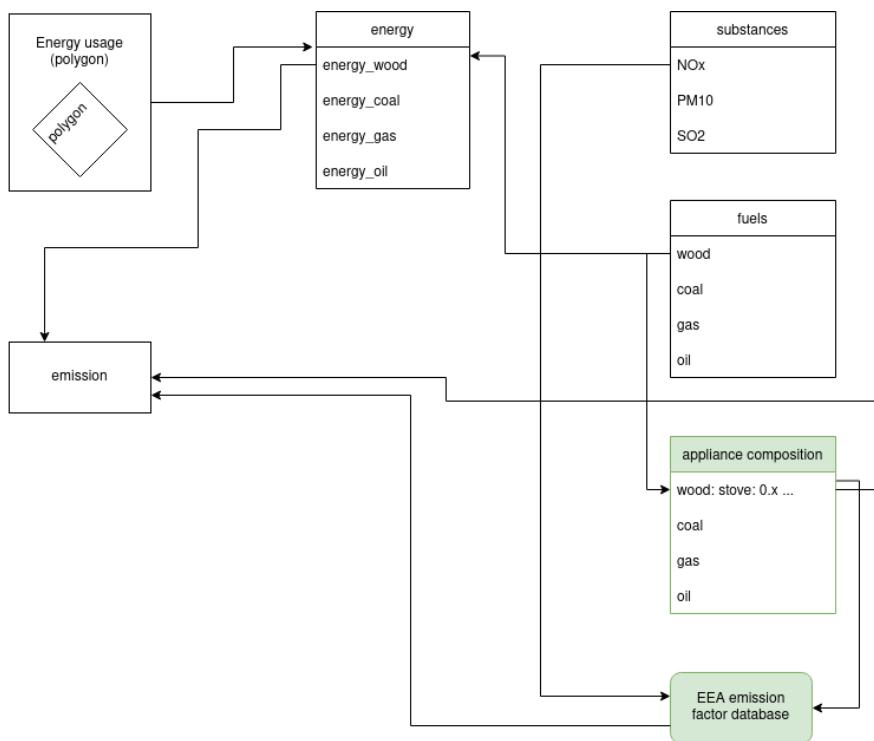
Slika 20: Dijagram toka za geografski izračunatu potrošnju goriva

The Urban Atlas GIS skup podataka sadrži poligone različitih klasa korištenja zemljišta, kao i brojke stanovništva za svaki poligon. Pretpostavlja se da samo neke od ovih klasa korištenja zemljišta uzrokuju emisije grijanja stambenih objekata. Rezultirajuća potrošnja grijanja prikazana je na Slika 21.



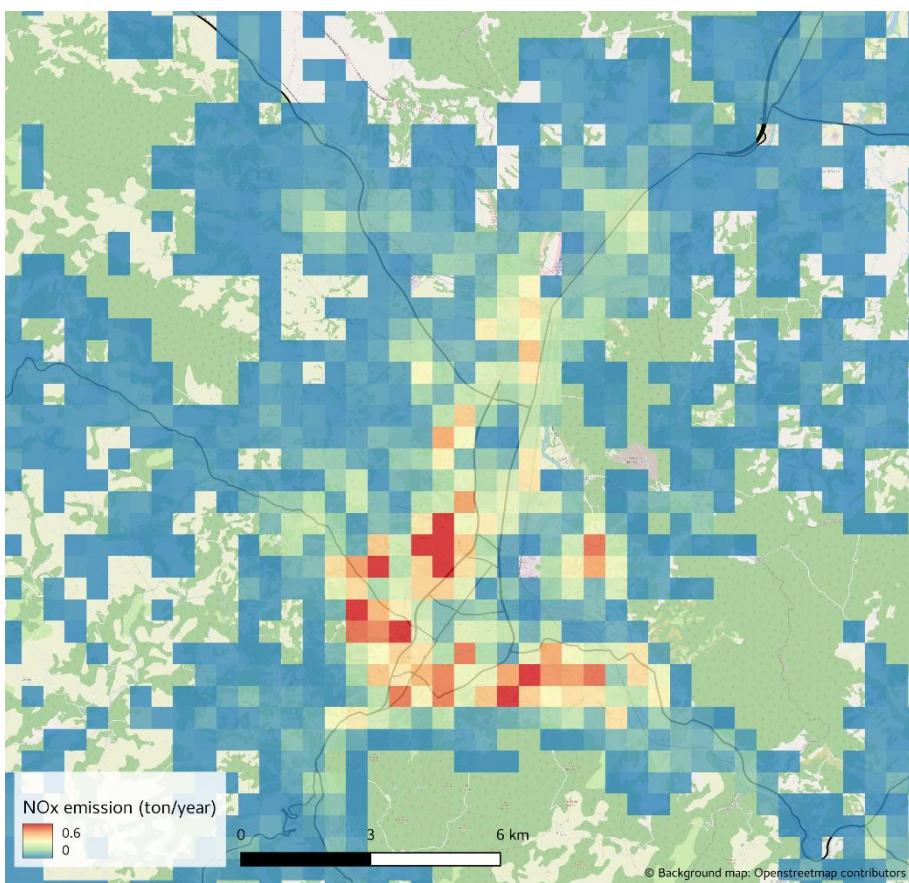
Slika 21: Korištenje grijanja stambenih objekata za Banja Luku. Imajte na umu da potrošnja energije u svakom poligonu također ovisi o veličini poligona

Kada se procijeni potrošnja energije za grijanje u svakom poligonu (i za svaku vrstu goriva), mogu se izračunati odgovarajuće emisije. Dijagram toka za ovaj proračun prikazan je na slici 20. Za svaku vrstu goriva koristili smo statistiku emisija iz EEA za 2019. godinu (EMEP/EEA, 2019.) za tip korištenih uređaja za grijanje. Za svaki uređaj, gorivo i supstancu, odgovarajući faktor emisije može se naći u bazi podataka EEA. Na ovaj način za sve poligone obezbjeđen je skup podataka koji pokriva sva relevantna stambena područja Banja Luke, sa emisijama za sve supstance za koje postoje faktori emisije. Dijagram toka za proračun emisije prikazan je na Slika 22.



Slika 22: Dijagram toka za proračun emisije

Poligoni emisije grijanja za različita stambena područja su rasterizirani u mreže koje odgovaraju modelu disperzije. Mapa rezultirajućih emisija NOx prikazana je na Slika 23.



Slika 23: Emisije NO<sub>x</sub> iz grijanja stambenih objekata za Banja Luku

### **Regionalne emisije**

Obično se upoređuje lokalni inventar emisija sa regionalnim podacima iz CAMS-a. Ako se emisije podudaraju, može se vjerovati da je inventar emisija sveobuhvatan i ukloniti CAMS sloj kako bi se izbjegao dvostruki unos. Ako se emisije ne podudaraju, potrebno je kombinirati postojeći inventar emisija sa CAMS skupom podataka. Ovdje je bilo toliko malo industrijskih lokacijskih izvora u lokalnom inventaru emisija da je korišten isključivo regionalni CAMS skup podataka. Ukupne emisije iz CAMS-a su zadržane, a rezolucija je smanjena. Za ostale sektore, regionalni podaci su zamijenjeni lokalnim podacima, što je bilo bolje. Više detalja o ukupnim emisijama za područje modela Banje Luke može se vidjeti u Tabeli 34.

### **Cjelokupne emisije**

Ukupne emisije glavnih zagađivača zraka za područje modela Banje Luke iz lokalnog skupa podataka o emisijama izračunali su RHMZ, SMHI i iz CAMS regionalne baze podataka o emisijama. U modelu MATCH sektori su izraženi kao SNAP kategorije.

Sektor	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Javna energija	87.4	61.4	181.1	89.1
Ostalo stacionarno sagorijevanje	89.7	61.8	2371.8	1170.5
Industrijsko sagorijevanje i procesi*	8.1	49	76.4	70.4

Sektor	NOx	SO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2-5</sub>
ostaci*	0	0	0	0
rastvarači*	0	0	0	0
Transport	760.3	1.5	181.1	78
Drugi mobilni izvori*	0	0	0	0
Otpad*	47.6	2.9	292.3	141.3
Poljoprivreda*	0.5	0.1	125.6	23.4

Tabela 34: Ukupne emisije (tone/godišnje) glavnih zagađivača zraka za područje modela Banja Luka iz lokalnog skupa podataka o emisijama zajedno sa CAMS regionalnom bazom podataka o emisijama (\*).

### Meteorološki uslovi

Rano je odlučeno da se izvrši modeliranje disperzije koje bi mogla uzeti u obzir strma topografija, posebno u Sarajevu, i efekti temperaturne inverzije koji zadržavaju zagađenje zraka uz tlo u nekim zimskim periodima.

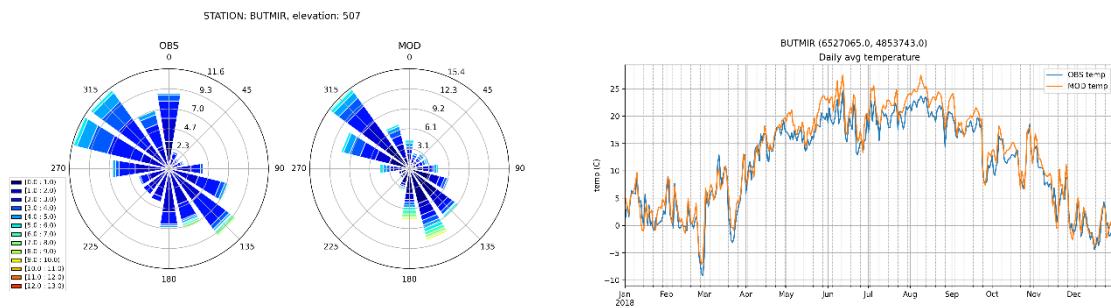
To podrazumijeva korištenje trodimenzionalnog skupa meteoroloških podataka visoke rezolucije. Skup podataka je kreiran korištenjem modela HCLIM38 koji je klimatska verzija modela HARMONIE koji je razvio Rossby centar u SMHI (Lindstedt, Lind, Kjellström, & Jones, 2015). HARMONIE koriste mnogi meteorološki instituti u Evropi za izradu svojih operativnih vremenskih prognoza. HCLIM38 je jednostavnija i brža verzija HARMONIE koja odgovara potrebama modeliranja disperzije.

Kako bi se postigla odgovarajuća rezolucija nad urbanim područjem, geografska rezolucija vremenskih podataka je isprepletena, što znači da je progresivno precizirana od periferije do urbanog područja. Ulazni podaci za vanjsku ivicu su dobijeni iz globalnog modela ECMWF (rezolucija 18 km), cijela Bosna i Hercegovina je izračunata sa rezolucijom od 12 km, a urbana područja Sarajeva i Banje Luke su izračunata sa rezolucijom od 1 km.

U svakoj tački mreže nekoliko vremenskih parametara (smjer vjetra, brzina vjetra, temperature, vlažnost, padavine, itd.) je izračunato po satu za 2018. godinu. Model daje vertikalne nivoje koji su neophodan unos meteoroloških polja za MATCH za izračunavanje atmosferskih procesa. To uključuje advekcijska i vertikalna polja vjetra važna za procjenu uticaja transporta zračnih masa na emitovane vrste zagađenja zraka.

MATCH-model također izračunava visinu graničnog sloja (ZI), što pokazuje koliko je jaka vertikalna turbulencija na području. Niski granični sloj označava nisko vertikalno kretanje zračne mase i snažno je povezan sa uslovima koji promovišu inverzije blizu površine. U odjeljku rezultata za svaki grad data je analiza brzine vjetra i visine graničnog sloja.

Rezultati modela upoređeni su sa dostupnim vremenskim zapažanjima na nivou tla i pokazali su konzistentnost sa dnevnim prosječnim temperaturama, a također pokazuju značajno, ali prihvatljivo precjenjivanje brzine vjetra u oba ekstrema (niska i visoka). Meteorološke stanice korištene za validaciju HCLIM rezultata za Sarajevo su Bjelave, Butmir i Bjelašnica i sinoptička stanica Banja Luka.



Slika 24: Poređenje modelirane i posmatrane temperature, brzine i smjera vjetra na stanicu za praćenje kvaliteta zraka i vremena Butmir za 2018. godinu.

### Konačna postavka MATCH modela

Regionalni off-line Eulerian CTM MATCH model korišten je s kemijskom shemom zasnovanom na (Simpson et al., 1993.) s daljnjim proširenjima opisanim od strane (Andersson, Helène, Robertson, Karlsson, & Engardt, 2017.). Shema razmatra 70 različitih hemijskih komponenti i ca. 150 hemijskih reakcija npr. 28 reakcija fotolize, oksidacija SO<sub>2</sub> u vodenoj fazi i jednostavna hemija NHX. Strukturu modela, advekciju, vertikalne vjetrove i više opisuju Robertson i Langner, 1998.

Granične koncentracije su izvedene iz modeliranja na evropskoj skali sa MATCH, koji koristi regionalne podatke o emisiji iz CAMS-REG v4.2. Pozadinske koncentracije glavnih zagađivača zraka kao što su NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> i PM<sub>2.5</sub>, ali i za nekoliko drugih zagađivača kao što su brojni NMVOC, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> i niz drugih komponenti važnih za npr. mehanizme hemijskih reakcija, unosili su se u domen modela svaka tri sata.

Simulacije modela su vođene sa rezolucijom mreže od 500 m i vremenskim koracima po satu tijekom cijele referentne 2018. godine. Podaci o emisijama iz CAMS-a su ponovo mapirani iz GNFR u SNAP sektore i korištene su standardne vremenske varijacije definirane za svaki sektor.

### Simulacije i iterativno podešavanje

Svi različiti podaci i parametri opisani gore dolaze sa vlastitom nesigurnošću koja utječe na kvalitetu krajnjih rezultata. Iz tog razloga, važno je procijeniti rezultate iz modela u poređenju sa sličnim modeliranjem, te u odnosu na mjerenja kvaliteta zraka sa zvaničnih stanica za

praćenje. Ova poređenja, ili procjena kvaliteta, često dovode do nekih prilagodbi postavki modela prije novog pokretanja i nove procjene kvaliteta.

Tipičan ciklus procjene kvaliteta uključivao je sljedeće korake:

Aktivnost	Daljnji detalji i svrha aktivnosti
Priprema ulaznih podataka	Npr. meteorologija i emisije
Postavka modela i pokretanje	Podešavanje potrebnih postavki modela
Praćenje rada	Ulazni podaci su uneseni. Greške? Upozorenja? Izlaz?
Provjera zapisnika o unosima	Greške? Upozorenja? Izlaz?
Kreiranje mapa	Pregledajte rezultate, da li je logično?
Izvlačenje podataka o nivoima zagađenja zraka	Za datu lokaciju, zvanična nadzorna stanica.
Kreiranje dijagrama vremenskih serija	Varijacije nivoa tokom vremena? Vrhovi/padovi, kada?
Poređenje rezultata sa mjerjenjima	Sličan trend? Vrhovi/padovi? Potcenjivanje/precjenjivanje?
Analizirati meteorološki uticaj	Vrhovi/padovi objašnjeni meteorologijom?

Tabela 35: Primjer postavljanja modela i ciklusa procjene kvaliteta

Provedeno je nekoliko simulacija modela sa različitim verzijama i preračunavanja podataka o emisiji kako bi se procijenio kvalitet modeliranih koncentracija zagađenja. U ovoj studiji provedeno je sedam ciklusa testnih simulacija sve dok se nije dostigao momenat gdje ne može biti daljnjih poboljšanja.

### Podjela izvora

Izvršena je raspodjela izvora za tri najvažnija sektora gdje su izračunate lokalne emisije (javna energija, ostali izvori sagorijevanja i transport). Za preostale sektore (industrija, rastvarači, ostaci, otpad i poljoprivreda) koji sadrže emisije iz regionalnog CAMS skupa podataka, podaci su stavljeni u jednu grupu i nazvani „ostalo“. Ova grupa je takođe uključivala pozadinske koncentracije koje dolaze izvan domena lokalnog modela. Zatim je izvršena raspodjela izvora za preostale sektore jer raspodjela tako niskog doprinosa ne bi bila relevantna zbog velike nesigurnosti. Potrebno je više rada na podacima o emisijama ovih sektora prije nego što se izvrši bilo kakva komplementarna raspodjela.

Metodologija korištena za izračunavanje izvorne proporcije navedenih sektora bila je smanjenje jednog sektora za 25% i pokretanje modela sa istim postavkama inače. Treba imati na umu da smanjenje količine emisije od samo 25% - a ne od 100% - omogućava modelu da razmotri interakcije između zagađivača iz različitih izvora u pogledu atmosferske hemije i lokalnih vremenskih efekata.

Smanjeni nivoi zagađenja vazduha unutar svakog sektora su zatim izračunati sukcesivno, što je rezultiralo sa tri odvojene simulacije, od kojih svaka predstavlja nivoe koncentracije sa smanjenim jednim sektorom. Da bi se procijenio puni doprinos svakog sektora, simulacija koja sadrži ukupne modelirane koncentracije oduzeta je od simulacije koja sadrži smanjenje svakog sektora i pomnožena sa četiri.

Doprinos sektora = (Ukupna koncentracija – Sektor smanjenja koncentracije) x 4

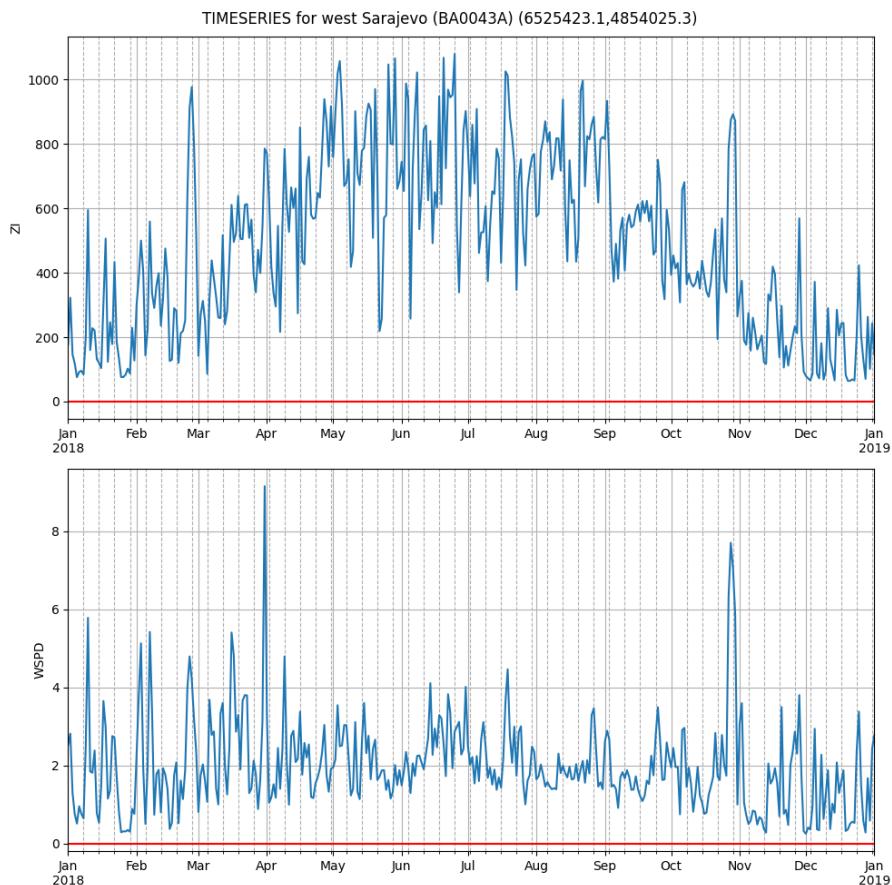
Na kraju su izvedene četiri finalne simulacije za svaki grad. Prva simulacija koja predstavlja ukupne koncentracije za 2018. godinu, nakon čega slijede tri dodatne simulacije koje predstavljaju izvorene doprinose tri sektora (javna energija, ostalo stacionarno sagorijevanje i transport).

## **Rezultati**

### **Rezultati za Sarajevo**

#### ***Meteorologija***

Model pokazuje da su se u Sarajevu tokom 2018. godine javljale česte epizode stabilnih vremenskih prilika koje označava niska visina graničnog sloja (ZI) (Slika 23). Uočeno je nekoliko dana sa visinom graničnog sloja ispod 200m u periodu od januara do marta i novembra do decembra. Ove situacije se mogu tumačiti kao veoma stabilne vremenske prilike sa inverzijama kada je razmjena zraka sa gornjim slojevima bila izuzetno ograničena ili nepostojeća, a emisije u zrak akumulirane u blizini tla. Visina graničnog sloja varirala je između 100m i 600m u zimskoj polovini godine, dok je ljeti mogla doseći i preko 1000m. Granični sloj je obično bio niži tokom zime, a viši tokom ljeta, što je također prikazano u modelu.



*Slika 25: Dnevni prosjeci visine graničnog sloja (ZI) u metrima i brzine vjetra (WSPD) u m/s, izračunati MATCH modelom za tačku mreže na Ildizi, zapadno Sarajevo, 2018.*

Zanimljivo je da je i tokom nekih dana u proljeće i ljetu granični sloj bio dosta nizak, posebno u aprilu i maju, ali i u junu i julu dostizao je ispod 400m. Visina graničnog sloja bila je vođena uglavnom temperaturom, vjetrom i naoblakom. U dolinskom gradu kao što je Sarajevo, inverzije se još lakše razvijaju. Noću kada temperatura padne, hladan gust zrak može da se spusti sa obronaka u doline, stvarajući bazene hladnog zraka (Largerion & Staquet, 2016). Tokom cijele godine, brzine vjetra su često bile prilično niske (ispod 2 m/s, slika 16b). Vetrovitije epizode primjećene su u periodu januar – mart, sa brzinom vjetra često iznad 4-5m/s kao dnevni prosjek. Krajem marta i oktobra zabilježena su i dva olujna dana sa vjetrovima oko i preko 8 m/s. Ljetni vjetar uglavnom je bio slab do umjeren, varirajući između 1,5 m/s i 4,5 m/s kao dnevni prosjek.

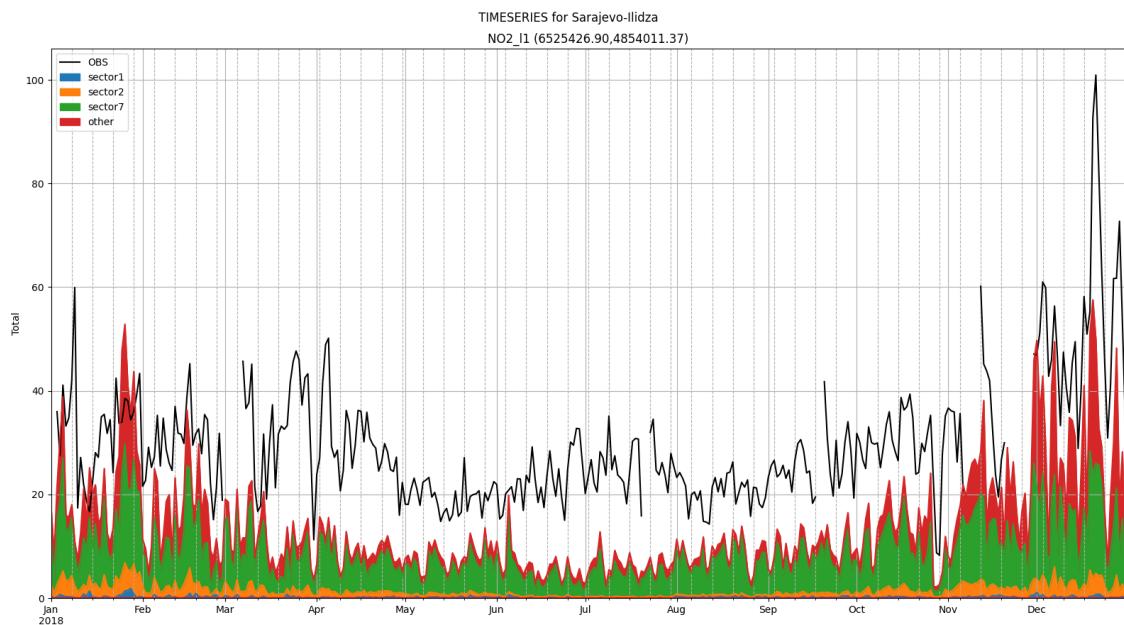
### ***NO<sub>2</sub> sezonska analiza***

Zimska polovina godine pokazala je najviše modelirane nivoje NO<sub>2</sub> u Sarajevu. Nivoi su bili visoki u centru grada i duž puteva koji okružuju grad (Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvoraError! Reference source not found., Slika A-1). Također je bilo očito da se

koncentracije smanjuju s udaljenosti od lokalnih izvora, što potvrđuje da je NO<sub>2</sub> uglavnom lokalni zagađivač. Upoređujući prvi kvartal (januar, februar i mart: JFM) sa posljednjim kvartalom (oktobar, novembar i decembar: OND), perjanica iznad grada izgleda raširenija s visokim koncentracijama koje pokrivaju veću površinu nad gradom tokom posljednjeg kvartala. Tokom oba kvartala, model je pokazao nekoliko epizoda sa hladnim i stabilnim uslovima, međutim u prvom kvartalu je bilo epizoda relativno velikih brzina vjetra gdje su vrhovi dostizali 4-5 m/s, kao što se može vidjeti na Slika 25. Ovo je dovelo do efikasnije ventilacije zraka između mirnih epizoda i na taj način objasnilo nižu akumulaciju koncentracije NO<sub>2</sub> tokom početka godine. Dok su se u posljednjem kvartalu (OND) emisije efikasnije nakupljale u blizini tla zbog manje ventilacije zraka. Epizode zatišja su se smjenjivale sa pikovima vjetrova koji su dostizali samo između 3-4 m/s, tako da je krajem godine primjećena manje efikasna ventilacija. Tokom ljetnje polovine godine (aprila, maj i juna: AMJ) i (juli, avgust i septembar: JAS), nivoi NO<sub>2</sub> su bili znatno niži. Zrak ima tendenciju da se bolje miješa tokom ljeta zbog viših temperatura koje rezultiraju turbulencijama, kao što se može vidjeti na Slika 25, gdje je vrijednost Zi izračunata modelom, visoka tokom toplih mjeseci u godini.

### ***Podjela izvora NO<sub>2</sub>***

Upoređujući nivoe godišnjeg prosjeka (Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika A-2 a) sa procijenjenim nivoima doprinosa za svaki sektor, bilo je očigledno da značajan dio modeliranog NO<sub>2</sub> dolazi iz sektora transporta (Slika 24). To se može vidjeti i na prostornim kartama u Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika A-2 d). Ca. 40-70% koncentracija NO<sub>2</sub> tokom cijele godine potiče iz transporta. Ljeti je iznosio 70%, a zimi je varirao između 40-50%. Relativno mali dio (~1-5%) dolazi iz grijanja velikog obima (Sektor 1, Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika A-2), a ostatak (25-30%) potiče iz drugih sektora (što uključuje industriju i otpad). Zanimljivo je napomenuti da sektor transporta ima manje emisije tokom zimske polovine godine. Tokom zimskih mjeseci vidimo i da drugi sektori u većoj mjeri doprinose koncentracijama, što je najvjerojatnije zbog sektora za industriju i otpad (Tabela 1) gdje su emisije relativno niske. Model generalno potcjenjuje uočene nivoe NO<sub>2</sub> tokom cijele godine (crna linija Slika 26).



*Slika 26: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima NO<sub>2</sub> sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor 2), Transport (zeleni sektor7) i drugi sektori uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi). Dnevna opažanja NO<sub>2</sub> (crna linija) dolaze sa mjesta mjerjenja u Ilidži, Sarajevo, a podaci modela predstavljaju lokaciju mreže na istoj lokaciji. Ukupne simulirane koncentracije NO<sub>2</sub> predstavljene su crvenim dijagramom.*

Tokom ljeta, kada su nivoi zagađenja relativno niski, modelirani nivoi se razlikuju od opservacija s promjenjivim faktorom od 2 do 3. To znači da su opservacije generalno dva do tri puta veće od modeliranih nivoa. Tokom zime, potcjenjivanja su niža i dostižu faktor od oko 1,8 u poređenju sa zapažanjima. Čini se da obrazac iz dana u dan prati isti trend gdje opservacije pokazuju pikove, kao i model. Ovo sugerira da model prilično dobro bilježi uticaj atmosfere na nivoe zagađenja, dok su ukupne emisije vjerovatno preniske. Drugi aspekt koji treba uzeti u obzir su vremenske varijacije npr. transportni sektor nije savršeno opisan za intenzitet saobraćaja u Sarajevu. Uzlažni trend uočen za posmatranja u junu i julu ne vidi se na modeliranim nivoima i može se objasniti činjenicom da model prepostavlja da se emisije iz saobraćaja smanjuju u julu – to možda nije slučaj u Sarajevu gdje bi se promet mogao stvarno povećati zbog turizma. Dakle, standardne vremenske varijacije ugrađene u model mogu se poboljšati pristupom većem broju podataka u vezi npr. saobraćaj se broji na satnoj ili dnevnoj bazi tokom cijele godine. Još jedan faktor koji doprinosi niskim modeliranim nivoima NO<sub>2</sub> vjerovatno je malo precijenjena brzina vjetra od strane modela HCLIM38. NO<sub>2</sub> je osjetljiv na vjetar i poznato je da se nivoi koncentracije smanjuju s većom brzinom vjetra (Grundström et al., 2015). To je očigledno kako u posmatranjima tako i u modeliranim nivoima krajem marta i oktobra, gdje se u danima sa olujnim vremenom uočavaju značajne depresije.

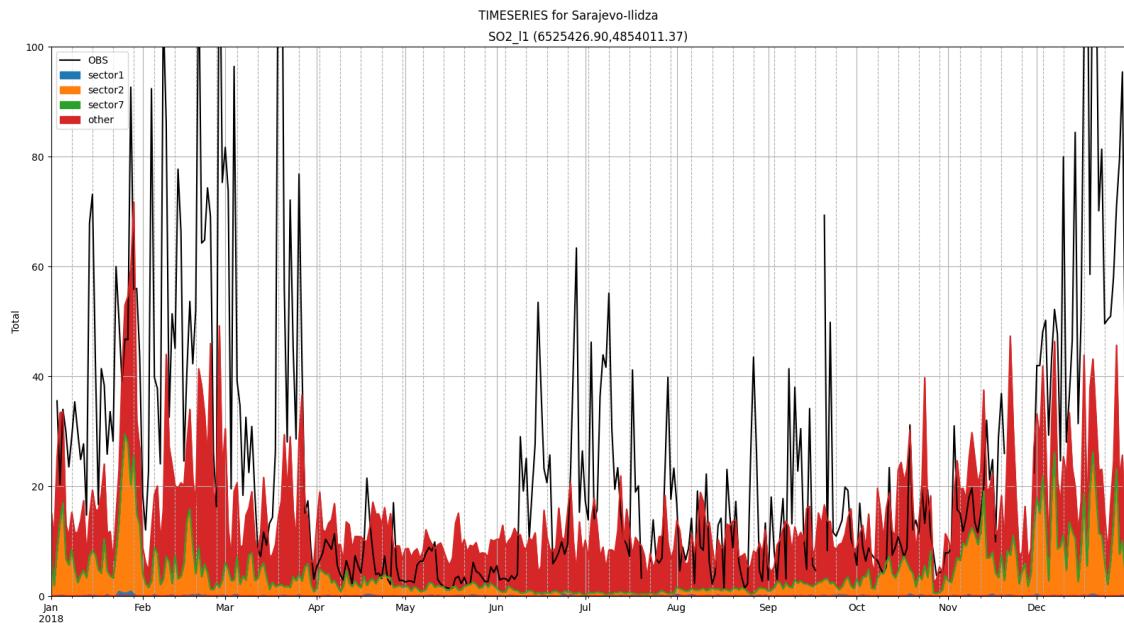
## ***SO<sub>2</sub> sezonska analiza***

Iz prostornih karata može se primijetiti da su nivoi SO<sub>2</sub> bili visoki u zimskoj polovini godine (Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora, JFM i OND, Slika A-3), ali se također može primijetiti utjecaj iz nelokalnog izvora gdje je transport SO<sub>2</sub> sa sjeverozapada očigledan. Visoki nivoi su uočeni daleko od lokalnih izvora, posebno tokom prvog kvartala (Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora, JFM Slika A-3 a). Vjetrovitiji uslovi tokom prvog kvartala ukazuju na to da je transport u modelsko područje/Sarajevo bio efikasan, dok je tokom posljednjeg kvartala transport dolazio do manjeg izražaja kada su vjetrovi bili slabiji. Lokalni izvori su tako u posljednjem kvartalu u većoj mjeri dominirali doprinosom visokim nivoima. Drugim riječima, transport je bio manje značajan u posljednjem kvartalu gdje su vjetrovi generalno slabiji.

### ***Podjela izvora SO<sub>2</sub>***

Od lokalnog skupa podataka o emisijama, sektor grijanja domaćinstava je najznačajniji doprinos nivou SO<sub>2</sub> u Sarajevu. Sektor varira između 1% ljeti do 40% zimi u pogledu doprinosa ukupnim nivoima SO<sub>2</sub> (Slika 25). Sektori transporta (sektor 7) i javne energije (sektor 1) veoma malo doprinose nivoima SO<sub>2</sub>, koji variraju između 1-10% tokom godine. Izvor iz javnog energetskog sektora bio je vidljiv na području između Općine Vogošća i Hotonja, sjeverno od Sarajeva, a može se vidjeti i na prostornim kartama za sektorske doprinose (Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora ,Slika A-4 b). Najveći doprinos dolazi iz kategorije ostalih sektora, koji varira između 60-99%. Ovdje se očekuje da će doprinos lokalnih industrijskih izvora biti značajan jer su ukupne emisije za ovaj sektor u CAMS relativno visoke (Tabela 1). U trenutnoj postavci emisija, doprinos ovih industrijskih lokacijskih izvora je raširen na velikom području mreže zbog niske prostorne rezolucije skupa podataka, čime se također prikrivaju lokalni gradijenti koncentracije.

Prevoz izvan grada je takođe važan što se vidi iz npr. prosječne godišnje prostorne karte (Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika A-4 a) i sezonske karte posebno tokom prvog i četvrtog kvartala (Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora, JFM i OND na Slici A-3 a i d). Korelacija između modeliranih i posmatranih vrijednosti je prilično loša za SO<sub>2</sub> (Slika 27).



*Slika 27: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima SO<sub>2</sub> sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi). Dnevna opažanja SO<sub>2</sub> (crna linija) dolaze sa mjesta mjerena u Ilidži, Sarajevo, a podaci modela predstavljaju tačku mreže na istoj lokaciji. Ukupne simulirane koncentracije SO<sub>2</sub> su predstavljene crvenim dijagramom*

Modelirani nivoi su generalno potcijenjeni za faktor od tri ili više tokom posmatranih pikova i zimi i ljeti. Nadalje, modelirani nivoi su u velikoj mjeri precijenjeni između aprila i juna. Ove fluktuacije između podcijenjenih i precijenjenih prema modelu mogu značiti da je podacima o emisijama potrebno značajno poboljšanje kako bi se ispravno opisali stvarne emisije izvora u Sarajevu.

Od juna do septembra bilo je velikih uočenih pikova u SO<sub>2</sub>, koji su se ponavljali na sedmičnoj bazi, koje model nije uhvatio. Ovi pikovi su vjerovatno uzrokovani lokalnim izvorom, koji najvjerovaljnije nedostaje u podacima o emisiji. Vrhovi takođe mogu biti rezultat transporta izvan regionala kao što je naznačeno u drugom i trećem kvartalu na sezonskim kartama (Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika A-4 b i c). Sjeverozapadni vjetrovi su bili prilično uobičajeni u junu i julu, pa je transport iz ovog pravca mogao nositi oblake emisija iz lokalnih i udaljenih izvora. Emisije iz industrije i električne energije u gradu Kakanju (Tvornica cementa i Termoelektrana) mogle bi značajno doprinijeti transportu zagađivača zraka na velike udaljenosti u sarajevsku regiju. Ova postrojenja se nalaze 30-40 km sjeverozapadno od Sarajeva i očekuje se da će se emisije iz ovih postrojenja razrijediti prije nego stignu u Sarajevo. Proširivanje domena modela na ove regije moglo bi otkriti više informacija o

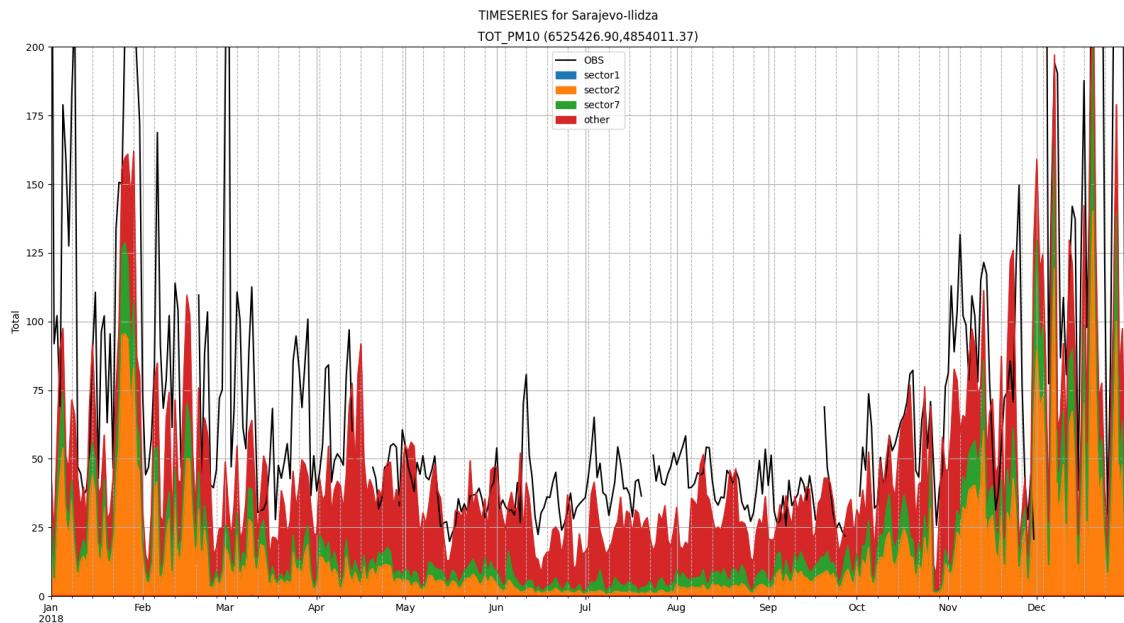
doprinosu emisijama iz ovih postrojenja i transportu sa sjeverozapada. Nadalje, model povratne putanje kao što je HYSPLIT mogao bi se koristiti za praćenje porijekla i kretanja zračne mase tokom vremena. Ovo može pružiti više informacija o tome gdje je zračna masa transportovana i potencijalnim izvorima koji su mogli imati uticaja.

### **Čestice, sezonska analiza**

I  $PM_{10}$  i  $PM_{2.5}$  pokazuju visoke nivoe tokom JFM i OND (Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika A-5 i Slika A-7), posebno OND slično obrascu NO<sub>2</sub>. Nivoi se smanjuju s udaljenosti od lokalnih izvora, što sugerira da je koncentracijsko opterećenje čestica pretežno vođeno lokalnim izvorima emisije. Indikacija transporta izvan domene modela je očigledna tokom OND-a sa sjeverozapada. Međutim, to bi moglo biti i posljedica odnošenja gradskog oblaka od lokalnih izvora u Sarajevu jugoistočnim vjetrovima. Najčešći smjerovi vjetra u Sarajevu su sjeverozapadni i jugoistočni koji guraju gradsku perjanicu u ovim smjerovima, istovremeno prenoseći čestice u grad i iz njega. Nivoi tokom AMJ bili su relativno niski i ujednačeni u cijeloj domeni modela sa tendencijom formiranja viših nivoa oko centra Sarajeva. Emisije su generalno bile niže tokom ljeta, ali dobro izmiješani uslovi bili su uobičajeni i vođeni jakom termičkom turbulencijom tokom toplijih mjeseci, stvarajući velike vertikalne vrtloge u atmosferi što je rezultiralo širenjem čestica i vertikalno i horizontalno preko područja modela. Nivoi tokom kasnog ljeta i rane jeseni (JAS) bili su relativno niski, ali koncentrisani na područja gdje postoje lokalni izvori emisije.

### **Čestice, raspodjela izvora**

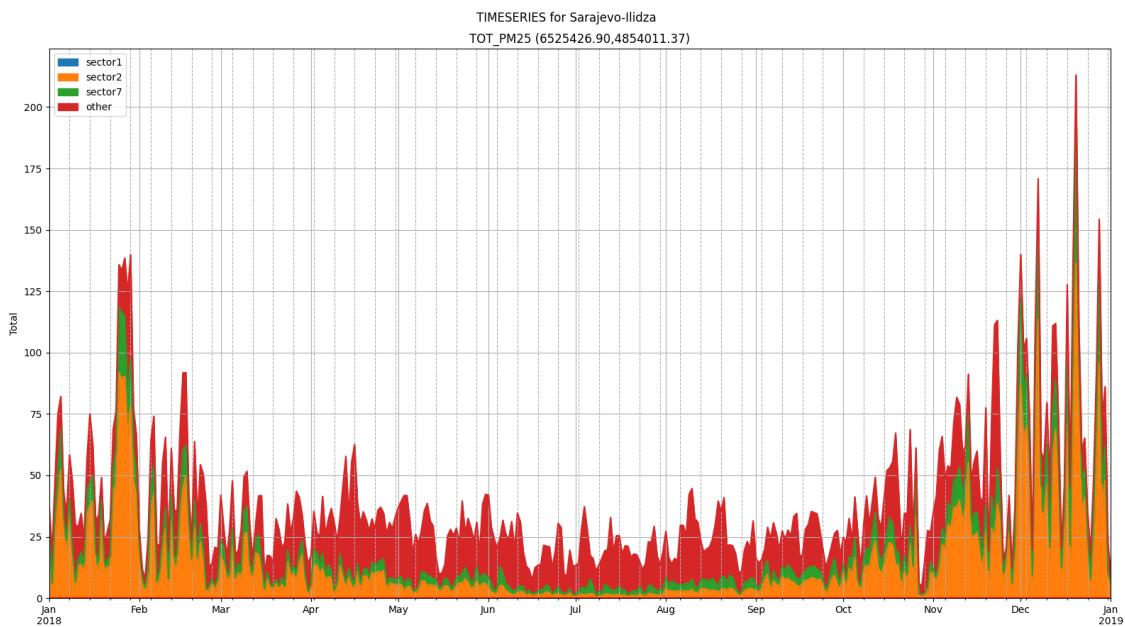
Grijanje domaćinstava (sektor 2 na Slika 28) je značajno doprinijelo nivoima PM<sub>10</sub>, do 50-60% zimi, dok je ljeti prilično nizak ~15%. Sektor transporta je doprinjeo sa oko 15% nivoima PM<sub>10</sub> zimi, a takođe je bio veoma nizak tokom ljeta. Druga sektorska kategorija bila je značajna tokom ljetne polovine godine.



*Slika 28: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima PM<sub>10</sub> sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi). Dnevna opažanja PM<sub>10</sub> (crna linija) dolaze sa mjesta mjerena u Ilidži u Sarajevu i podaci modela predstavljaju tačku mreže na istoj lokaciji. Ukupne simulirane koncentracije PM<sub>10</sub> predstavljene su crvenim dijagramom*

Otpad i industrijski izvori su ovdje vjerovatno veoma važni sa svojim relativno visokim emisijama (Tabela 1), ali postoje i emisije ostataka i poljoprivrede, iako su niske u poređenju sa drugim sektorima. Ove emisije su iz CAMS regionalnog skupa podataka o emisiji s grubljom rezolucijom od novog skupa podataka o lokalnim emisijama. Bilo bi korisno pregledati ove izvore emisije i izračunati ih na višoj rezoluciji mreže kako bi se izvršila kvalitativna raspodjela izvora na ove sektore. Nadalje, na nivoe PM<sub>10</sub> uticao je i transport izvan grada (Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika A-6 a). Upoređujući ukupne modelirane nivoe (crveni grafikon na Slika 28) sa zapažanjima (crna linija na Slika 28) očigledno je da modelirani nivoi PM<sub>10</sub> prilično dobro koreliraju sa zapažanjima uz neke izuzetke za nekoliko pikova uočenih u npr. januaru, februaru i martu. Ukupna razlika između modeliranih nivoa PM<sub>10</sub> je otprilike polovina posmatranih nivoa. Tokom pikova PM<sub>10</sub> razlika je mnogo veća u npr. marta gdje su posmatrani nivoi bili oko pet puta veći od modeliranih nivoa. Za frakciju finih čestica uočen je sličan obrazac kao kod PM<sub>10</sub>.

Veliki dio frakcije PM<sub>10</sub> sastoji se od PM<sub>2.5</sub> i stoga se analiza koja je ovdje napravljena za PM<sub>10</sub> primjenjuje i na PM<sub>2.5</sub>. Međutim, ne može se napraviti analiza između modeliranih i uočenih vrijednosti za PM<sub>2.5</sub> budući da nedostaju podaci posmatranja za ovu komponentu.

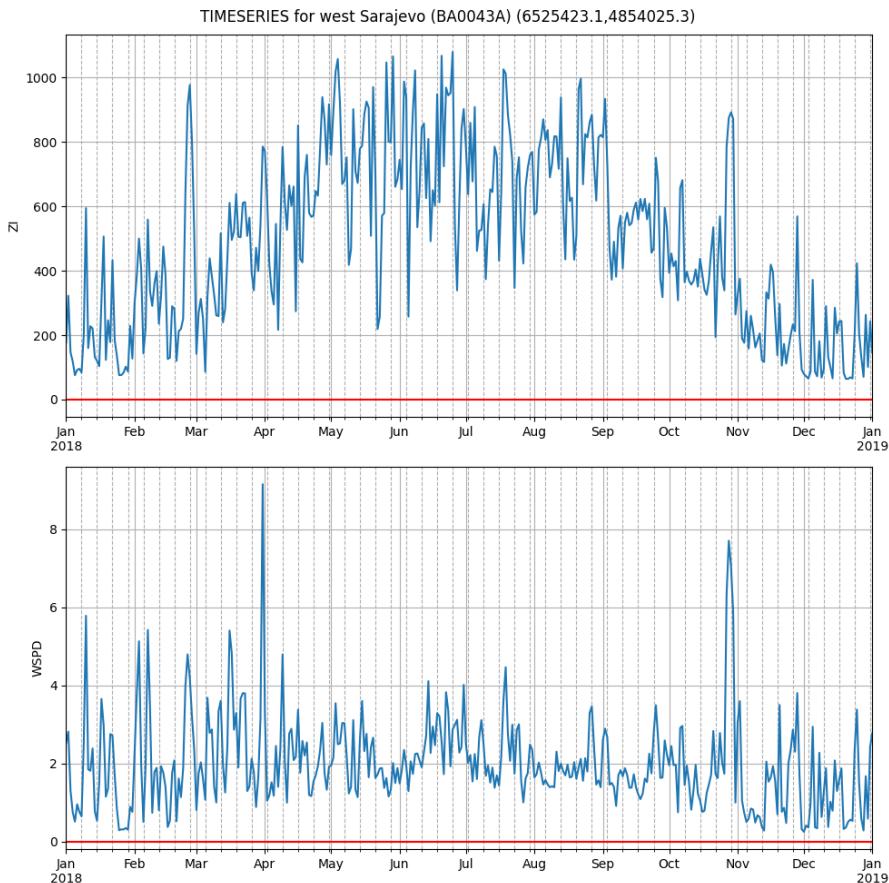


*Slika 29: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima PM<sub>2.5</sub> sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi). Dnevna opažanja PM<sub>2.5</sub> (crna linija) dolaze sa mjesta mjerena u Ilidži u Sarajevu i podaci modela predstavljaju tačku mreže na istoj lokaciji. Ukupne simulirane koncentracije PM<sub>2.5</sub> predstavljene su crvenim dijagramom*

## Rezultati za Banju Luku

### Meteorologija

Visina graničnog sloja varirala je tokom cijele godine u Banjoj Luci prema očekivanjima (Slika 30) sa malim visinama zimi i višim ljeti. Veoma nizak granični sloj (<200m) je često primijećen u periodu januar-februar i novembar-decembar, ali i jedan dan u maju. Brzine vjetra su varirale između 0,5 i 5 m/s kao dnevni prosjek tokom cijele godine (Slika 30).



Slika 30: Dnevni prosjeci visine graničnog sloja (ZI) u metrima i brzine vjetra (WSPD) u m/s, izračunati MATCH modelom za mrežnu tačku u centralnom dijelu Banje Luke, 2018.

U ljetnom periodu primjećeni su relativno slabi vjetrovi, koji su varirali između 1 i 3 m/s, a epizode sa veoma slabim vjetrom (<1 m/s) bile su česte u januaru-februaru i novembru-decembru, ali i ponegjde u aprilu-oktobru. Krajem marta, aprila i oktobra zabilježeni su vjetroviti uslovi sa brzinama vjetra iznad 4 i 5 m/s. Mart je generalno bio veoma vjetrovit mjesec.

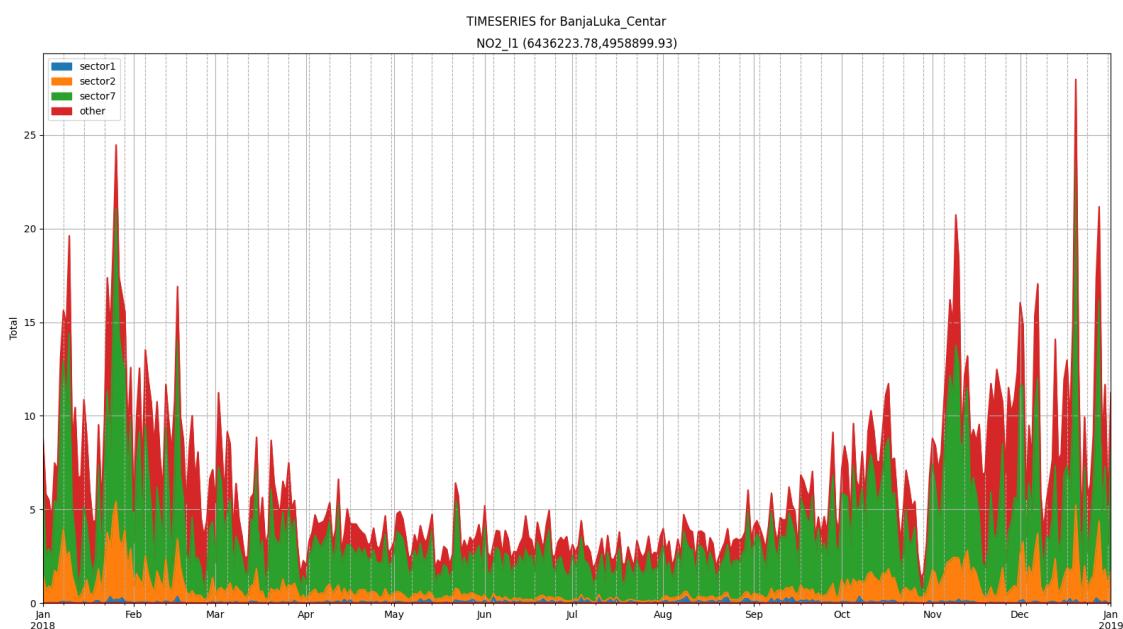
### **NO<sub>2</sub> sezonska analiza**

Kao što se može vidjeti iz prostornih karata u Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, modelirane koncentracije NO<sub>2</sub> u Banjoj Luci su generalno prilično niske, sa kvartalnim

prosjekom koji zimi dostiže i do 8 ug/m<sup>3</sup> (JFM i OND Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-1 a i d) i 5 µg/m<sup>3</sup> ljeti (JAS, Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-1 c). Ovo je očekivano jer su emisije veoma niske (Tabela 2). Zimske sezone pokazuju najviše nivoe, a više na kraju godine (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-1 a i d). Ljeti je NO<sub>2</sub> niži (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-1 b i c). Visoki nivoi se primjećuju u blizini centra Banje Luke i duž saobraćajnica.

### **Podjela izvora NO<sub>2</sub>**

Koncentracije NO<sub>2</sub> u Banjoj Luci su u prosjeku niske. Sve u svemu, sektor saobraćaja predstavlja najveći doprinos ukupnim nivoima u godini. Pikovi predstavljaju ca. 60% (sektor 7 na Slika 31).



*Slika 31: Dnevni simulirani doprinosi sektora nivoima NO<sub>2</sub> sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi) za mrežnu tačku u centru Banja Luke . Ukupne simulirane koncentracije NO<sub>2</sub> predstavljene su crvenim dijagramom*

Grijanje domaćinstava doprinosi koncentracijama uglavnom u zimskom periodu, posebno u periodu januar-februar i oktobar-decembar (sektor 2 na Slika 31) kada varira između 1-16% od ukupno modeliranih nivoa koncentracije. Ostali sektori variraju između 20-80%, sa visokim doprinosima tokom zimskih špica. U ovu kategoriju uključeno je nekoliko sektora zajedno sa nivoima pozadine. Očekuje se da će pozadinski nivoi imati vrlo mali ili zanemarljiv uticaj na nivoe u Banjoj Luci jer NO<sub>2</sub> uglavnom potiču iz lokalnih izvora. Budući da su modelirane koncentracije u početku vrlo niske, rezultat modeliranih koncentracija u Banjoj Luci je u velikoj

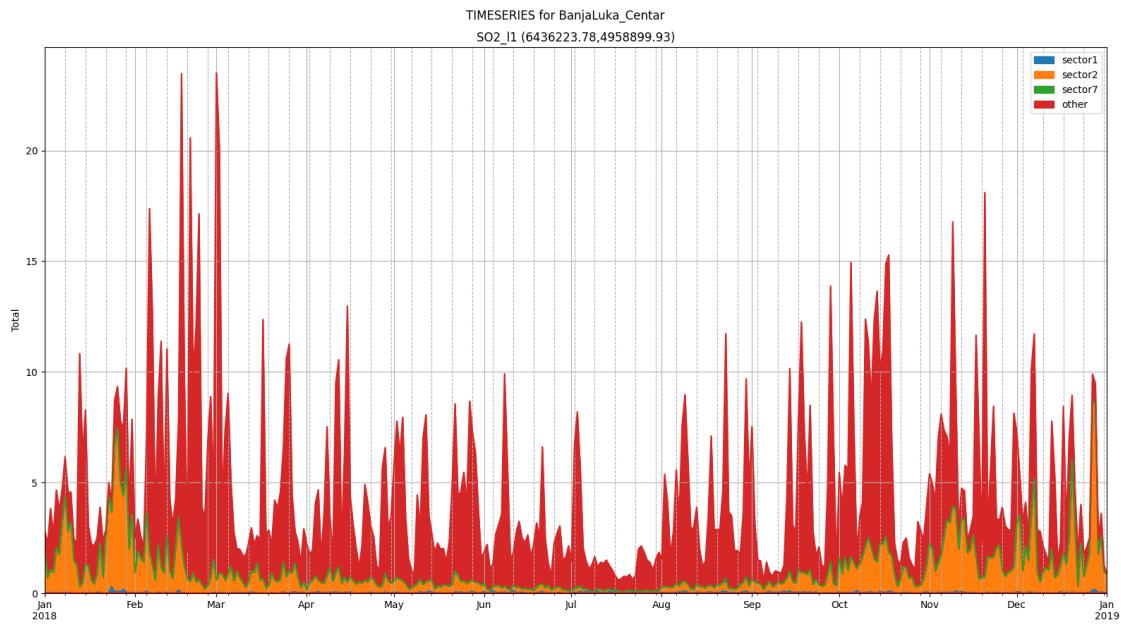
mjeri neizvjestan. Potreban je dalji rad sa ukupnim emisijama da bi se poboljšali rezultati modeliranja.

### ***SO<sub>2</sub> sezonska analiza***

Gledajući nivo SO<sub>2</sub>, opće zapažanje je da su modelirane koncentracije u Banjoj Luci veoma male tokom cijele godine. Kvartalni znaci dosežu samo do oko 8 ug/m<sup>3</sup>, a izvoriste se može primijetiti u sjeveroistočnom dijelu Banje Luke (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-3 a-d) gdje se mogu uočiti najviši modelirani nivoi SO<sub>2</sub> u gradu. Visoki nivoi se primjećuju u zimskoj polovini godine, posebno vezano za lokacijski izvor u Banjoj Luci (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-3 a i d). Takođe postoji određeni uticaj iz pozadine u zapadnim, južnim i istočnim pravcima tokom prvih mjeseci godine (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-3 a). Područje vidljivog izvora u Banjoj Luci vjerovatno je čeličana i željezara (Jelšingrad Livar Livnica čelika) i potiče iz regionalnih CAMS podataka o emisiji za industrijski sektor. Da bi se dalje identifikovalo i potvrdilo da je to stvarni izvor, CAMS emisije treba dalje procijeniti kako bi se identifikovali specifični izvori uključeni u grublje podatke mreže i ponovo izračunati na višu rezoluciju mreže. Veća rezolucija mreže će tada omogućiti precizniju lokaciju izvora, a time i identifikaciju.

### ***Podjela izvora SO<sub>2</sub>***

Za SO<sub>2</sub> je očigledno da kategorija sektora ostalo predstavlja najveći udio od ukupno modeliranih dnevnih nivoa i doprinosi do 90% dnevnih nivoa SO<sub>2</sub> (crveni dijagram na Slika 32). Industrijski sektor zajedno sa osnovnim nivoima su najznačajniji izvori emisija u ovoj kategoriji sektora jer ostali sektori imaju vrlo male ili nikakve emisije (Tabela 2).



*Slika 32: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima SO<sub>2</sub> sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostalo stacionarno sagorijevanje (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveni drugi) za tačku mreže u centru Banja Luke . Ukupne simulirane koncentracije SO<sub>2</sub> su predstavljene crvenim dijagramom*

Nekim pikovima, međutim, dominira sektor grijanja u domaćinstvima, npr. u januaru i decembru i može dostići do 65-90% ukupne koncentracije. Saobraćaj i javna energija predstavljaju veoma mali udio nivoa zagađenja. Gledajući srednju godišnju vrijednost na prostornim kartama (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-4) ovi nalazi su također uočljivi gdje grijanje u domaćinstvima varira od 0-13% (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-4 c), dok javna energija i transport izgledaju prilično prazni u domenu modela (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-4 b i d). Činjenica da javna energija ne doprinosi toliko opterećenju zagađenja na nivou tla objašnjava se činjenicom da se veliki dio (99,75%) emisija iz ovog sektora ubrizgava u atmosferu na višem nivou (visine 184 m ili više). Emisije na višim nivoima će u većoj mjeri biti predmet vertikalnog transporta u atmosferi, a manji dio emisija će doći do tla. Stoga će se nivoi koncentracije na nivou tla izračunavati niže. Emisije iz kućnih izvora grijanja, (smještene u sektoru Ostalo stacionarno sagorijevanje), međutim, sve se emituju na nivou tla od strane modela.

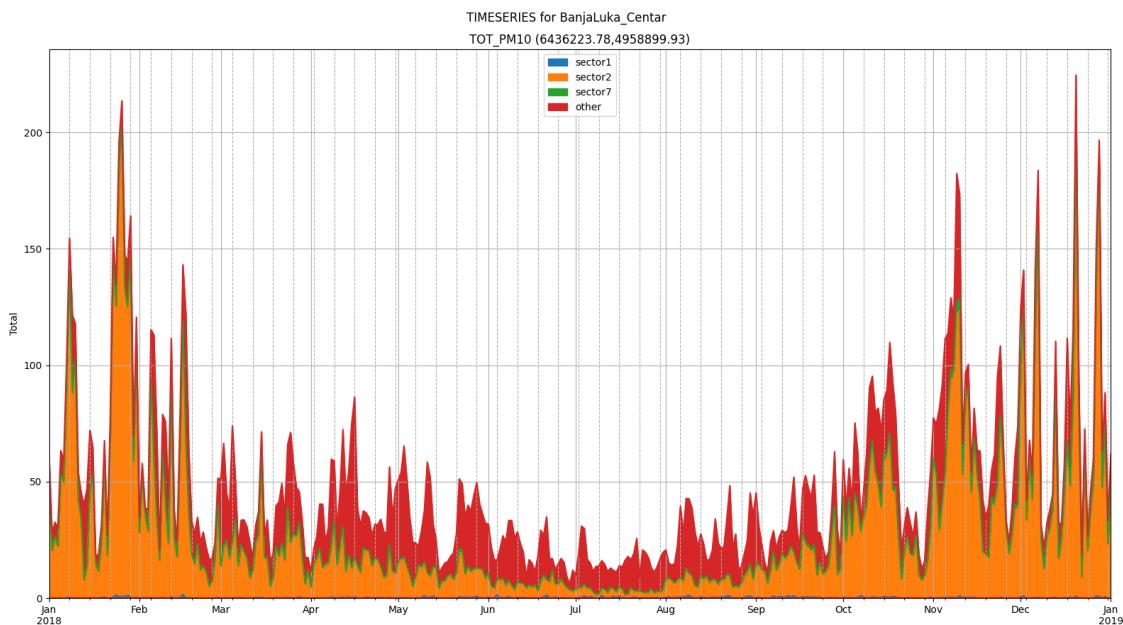
### Čestice, sezonska analiza

I krupne i fine čestice (PM<sub>10</sub> i PM<sub>2.5</sub>) pokazuju visoke nivoe tokom zime u Banjoj Luci (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-5, B-7 a i d). Najniži nivoi su uočeni u kasno ljeto i ranu jesen (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-5 c). Koncentracije se smanjuju s udaljavanjem od centra grada i oko cesta, što ukazuje da koncentracijama dominiraju lokalni izvori. Međutim, na kraju godine (OND, Prilog 3 – Banja

Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-5 d) činilo se da postoje relativno visoki nivoi PM<sub>10</sub> u cijelom domenu modela, što potencijalno ukazuje na transport iz vanjskih regija.

### Čestice, raspodjela izvora

U zimskom periodu, kada su nivoi čestica visoki, sektor grijanja domaćinstava često predstavlja najveći udio (do 90%) modeliranih pikova u centralnim dijelovima Banje Luke (Slika 34). Tokom proljetnih i ljetnih mjeseci druga kategorija sektora je dominirala nivoima zagađenja PM<sub>10</sub>, varirajući između 50-90% ukupnih nivoa, koji su generalno niži po veličini.

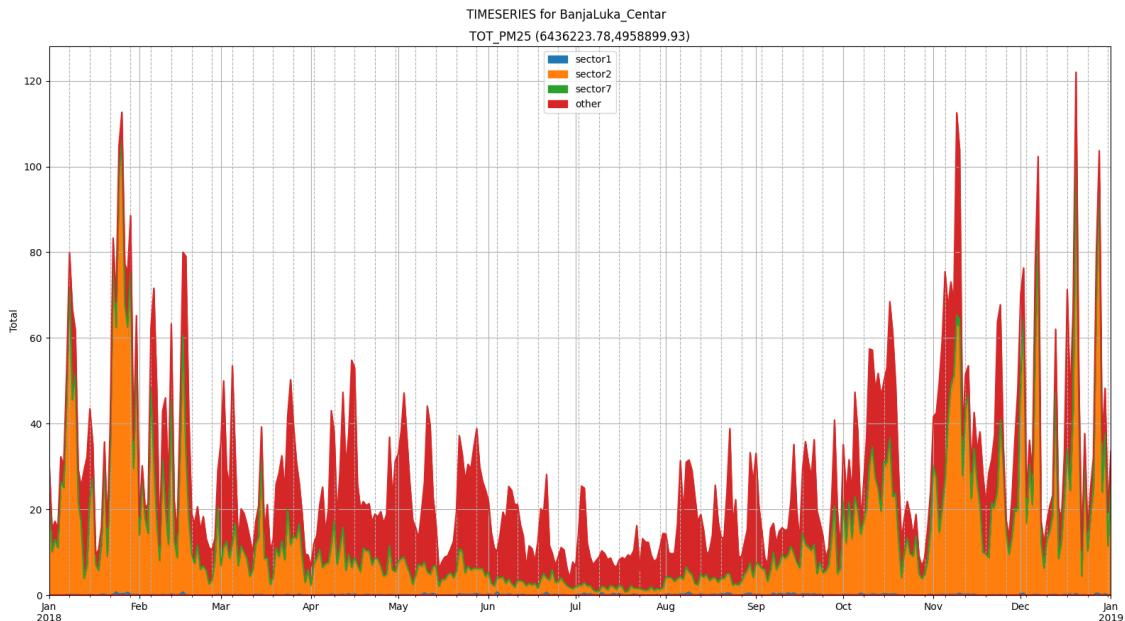


Slika 33: Dnevni simulirani sektorski doprinosi nivoima PM<sub>10</sub> sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostala stacionarna sagorijevanja (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveno drugo) za tačku mreže u centru Banje Luka. Ukupne simulirane koncentracije PM<sub>10</sub> predstavljene su crvenim dijagramom

Javna energija i sektor transporta doprinose vrlo malo dnevnom nivou PM<sub>10</sub>. Gledajući godišnji prosjek, međutim, sektor transporta doprinosi između 0-4% godišnjih srednjih nivoa duž puteva (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-6 a i d).

Za PM<sub>2.5</sub> (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-8) obrazac je vrlo sličan. Tokom zimskih i jesenjih mjeseci (januar, februar, novembar i decembar) zabilježeni su najviši nivoi (Slika 34). Visoki nivoi su varirali između 80-120 ug/m<sup>3</sup> i dominirao je sektor grijanja u domaćinstvima 55-90% (Slika 32). Tokom ostatka mjeseci (mart-novembar) nivoi su uglavnom bili upola niži, varirajući između 10-70 ug/m<sup>3</sup> i dominirala je druga kategorija sektora koja varira u proporciji između 50-90%.

Na godišnjoj razini grijanje domaćinstva iznosi ca. 50% doprinosa ukupnim nivoima PM<sub>10</sub> u oblastima gde su nivoi visoki (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-7 a). Saobraćajni sektor zauzima mnogo manji dio, cca. 4% i javna energija je mnogo manja čak i od toga. Ostali sektori, kao što su industrija i otpad, čine ostatak doprinosa na godišnjem nivou, takođe sa određenim uticajem iz pozadine.



*Slika 34: Dnevni simulirani sektorski doprinosi PM<sub>2.5</sub> nivoa sektora Javna energija (plavi sektor1), Ostala stacionarna sagorijevanja (narandžasti sektor2), Transport (zeleni sektor7) i svih ostalih sektora uključujući pozadinske koncentracije (crveno drugo) za tačku mreže u centru Banja Luke. Ukupne simulirane koncentracije PM<sub>2.5</sub> predstavljene su crvenim dijagramom*

Za fine čestice, obrazac na godišnjoj osnovi je vrlo sličan onom kod PM<sub>10</sub> (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-8 a). Grijanje domaćinstava predstavljalo je 50%, a transport 3% u područjima sa visokim nivoom PM<sub>2.5</sub> (Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora, Slika B-8 c i d), dok je javna energija bila izuzetno mala i beznačajna u trenutnoj postavci modela. Druga kategorija sektora predstavlja preostale izvore u kojima industrija i otpad vjerovatno najviše doprinose.

### Neizvjesnost i buduća poboljšanja

Nesigurnosti u rezultatima modela su, kako vidimo, uglavnom vođene sa tri faktora: ukupne emisije, precijenjene brzine vjetra i vremenske varijacije sektora. Najveći napredak bi se postigao poboljšanjem inventara emisija.

Tačkasti izvori iz industrije i daljinskog grijanja moraju se bolje opisati u smislu sastava i količine emisije, kao i njihove varijacije aktivnosti (npr.: daljinsko grijanje je povezano s vanjskim temperaturama, industrija koja radi 24 sata dnevno, 7 dana u tjednu ili radno

vrijeme, složene emisije nekih industrija, a posebno metalne industrije). Takvu vrstu informacija vlasnici i operateri smatraju osjetljivom. Stoga organizacije koje su zadužene za inventarizaciju emisija moraju imati jasan mandat od vlade da to učine, a vlasnici jasne instrukcije da dijele te podatke u namjenske svrhe.

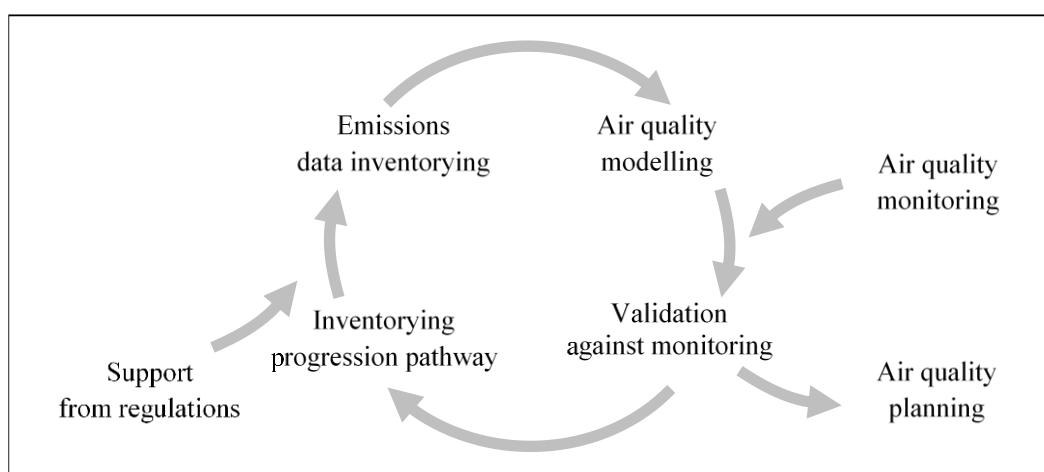
Ovisno o lokaciji, već učinjeni napor na inventarizaciji emisija su od suštinskog značaja i vrlo važni. Trenutni inventar emisija će, međutim, imati koristi od kontinuiranog ažuriranja metoda inventarizacije sa više informacija o lokacijama, faktorima emisije i vremenskim varijacijama povezanih aktivnosti izvora.

Često je potrebno više informacija o vrstama goriva koje se koriste za grijanje stanova, kao i bolje informacije o uređajima i njihovoj potrošnji goriva.

Zahvaljujući sistemu registracije vozila, vozni park je poznat, ali bi podaci o godišnjoj kilometraži trebali bizi bolji. Uz to, uklanjanje katalizatora i filtera za čestice sa vozila često se navodi kao čest problem u BiH što otežava preciznu procjenu saobraćaja.

Centralizacija inventara emisija mogla bi biti od velike pomoći kako bi se poboljšala i ubrzala kružna procjena dobrog kapaciteta za modeliranje kvaliteta zraka:

Inventarizacija podataka o emisiji → modeliranje kvaliteta zraka → validacija u odnosu na praćenje kvaliteta zraka → identifikacija putanja napredovanja za inventarizaciju.



Provođenje podataka o emisijama kroz model disperzije pokazuje koliko dobro se simulirani nivoi zagađenja odnose na izmjerene nivoe zagađenja. U trenutnom inventaru emisija date su informacije za tri sektora. Vjeruje se da su oni ponekad potcijenjeni, a neki važni izvori tačaka nedostaju. Više informacija iz drugih sektora je također potrebno za detaljniji rezultat simulacije modela.

Brzine vjetra na dnevnoj bazi bile su u prosjeku za 0,5 m/s veće od uočenih brzina vjetra. Ovo može uticati na modelirane nivoe koncentracije. Ako se mogu dobiti bolji podaci o brzini

vjetra, učinak manjih brzina vjetra na rezultat modeliranja može se testirati pokretanjem nove simulacije s ažuriranim ulaznim podacima o brzini vjetra.

Standardne vremenske varijacije sektora ugrađenih u model MATCH zasnovane su na informacijama o izvorima emisije koji se nalaze u sjeverozapadnoj Evropi. Ovo bi se moglo poboljšati u BiH za npr. saobraćaj, koji može imati nešto drugačije mjesecne varijacije. Dnevna vremenska varijacija saobraćaja se također može prilagoditi bh. navikama. Nadalje, vremenska varijacija bi se mogla dalje razvijati kako bi uključila razmatranje temperature okoline. Kada su temperature veoma niske, emisije iz stambenog grijanja mogu biti čak i veće nego što je opisano u trenutnim vremenskim varijacijama za ovaj sektor. Za ovakve promjene potrebno je više informacija o intenzitetu izvora emisije tokom niskih temperatura u BiH. Dalje eksperimentisanje i testiranje različitih vremenskih varijacija i simulacionih testova je takođe potrebno.

## Završni sažetak studije MATCH

U ovoj studiji simulirali smo nivo zagađenja zraka  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{PM}_{2.5}$  u Sarajevu i Banjoj Luci koristeći podatke o emisiji visoke rezolucije za tri sektora; Javna energija (veliki objekti za grijanje i neki industrijski objekti), ostalo stacionarno sagorijevanje (pojedinačni izvori grijanja u domaćinstvu) i transport (cestovni saobraćaj) i podaci o emisijama grube rezolucije iz CAMS-a za druge sektore (npr. industriju, ostatke, otpad i poljoprivrednu). Također smo procijenili doprinose izvora za tri sektora sa podacima o emisiji visoke rezolucije.

Sve u svemu, studija je pokazala da opterećenjem zagađenja zraka u Sarajevu i Banjoj Luci u velikoj mjeri dominiraju lokalni izvori emisije. Sezonska varijacija nivoa zagađenja bila je očigledna za sve modelirane zagađivače zraka. Koncentracije su uglavnom bile niske u ljetnoj polovini godine i znatno veće zimi zbog čestih mirnih i stabilnih vremenskih uvjeta u kombinaciji s visokim emisijama koje se odnose na grijanje. Ovo je dodatno potkrijepljeno kapacitetom modela da uhvati nekoliko dana zimi s niskom visinom graničnog sloja, što označava visok potencijal za inverzije. Takođe je došlo do značajnog transporta zagađivača zraka ( $\text{SO}_2$  i čestica) izvan gradova, posebno tokom zime.

Simulirana raspodjela izvora sugerira da je transportni sektor dominirao nivoima  $\text{NO}_2$ , dok je individualno grijanje dominiralo nivoima čestica. To je bilo očigledno i u Sarajevu i u Banjoj Luci. Stoga bi strategije smanjenja emisija usmjerene na ove sektore najvjerojatnije poboljšale situaciju kvaliteta zraka u oba grada. Za  $\text{SO}_2$ , grijanje domaćinstava je u velikoj mjeri doprinijelo, ali veliki dio modeliranih koncentracija također potiče iz drugih kategorija sektora, uglavnom industrije. Podaci o emisijama u industrijskom sektoru dolaze uglavnom iz CAMS-a i ukupni zbroji ovog skupa podataka su značajni, ali pokrivaju mrežu grublje rezolucije od lokalnih emisija. Stoga je potrebno dobiti više informacija o specifičnim industrijskim izvorima i ponovno izračunati njihove emisije s višom prostornom rezolucijom kako bi se precizno odredile lokacije izvora uključenih u ovaj skup podataka i kako bi se dalje otkrili svi gradijenti koncentracije preko finije mreže unutar domene modela. Sa grubom koncentracijom rezolucije mreže, gradijente je teško odrediti. Ovo također otežava određivanje na koja područja su koji izvori emisije značajno pogodženi.

Još jedan razlog za dalji pregled emisija  $\text{SO}_2$  je činjenica da su one bile iznenađujuće niske u Banjoj Luci. Što se tiče čestica, sektori otpada i poljoprivrede imali su značajne ukupne emisije za čestice koje potiču iz CAMS podataka o emisiji, naglašavajući još jednom važnost pregleda grubih podataka o emisiji i dobijanja detaljnijih informacija o ukupnim emisijama iz specifičnih izvora unutar ovih sektora.

Potcenjivanja se uglavnom objašnjavaju niskim emisijama općenito (vjerovatno velike potcijene), a dijelom i blagim precijenjenjem brzina vjetra i vremenskim varijacijama ( $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_2$  ljeti nisu dobro snimljeni, što zahtijeva više informacija o vremenskoj varijaciji emisija). Uočena

je prilično velika razlika između izmjerениh i modeliranih koncentracija SO<sub>2</sub> ljeti u Sarajevu, gdje je model potcijenio pik nivoe za faktor između 2 i 3 između juna i oktobra. Ovo se može objasniti nedostatkom lokalnog izvora u podacima inventara emisija ili velikim utjecajem izvora izvan domena modela. Da bi model ovo obuhvatio, bio bi neophodan dalji rad sa podacima o emisijama kako lokalno tako i u okolnim regionima. Nadalje, za čestice, model potcjenjuje uočene nivoe za 50% ili manje, osim za neke vrhove. Precijenjene brzine vjetra u HCLIM ulaznim podacima vjerovatno doprinose ovoj potcjeni, tako da bolji meteorološki ulazni podaci također mogu rezultirati boljom korelacijom između modeliranih i posmatranih nivoa. Model disperzije koji radi na horizontalnoj rezoluciji od 500 m neće proizvesti potpuno iste koncentracije kao stanica za praćenje postavljena blizu izvora emisije, već će proizvoditi nešto niže koncentracije, čak i kada se koriste vrlo precizni podaci o emisijama i meteorološki podaci.

Kada inventari emisija svih sektora izvora budu dobrog kvaliteta i mogu detaljnije opisati trenutnu situaciju, rezultati iz modeliranja disperzije mogu se dalje primijeniti u analizi scenarija. Scenariji smanjenja emisija mogu se izračunati i simulirati u modelu i na taj način dati gradskim planerima moćan alat za testiranje da li će određena, ili kombinacija nekoliko strategija smanjenja emisija, vjerovatno dovesti do namjeravanog poboljšanja kvaliteta zraka. Nadalje, model disperzije se također može koristiti kao zamjena na lokacijama gdje mjerena ne postoje. Sasvim je uobičajena praksa koristiti model disperzije u početnim fazama mapiranja i procjene stanja kvaliteta zraka na širokom geografskom području.

Održavanje i širenje mreže za praćenje zagađenja zraka kako bi pokrila urbana, prigradska i ruralna područja su važni. Veća mreža za praćenje bila bi korisna za prikupljanje podataka sa različitim tipova lokacija u gradovima. Neke lokacije mogu imati prilično specifične lokalne karakteristike i izvore emisije koji na jedinstven način utiču na opterećenje zagađenja zraka u području. Takve lokacije ne predstavljaju opću situaciju zagađenja zraka, jer će imati nekoliko stanica za praćenje pokazivati varijacije između lokacija i pomoći u ilustrovanju ukupne situacije zagađenja vazduha u gradovima. Veća mreža za praćenje se također može koristiti za validaciju rezultata modela i na taj način također pomoći poboljšanju cjelokupne postavke modela.

Kako bi se postigla potpuna slika veze između izvora emisija i stanja kvaliteta zraka u bilo kojem od dva proučavana grada, potrebna je kombinacija kontinuiranog popisa emisija, modeliranja disperzije i poređenja sa podacima monitoringa. Rad koji su do sada u BiH obavile lokalne vlasti i konsultantske kompanije omogućile su važne korake za postizanje ovog cilja.

Jasno je da je kvalitet zraka najgori u oba grada kada se najveći emiteri zagađivača – individualno i daljinsko grijanje i saobraćaj – zbrajaju tokom zime. Situacija se dodatno pogoršava u periodima temperturnih inverzija koje odlažu disperziju zagađivača i dovode umjesto toga do njihovih koncentracija. Bilo bi korisno usmjeriti strategije ublažavanja na smanjenje emisija NOx i čestica iz grijanja i saobraćaja. To bi moglo značiti stvaranje subvencija

za čistije gorivo za grijanje, efikasne uređaje za sagorijevanje, poboljšanje izolacije i proširenje daljinskog grijanja. Dalje akcije koje bi se mogle razmotriti uključuju poboljšanje tehničkih pregleda vozila i pronalaženje izvodljivih načina kako da se smanji ovisnost ljudi o automobilima radi mobilnosti, tako i da se promovira modernizacija voznog parka. Ovo bi pružilo veće koristi ako se provodi u sinergiji s promocijom čistog javnog prijevoza, biciklističkih i pješačkih staza.

Također bi bilo vrlo korisno poboljšati praćenje temperturnih inverzija kako bi se u tim periodima mogla širiti svijest prema osjetljivim grupama naroda. Ovo bi bio najjednostavniji način da se razvije lokalno predviđanje nadolazećih nivoa alarma za zagađivače u ambijentalnom zraku. Kontinuirani napori ka održavanju meteoroloških stanica u gradovima i oko njih su također važni kako bi se razumjelo kako vremenske situacije utječu na kvalitet zraka općenito, kao i pružanje važnih ulaznih i validacijskih podataka za meteorološke modele koji se koriste za modeliranje disperzije.

Bolje poznавanje emisija koje su specifične za BiH koristilo bi urbanističkom planiranju i planiranju kvaliteta zraka u bliskoj budućnosti. Održavanje ovog znanja i razumijevanja pokretača zagađenja zraka omogućilo bi vlastima da precizno informišu zajednice o svojim tekućim i kontinuiranim obavezama za poboljšanje životne sredine. To bi također moglo pomoći vlastima da daju prioritet budućim inicijativama ili akcijama koje treba poduzeti u akcionim planovima za kvalitet zraka. Osim toga, mogao bi doprinijeti praćenju efikasnosti prethodnih politika. Konačno, održavanje takvog napora u istraživanjima zagađenja zraka moglo bi doprinijeti održavanju zajednice informisanih ljudi i stručnjaka, što je ključno za donošenje dobrih odluka i prihvatanje relevantnih preporuka.

## **ZAVRŠNE NAPOMENE O OBJE STUDIJE U OVOM IZVJEŠTAJU (MODELIRANJE PMF RECEPTORA I MATCH)**

Ova studija o raspodjeli izvora bavila se raspodjelom izvora iz nekoliko različitih perspektiva. Receptorsko modeliranje mjerena PM2.5 u šest gradova pružilo je osnovniju analizu odakle dolazi zagađenje PM u odabranim gradovima. Drugi krug mjerena PM2.5 i modeliranje receptora pružio je detaljnije informacije o izvorima zagađenja u Banja Luci i Sarajevu. Posljednji krug analize, modeliranje disperzije, fokusirao se ne samo na zagađenje PM već i na druge izvore zagađenja kao što su NO<sub>2</sub> i SO<sub>2</sub>. Ta analiza je zasnovana na inventaru emisija, a podaci su upoređeni sa podacima sa stanica za mjerjenje kvaliteta zraka kako bi se provjerila njihova tačnost.

Ova studija je jedinstvena po tome što analizira raspodjelu izvora na osnovu nekoliko tehnika modeliranja i zasnovana je na više različitih vrsta skupova podataka. Iako postoje neki sveobuhvatni zaključci koji se mogu donijeti na osnovu rezultata ove studije, na primjer da su saobraćaj i sagorijevanje fosilnih goriva primarni izvori zagađenja PM u Banjoj Luci i Sarajevu, zbog složenosti studije, različiti pristupi su dali malo drugačiji rezultat. Razlike u rezultatima treba posmatrati kao oblasti u kojima treba dalje istraživati. Na primjer, bilo je nekoliko slučajeva u kojima izlaz iz MATCH modela nije bio u potpunosti usklađen s mjerenjima kvaliteta zraka. Ovo ukazuje da treba prikupiti detaljnije podatke o emisijama. Slično, mjerena PM2.5 otkrila su slučajeve neobjašnjivog PM2.5 izraženog prisustva kalija u Banja Luci i izraženog prisustva kadmija u Sarajevu koje je teško objasniti i koji nisu predstavljeni u podacima o emisijama za ove gradove. Ovo je također pokazatelj da inventare emisija treba poboljšati.

Pored isticanja mjesta gdje je potrebno detaljnije prikupljanje podataka, ova studija je pružila različite informacije za kreatore politika. Na primjer, analiza raspodjele izvora može biti korisna za kreatore politika koji žele kreirati programe smanjenja emisija. Nadalje, modeliranje disperzije nudi uvid u to kako se zagađenje zraka kreće unutar Banje Luke i Sarajeva. Rezultat modeliranja disperzije može se koristiti, na primjer, za kreiranje prognoza, razvoj akcionalih planova i urbano planiranje grada.

## **ZAHVALE**

Želimo da se zahvalimo kolegama u SMHI; Helene Alpfjord Wylde, Fredrik Windmark, David Segersson, Robert Bergström i Ana Carvalho, Joakim Langner, Camilla Andersson i Lennart Robertsson na dijeljenju stručne ekspertize.

## REFERENCE

- Agencija za statistiku Bosne i Hercegovine. (2015). Istraživanje o potrošnji energije domaćinstava u BiH. Sarajevo: Agencija za statistiku Bosne i Hercegovine. Preuzeto sa [https://bhas.gov.ba/data/Publikacije/Bilteni/2016/ENE\\_00\\_2015\\_TB\\_1\\_BS.pdf](https://bhas.gov.ba/data/Publikacije/Bilteni/2016/ENE_00_2015_TB_1_BS.pdf)
- Almeida, S. &.-I. (2020). Ambient particulate matter source apportionment using receptor modelling in European and Central Asia urban areas. *Environmental Pollution*, 266, 115199.
- Amato, F. A. (2016). AIRUSE-LIFE+: A harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 3289-3309.
- Andersson, C., Helène, A., Robertson, L., Karlsson, P., & Engardt, M. (2017). Reanalysis of and attribution to near-surface ozone concentrations in Sweden during 1990–2013. *Atmospheric Chemistry Physics*, 13870.
- Arnavutović et al. (2016). *Typology of residential buildings in Bosnia and Herzegovina*. Sarajevo: Faculty of Architecture.
- CAMS. (2019, 4). *Atmosphere Copernicus*. Retrieved from The Copernicus Atmosphere Monitoring Service global and regional emissions: [https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2019-06/cams\\_emissions\\_general\\_document\\_apr2019\\_v7.pdf](https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2019-06/cams_emissions_general_document_apr2019_v7.pdf)
- Carslaw, D., & Ropkins, K. (2012). *Function for plotting bivariate polar plots with smoothing*. Retrieved from openair: open source tools for air quality data analysis: <https://davidcarslaw.github.io/openair/reference/polarPlot.html>
- Centar za vozila hrvatske. (2018). *Centar za vozila hrvatske*. Retrieved from Statistika - Otvorena Dozvola: <https://www.cvh.hr/gradani/tehnicki-pregled/statistika/>
- Chunrong Chen, H. Z. (2021). Aerosol water content enhancement leads to changes in the major formation mechanisms of nitrate and secondary organic aerosols in winter over the North China Plain. *Environmental Pollution*, 287, 117625.
- Collet S, P. J. (2016). *Determination of pollutants emission factor of domestic wood stoves*. Angers, France: Ademe.
- Dai Q, X. B. (2019). Residential coal combustion as a source of primary sulfate in Xi'an, China,. *Atmospheric Environment*, 196, 66-76.
- EEA Copernicus. (2018). *Urban Atlas*. Retrieved from Copernicus land portal: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas>
- Eurostat. (2021, august). *Production of lignite in the Western Balkans - statistics*. Retrieved from Eurostat statistics explained: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/>

- explained/index.php?title=Production\_of\_lignite\_in\_the\_Western\_Balkans\_-  
\_statistics
- Eko Toplane Banja Luka d.o.o. (2021). *Informacija o poslovanju za 2020. godinu*. Banja Luka:  
Eko Toplane.
- EMEP/EEA. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019*. Retrieved  
from European Environment Agency: <http://efdb.apps.eea.europa.eu/>
- ETC/ATNI. (2021). *Transport Non-exhaust PM-emissions*. Copenhagen: European Environment  
Agency.
- European Commission. (2020, 10 06). *Guidelines for the Implementation of the Green Agenda  
for the Western Balkans*. Retrieved from European Commission:  
[https://ec.europa.eu/neighbourhood-enlargement/system/files/2020-10/green\\_agenda\\_for\\_the\\_western\\_balkans\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/neighbourhood-enlargement/system/files/2020-10/green_agenda_for_the_western_balkans_en.pdf)
- Grundström et al. (2015). Variation and co-variation of PM10, particle number concentration,.  
*Atmospheric Environment*, 317-327.
- Huremović, J. Ž. (2020). Analysis of PM10, Pb, Cd, and Ni atmospheric concentrations during  
domestic heating season in Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, from 2010 to 2019. *Air  
Qual Atmos Health*, 13, 965–976.
- Jeričević, A. &. (2019). Identification of diverse air pollution sources in a complex urban area of  
Croatia. *Journal of Environmental Management*, 243, 66-67.
- JP Ceste Federacije BiH. (2017). *Brojanje saobraćaja na magistralnim cestama federacije bih u  
2016. godin*. Sarajevo: JP Ceste Federacije BiH.
- JRC. (2017, July). *Specieurope*. Retrieved from Source Apportionment: <https://source-apportionment.jrc.ec.europa.eu/Specieurope/index.aspx#>
- Kuenen, J., Dellaert, S., Visschedijk, A., Jalkanen, J.-P., Super, I., & Denier van der Gon, H.  
(2021). Copernicus Atmosphere Monitoring Service regional emissions version 4.2  
(CAMS-REG-v4.2). ECCAD. doi:10.24380/0vzb-a387
- Largeron and Staquet. (2016). Persistent inversion dynamics and wintertime PM10 air  
pollution in. *Atmospheric Environment*, 92-108.
- Largeron, Y., & Staquet, C. (2016). Persistent inversion dynamics and wintertime PM10 air  
pollution in Alpine valleys. *Atmospheric Environment*, 92-108.
- Lindstedt, D., Lind, P., Kjellström, E., & Jones, C. (2015). A new regional climate model  
operating at the. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 67:1.
- Markovic. (2015). Soil reaction (pH) and status of mobile phosphorus and potassium in Sava  
valley area of Bosnia and Herzegovina. *Proceeding of the 9th international symposium*

- on plant-soil interactions at low pH (pp. 28-29). Dubrovnik: University of Josip Juraj Strossmayer in Osijek.
- Ogulei, D. &. (2006). Source apportionment of Baltimore aerosol from combined size distribution and chemical composition data. *Atmospheric Environment*, 40, 396-410.
- Olofson et al. (2009). Urban aerosol evolution and particle formation during wintertime temperature. *Atmospheric Environment*, 1-7.
- Paatero, P. a. (1994). Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Environmetrics*, 5, 111-126.
- Pernigotti, D. &. (2016). SPECIEUROPE: The European data base for PM source profiles. *Atmospheric Pollution Research*, 7, 307-314.
- Perrone, M. &. (2017). Sources and geographic origin of particulate matter in urban areas of the Danube macro-region: The cases of Zagreb (Croatia), Budapest (Hungary) and Sofia (Bulgaria). *Science of The Total Environment*, 619 (4).
- Pitiranggon. (2021). Long-term trends in local and transported PM2.5 pollution in New York City. *Atmospheric Environment*, 248.
- Prakash, J. &. (2017). Chemical characterization of PM1.0 aerosol in Delhi and source apportionment using positive matrix factorization. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 445-462.
- Prcanovic, H. &. (2018). Seasonal variations of sulfur dioxide in the air in Zenica city during 11 years period 2006 – 2016. *International Journal of Advanced Research*, 6, 1133-1139.
- Putevi Republike Srpske. (2020). *Brojanje vozila na mreži puteva u Republici Srpskoj 2016. godina*. Banja Luka: Putevi Republike Srpske.
- Rybicki, M. &. (2020). Composition of organic compounds from low-temperature burning of lignite and their application as tracers in ambient air. *Chemosphere*, 249, 126087.
- Simpson et al. (1993). *Updating the chemical scheme for the EMEP MSC-W occident model*. Oslo: Meteorological Synthesizing Center West.
- Srivastava, D. &.-L.-L. (2018). Speciation of organic fraction does matter for source apportionment. Part 1: A one-year campaign in Grenoble (France). *Science of The Total Environment*, 624, 1598-1611.
- Tarvainen T, S. A. (2013). Arsenic in agricultural and grazing land soils of Europe. *Applied Geochemistry*, 28, 2-10.
- TRT Trasporti e Territorio. (2017). *Transport study for the Danube Macro-Region*. Milano: European Investment Bank.
- WHO. (2015). *Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: Clean air, health and wealth*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, OECD.

World Bank. (2019). *Air pollution Management in Bosnie and Herzegovina*. Washington: World Bank.

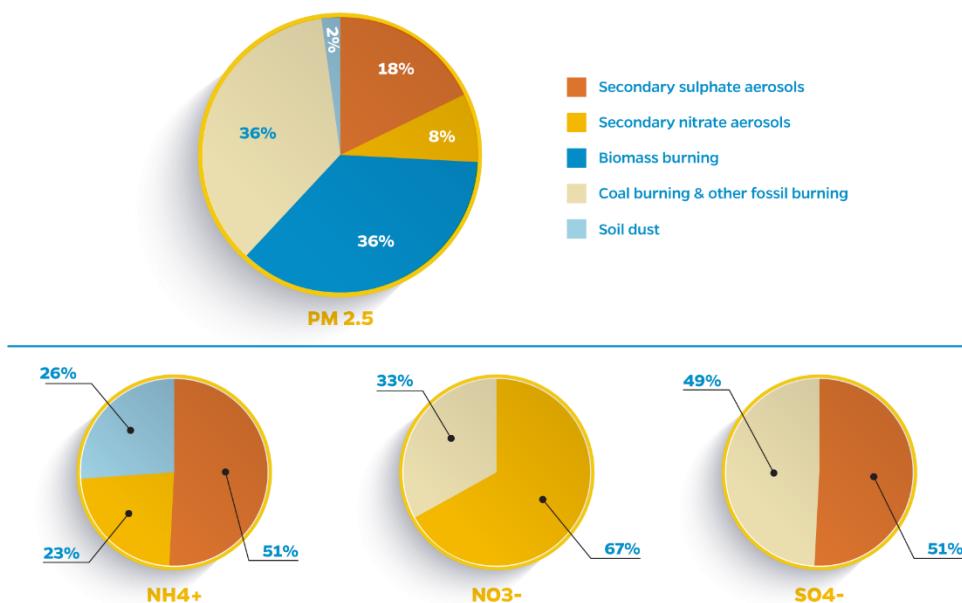
Xu. (2021). Long-range transport of anthropogenic air pollutants into the marine air: insight into fine particle transport and chloride depletion on sea salts. *Atmos. Chem. Phys.*, 17715–17726.

## PRILOZI

### Prilog 1 - Kontribucija faktora

Sljedeći grafikoni, slični onom na Slika 35, prikazuju dvije odvojene informacije za svako mjesto uzimanja uzorka.

- Prvi grafikon prikazuje raspodjelu izvora ili grupe izvora koji objašnjavaju izmjerenu masu PM 2.5 tokom razdoblja uzorkovanja. Boje navedenih izvora iste su na stranici, ali se razlikuju od stranice do stranice.
- Drugi grafikoni pokazuju distribuciju mase svake izmjerene vrste unutar različitih raspoređenih izvora ili grupe izvora (pogledajte boje prvog grafikona za nazine). 0% se prikazuje kada je doprinos faktora manji od 1%.

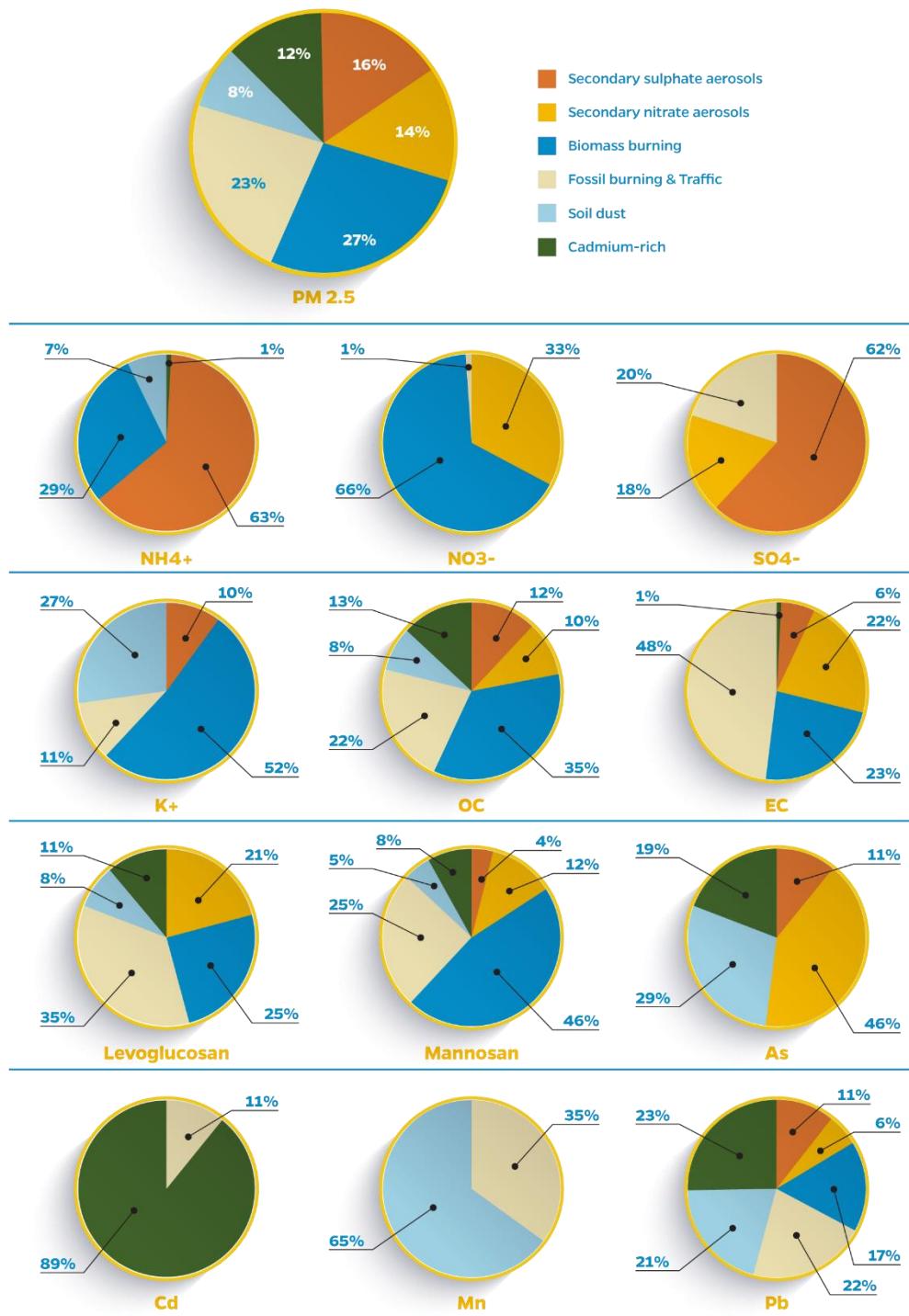


Slika 35: Grafikoni u Appendixu

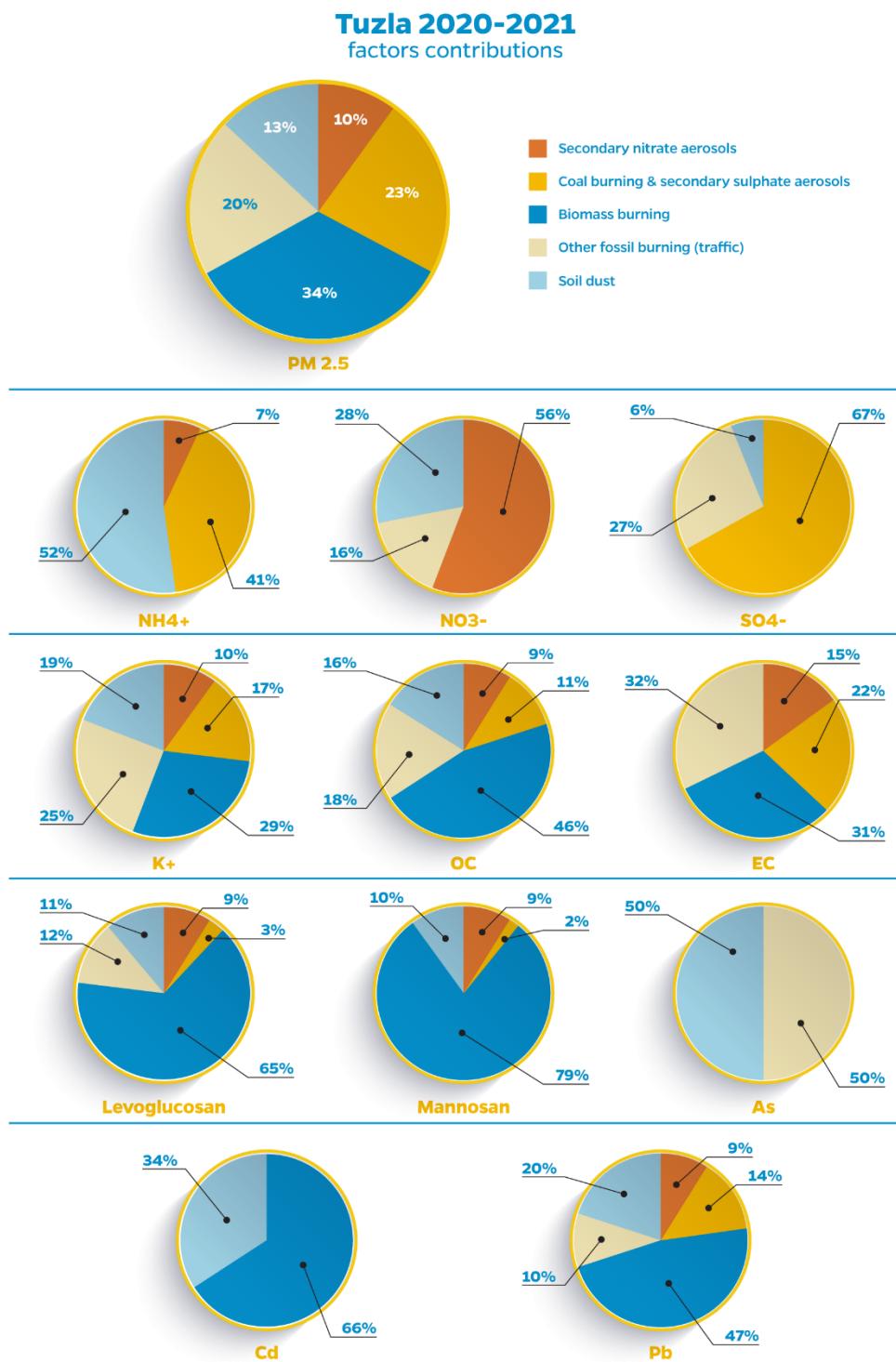
Ova informacija je već prikazana crnim kvadratnim tačkama na grafikonima koji prikazuju sastav faktora za svako mjesto uzorkovanja, ali je ovdje sakupljena po vrstama. Neke vrste imaju tendenciju da budu usko povezane sa samo nekoliko izvora, dok su neke vrste manje specifične.

## Sarajevo 2020-2021 – kontribucija faktora

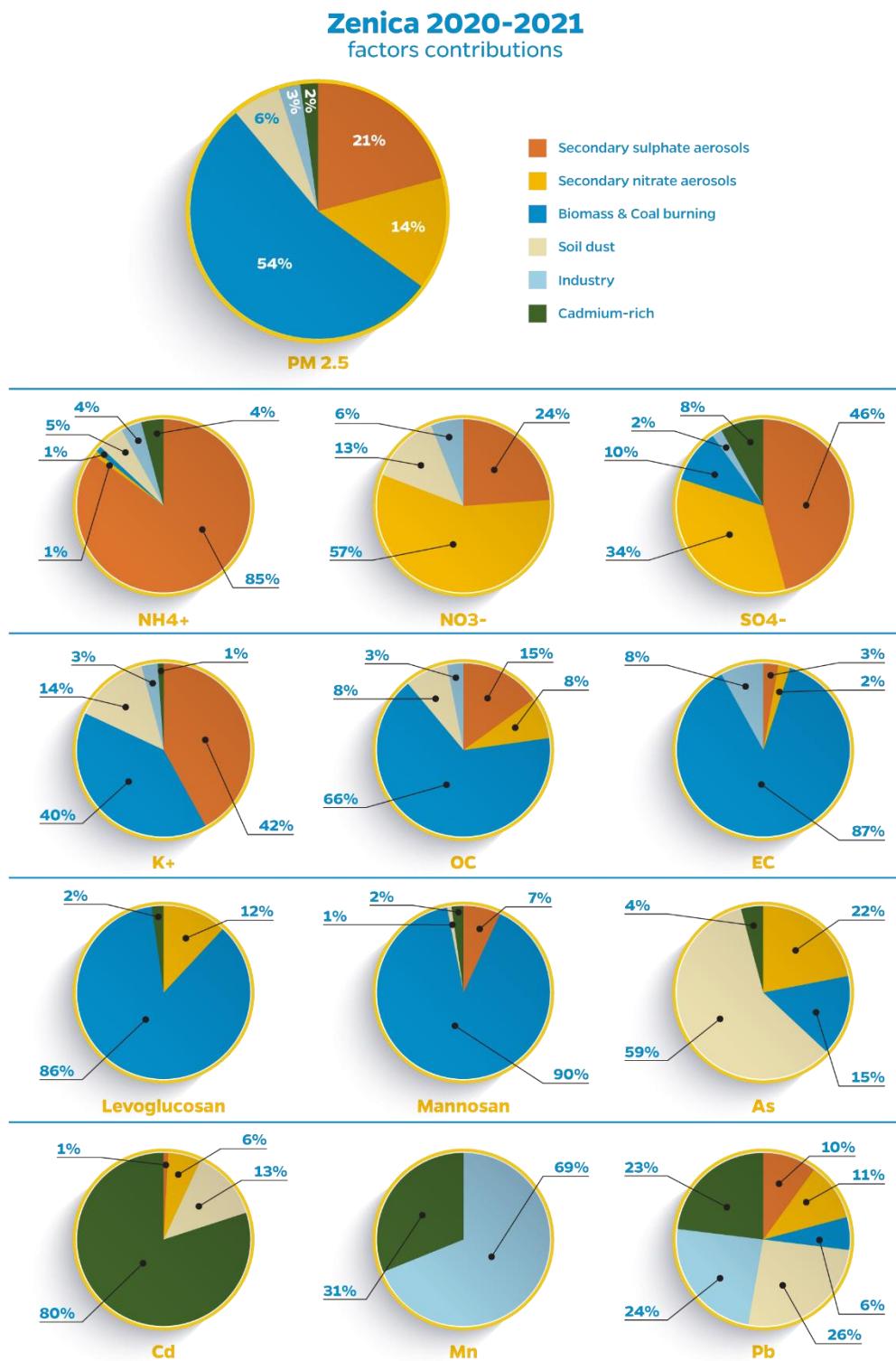
**Sarajevo 2020-2021**  
factors contributions



## Tuzla 2020-2021 – kontribucija faktora

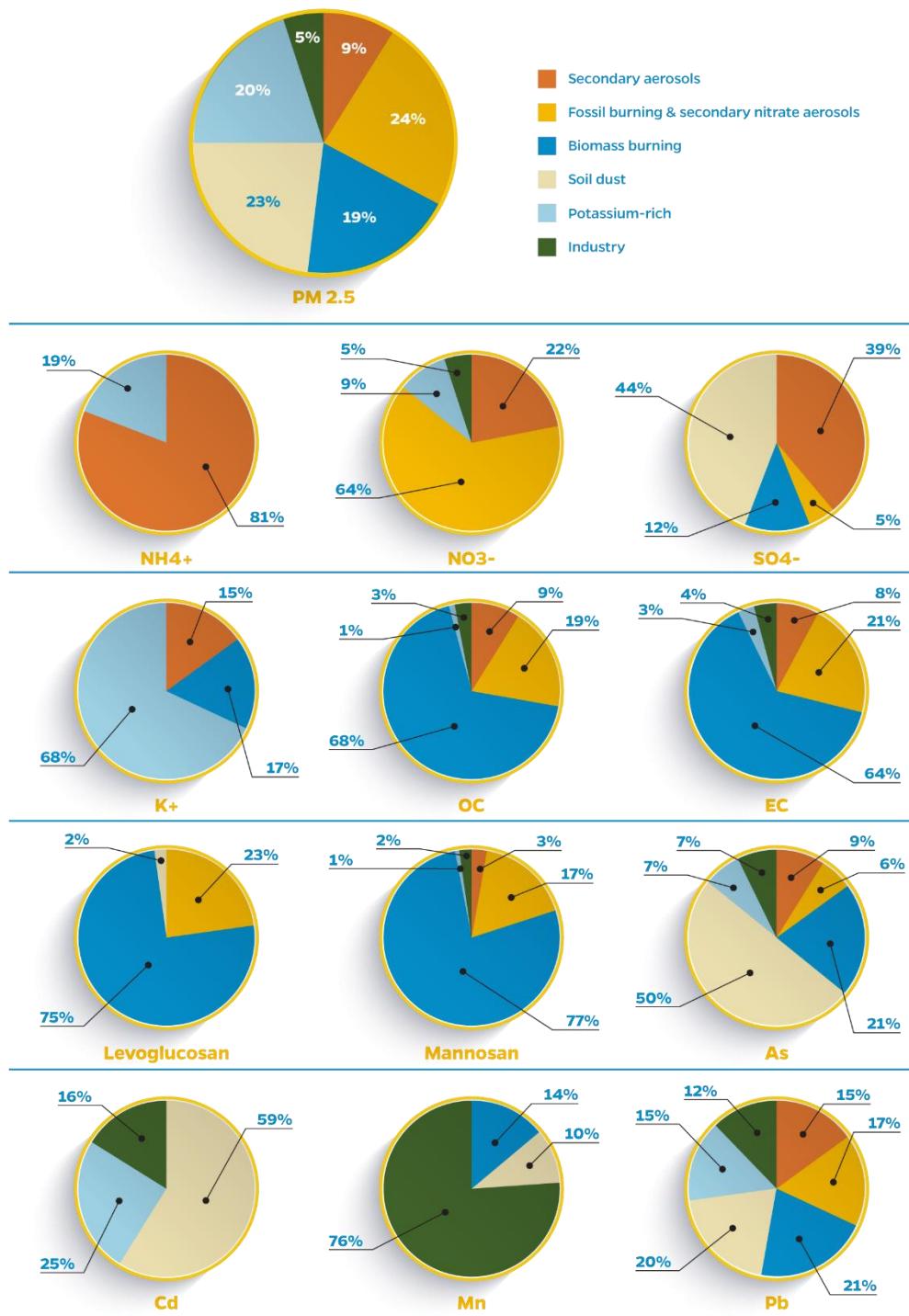


## Zenica 2020-2021 – kontribucija faktora

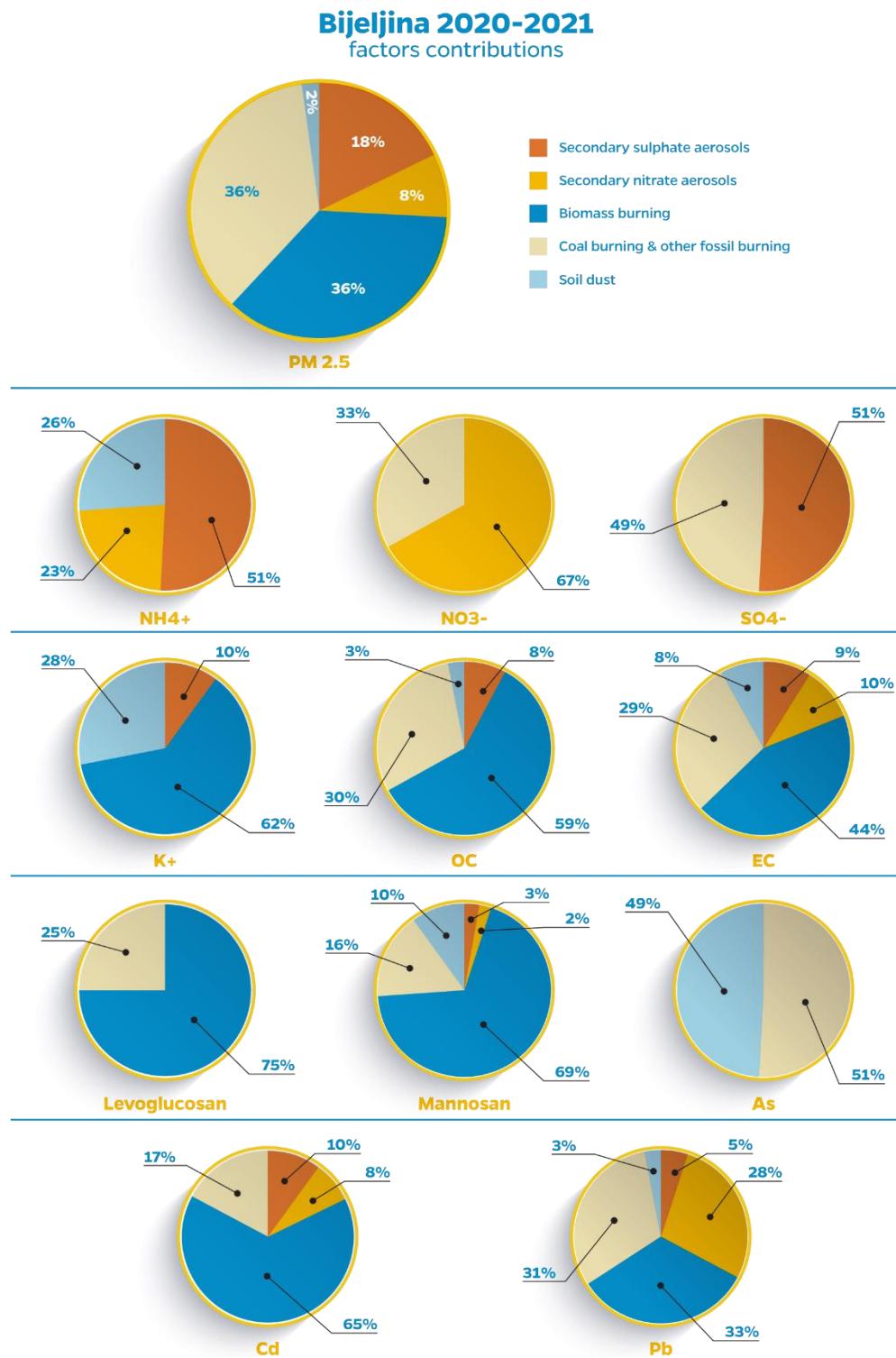


## Banja Luka 2020-2021 – kontribucija faktora

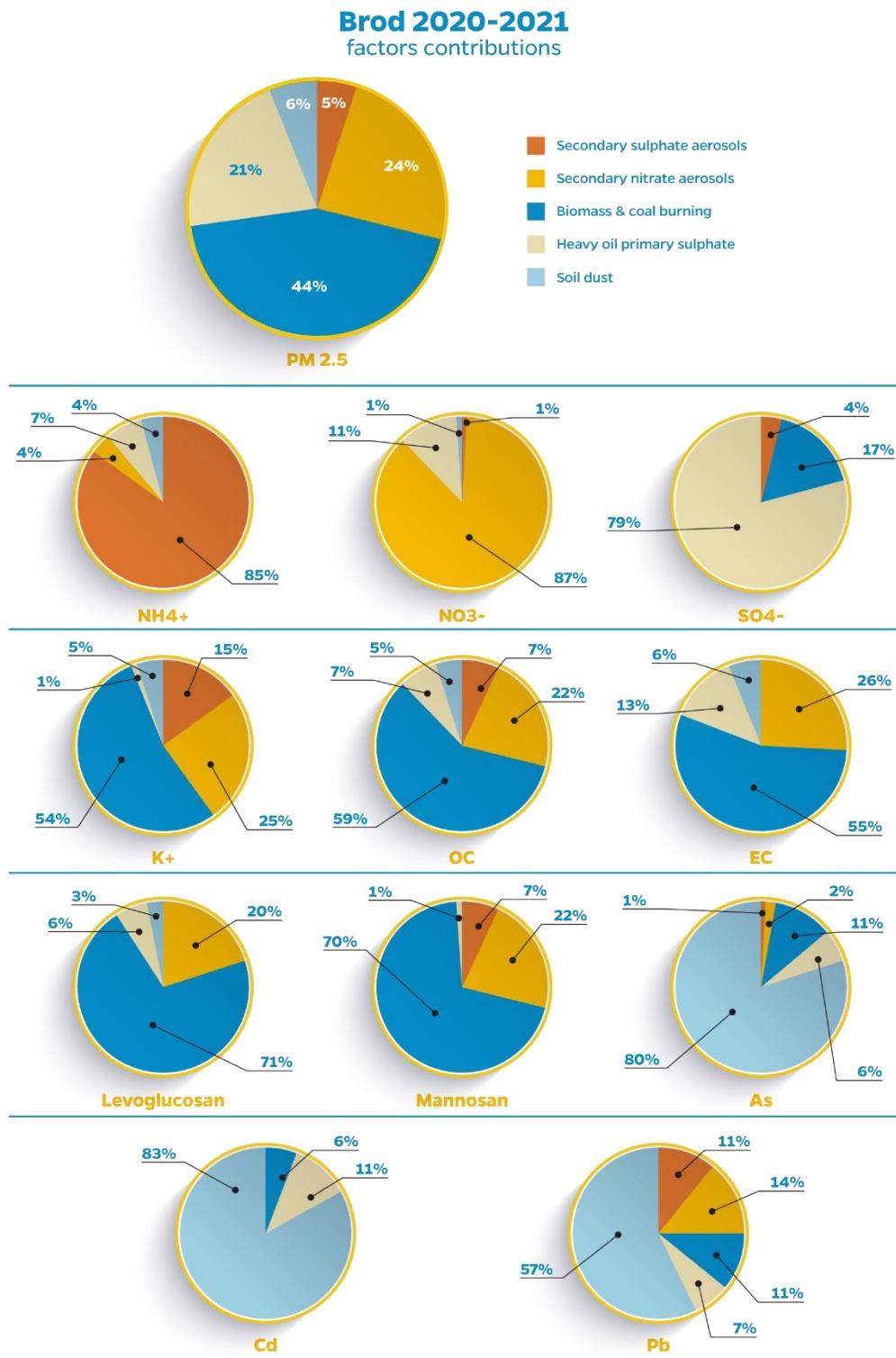
**Banja Luka 2020-2021**  
factors contributions



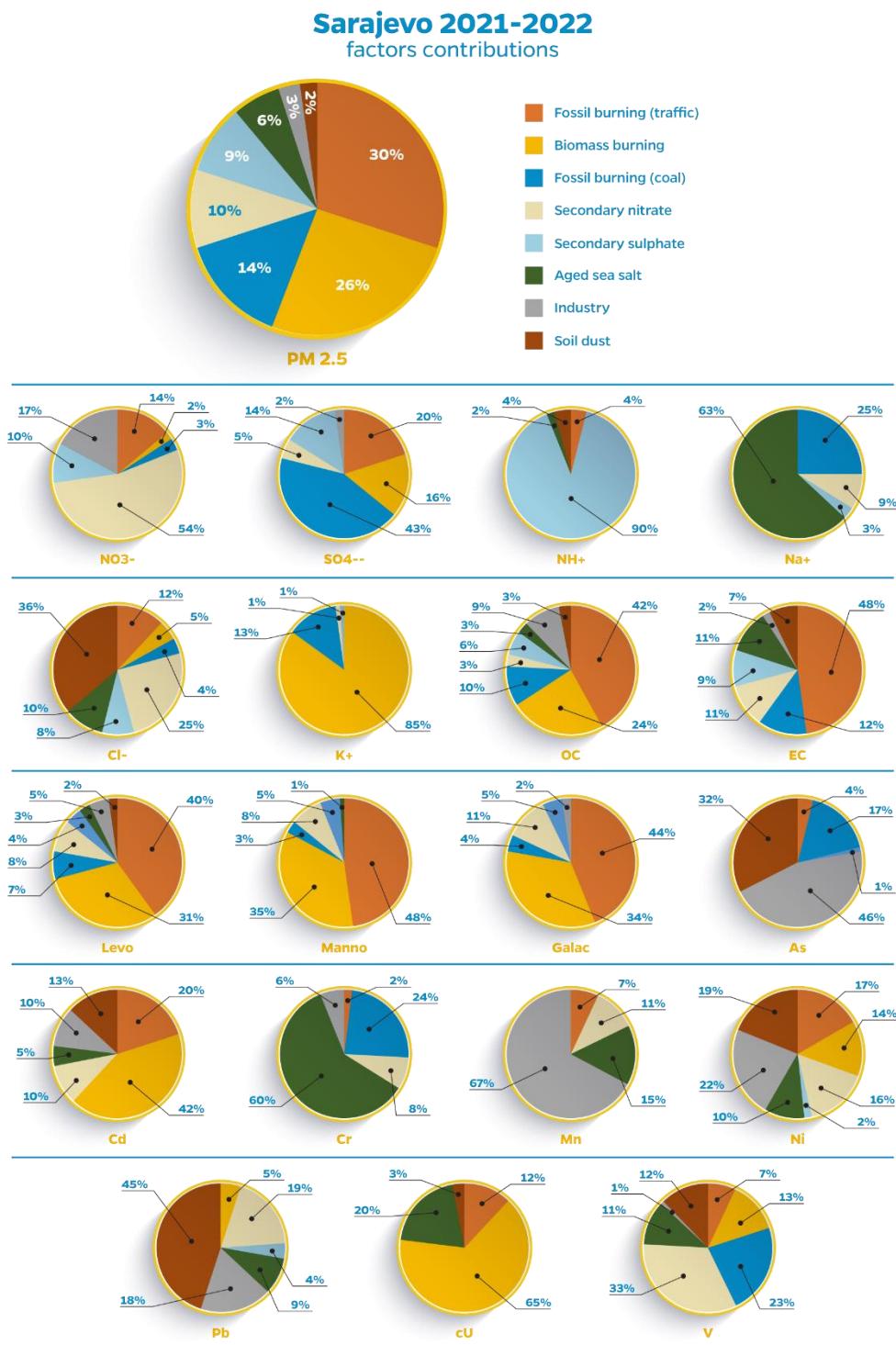
## Bijeljina 2020-2021 – kontribucija faktora



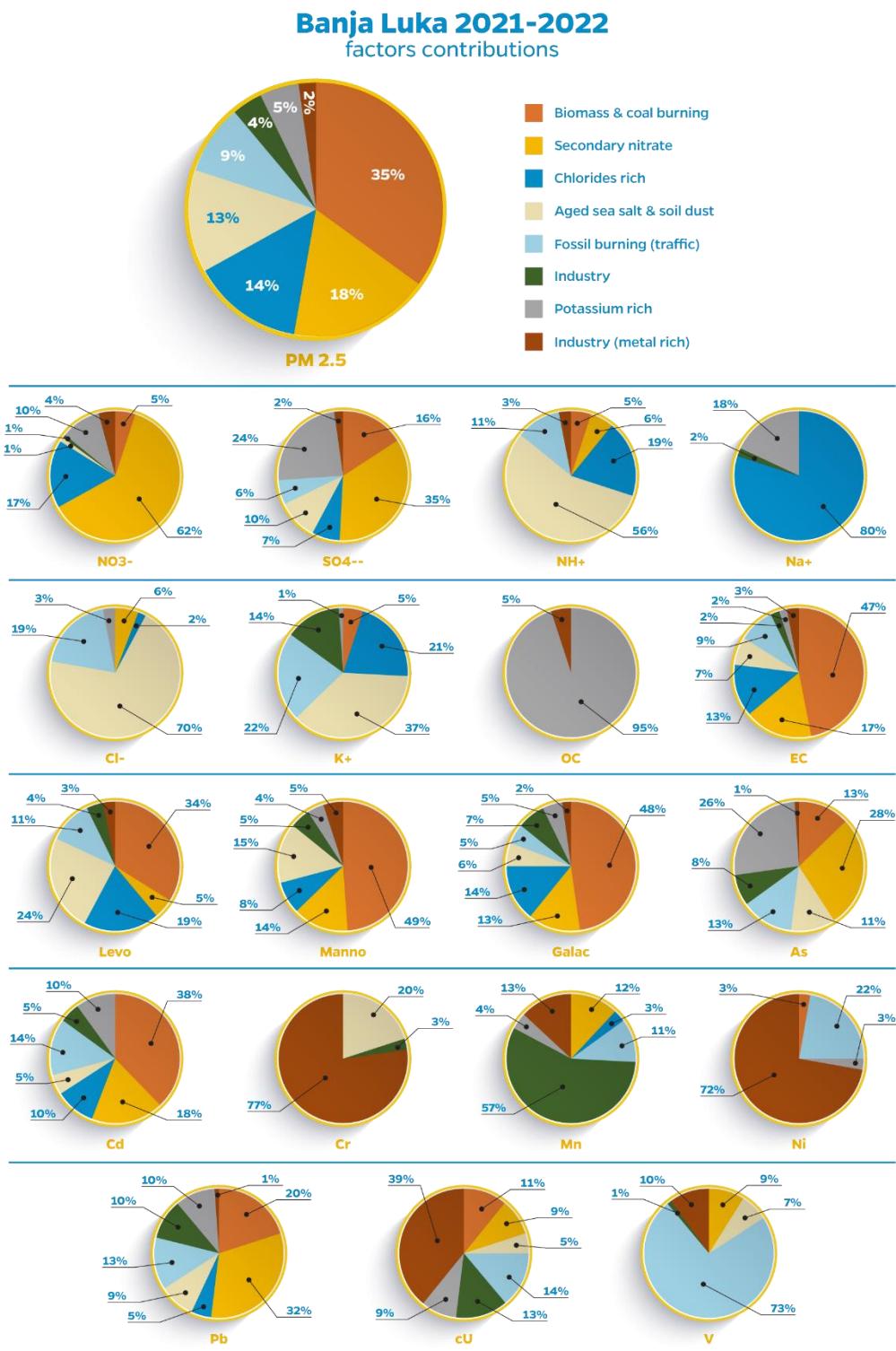
## Brod 2020-2021 – kontribucija faktora



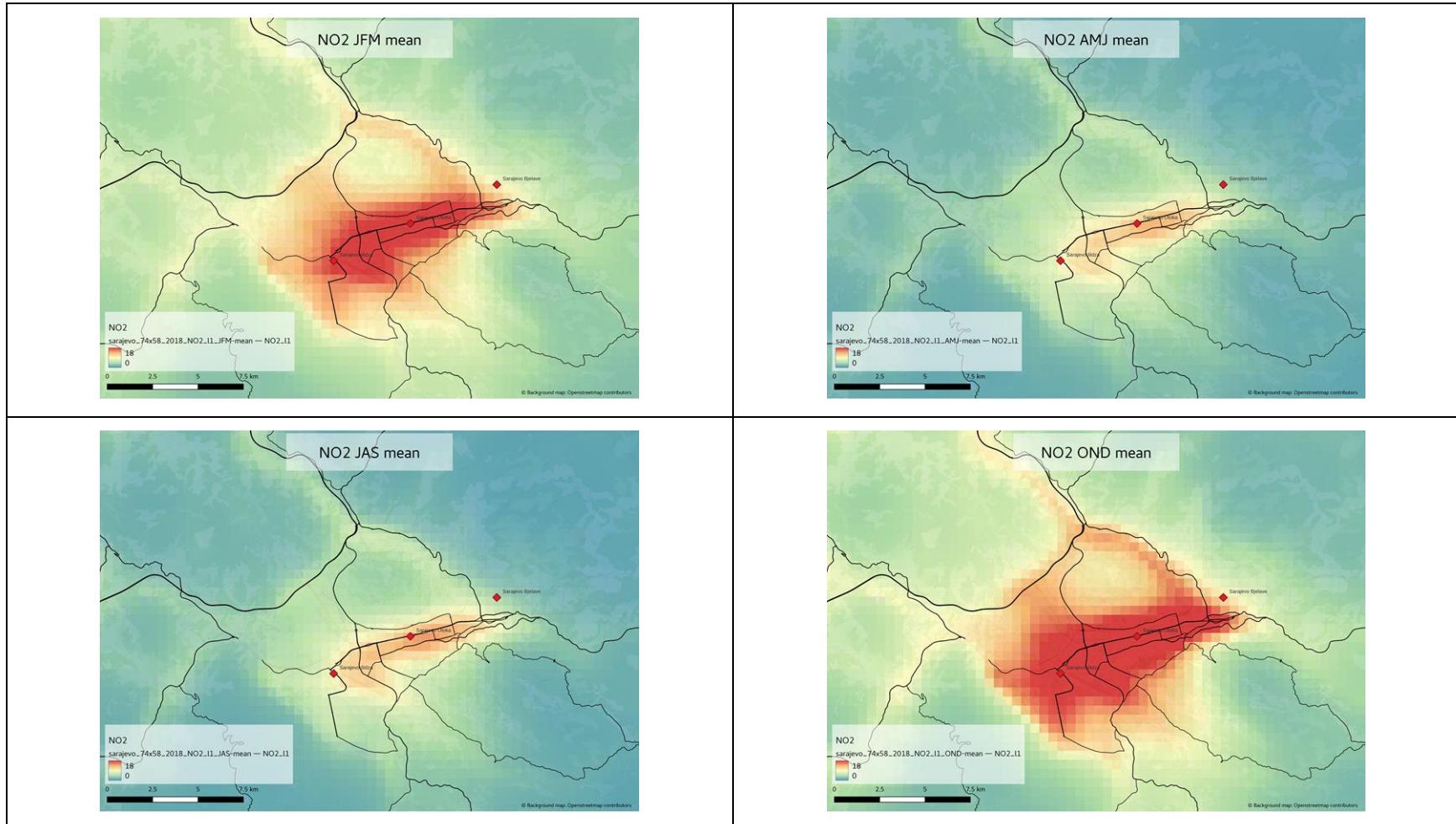
## Sarajevo 2021-2022 – kontribucija faktora



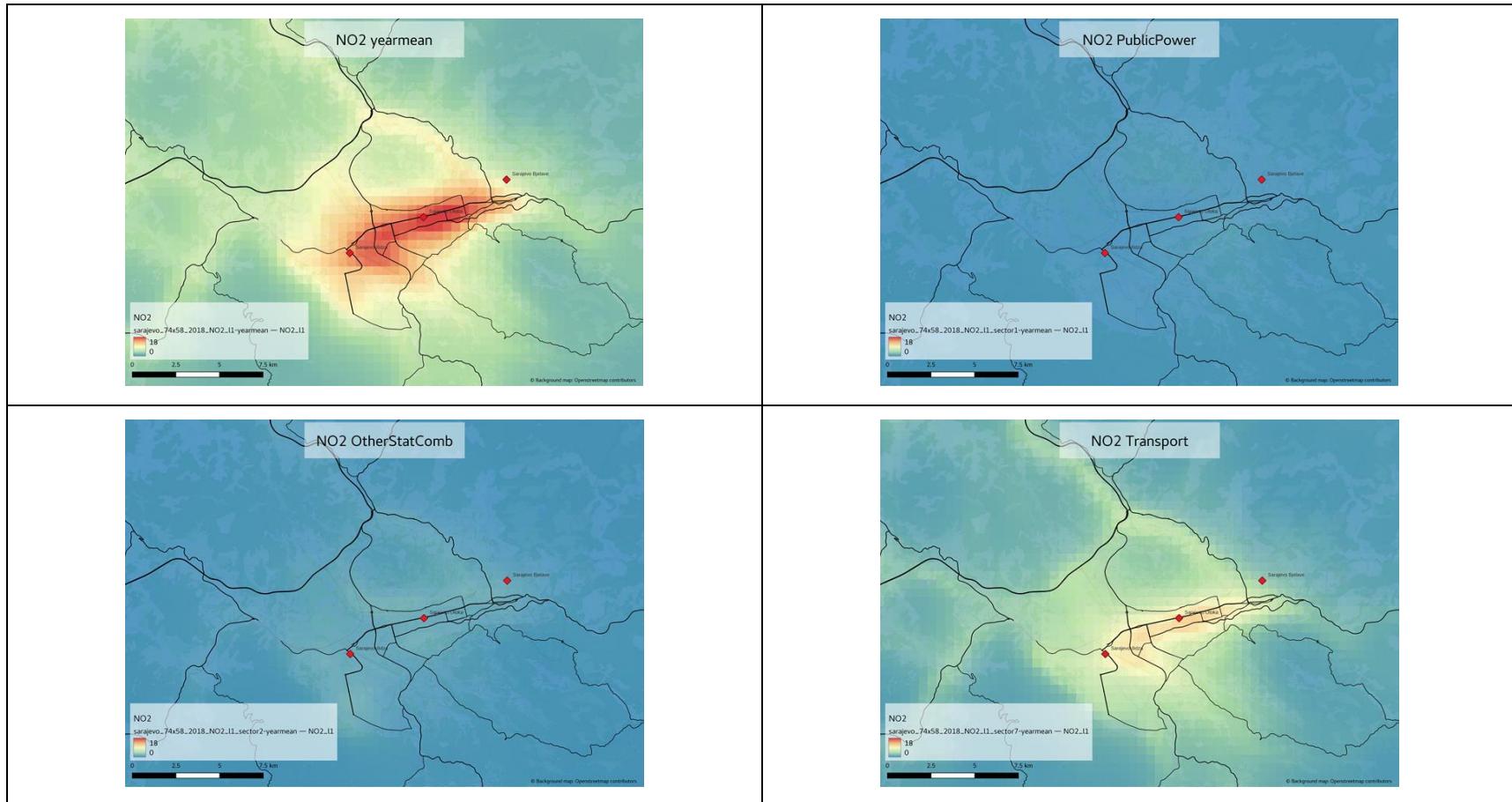
## Banja Luka 2021-2022 – kontribucija faktora



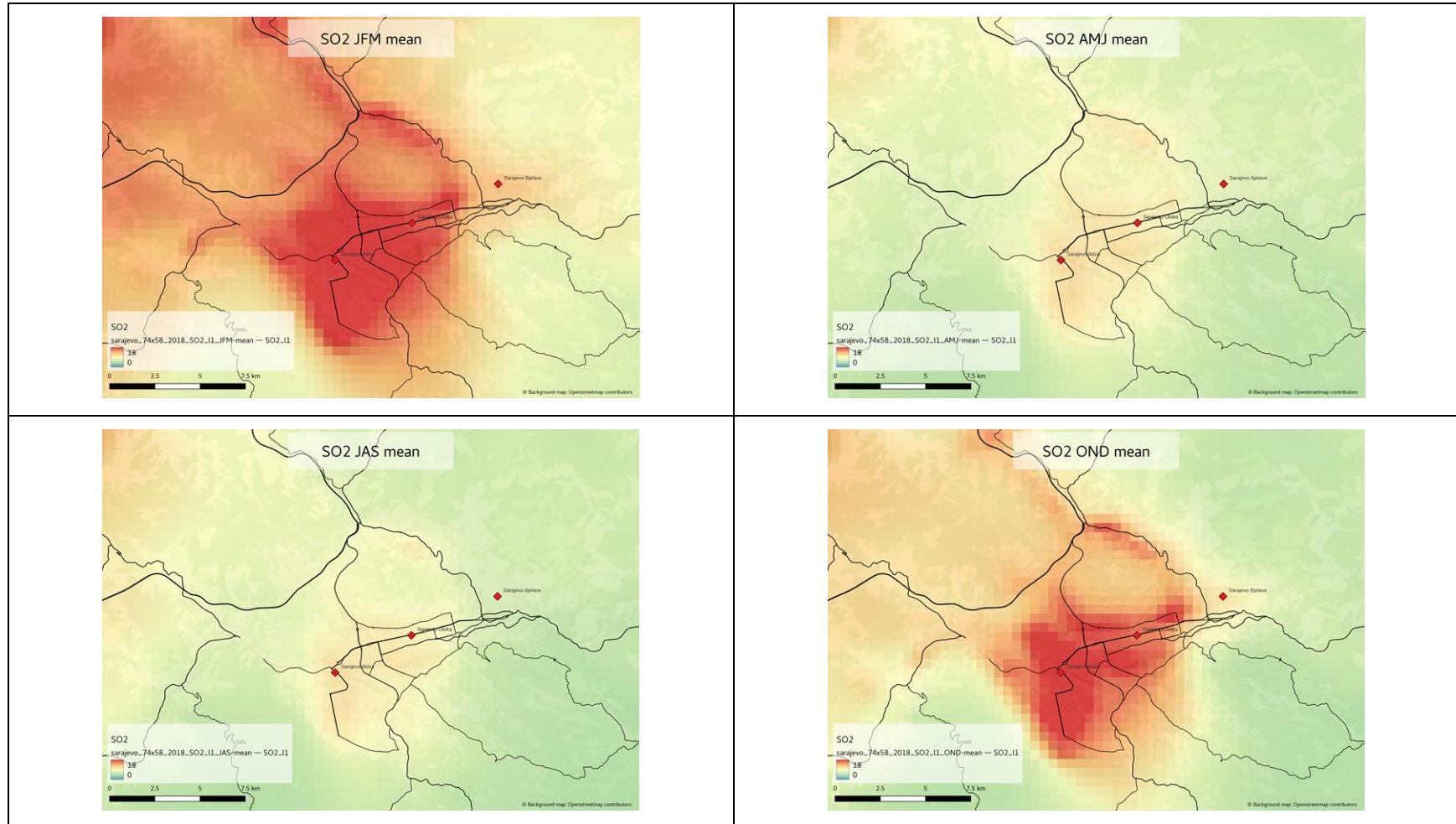
## Prilog 2 – Sarajevo, karte disperzije i raspodjele izvora



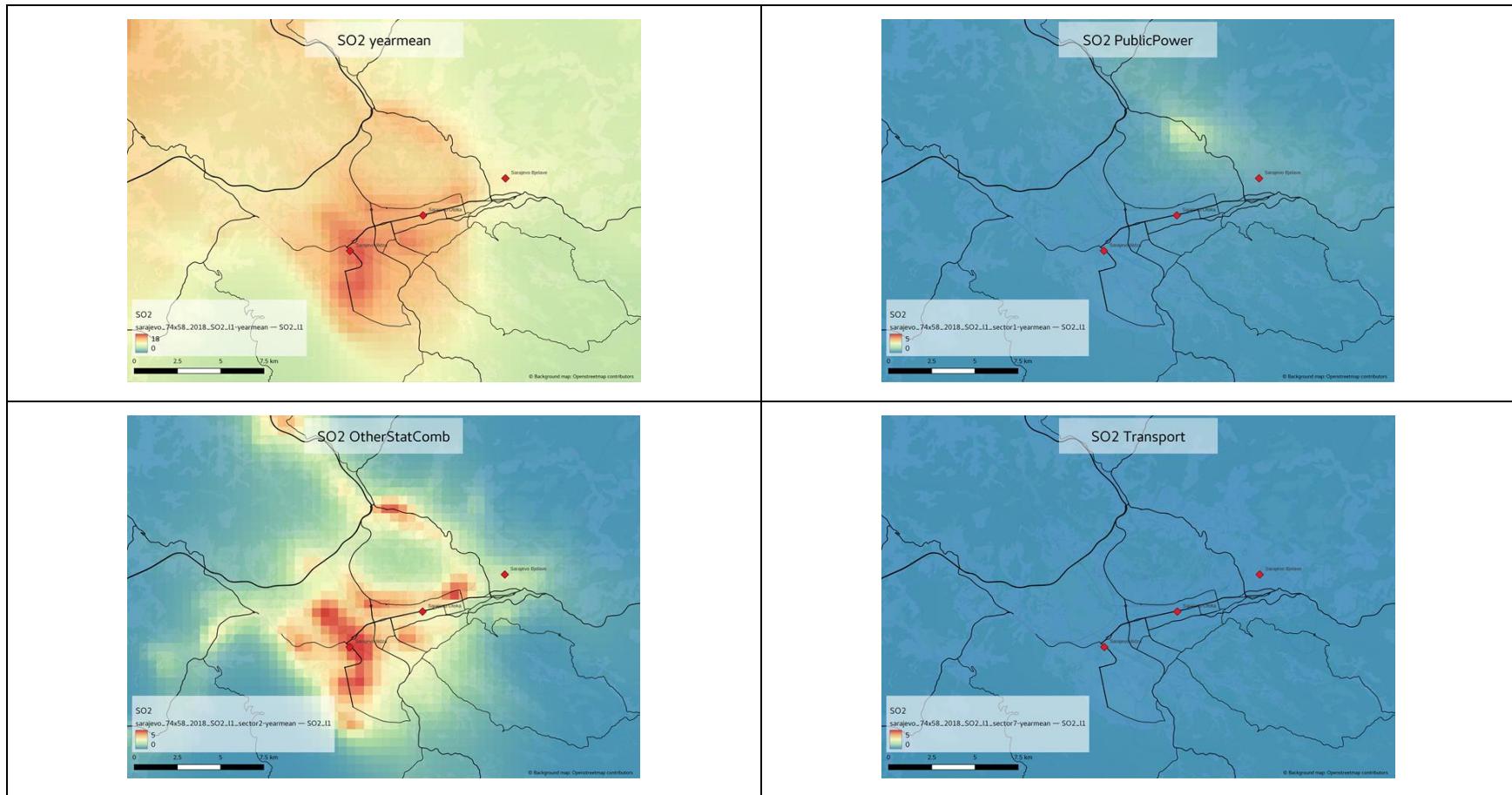
Slika A-1. Prostorne karte modeliranih sezonskih prosjeka NO2 tokom; a) januar-mart (JFM), b) april-jun (AMJ), c) juli-septembar (JAS) i d) oktobar-decembar (OND) u Sarajevu, 2018. Jedinice su u ug/m<sup>3</sup>



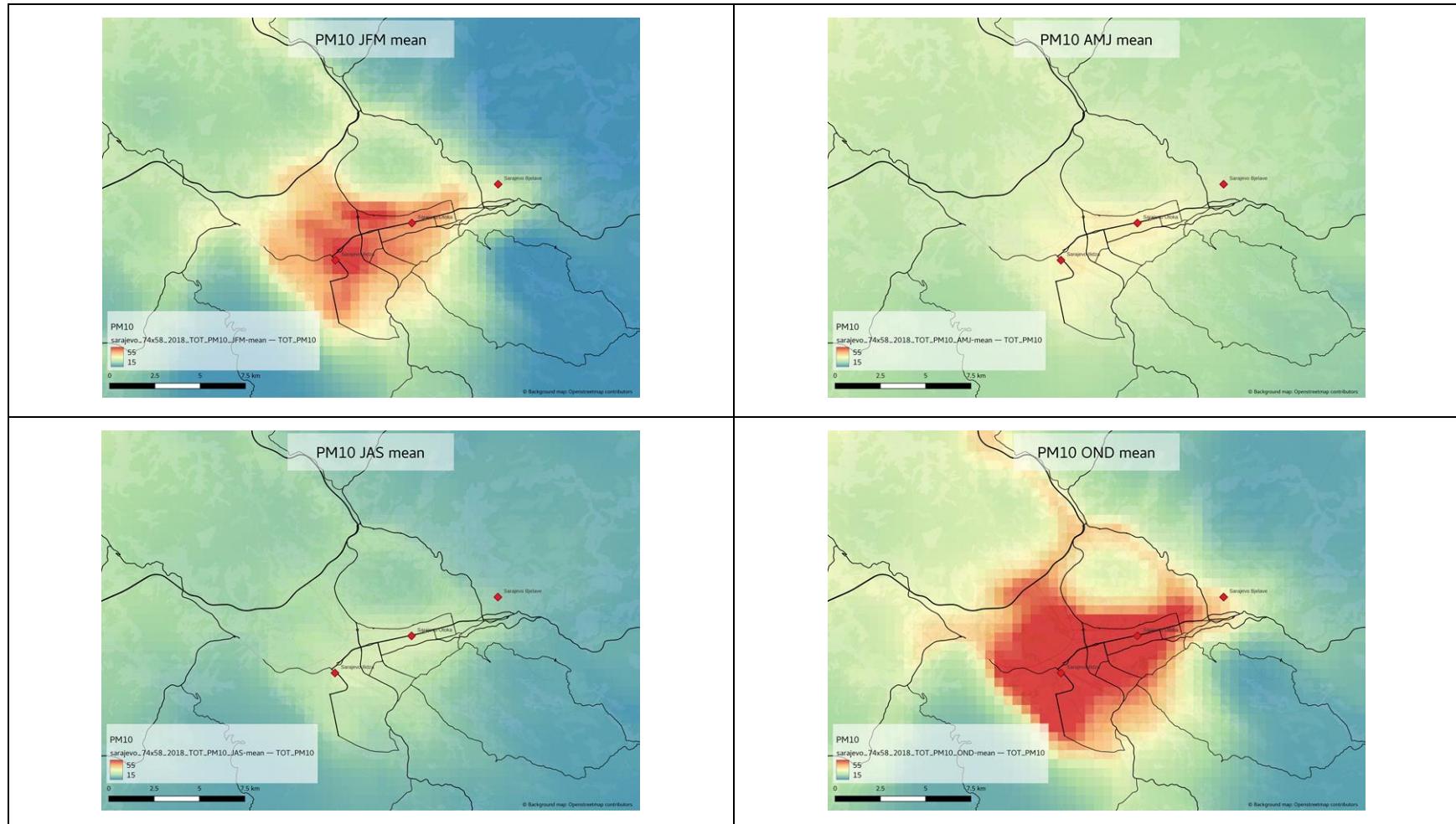
Slika A-2. Prostorne karte modeliranih koncentracija NO<sub>2</sub> u Sarajevu, 2018. za a) ukupnu godišnju srednju vrijednost zasnovanu na svim raspoloživim sektorskim emisijama unutar domene modela, uključujući pozadinske koncentracije sa granice. Izvorna raspodjela koncentracija NO<sub>2</sub> za tri različita sektora izračunata sa novim skupom podataka visoke rezolucije o lokalnoj emisiji iz b) Javne energije, c) Ostalog stacionarnog sagorijevanja i d) Transporta



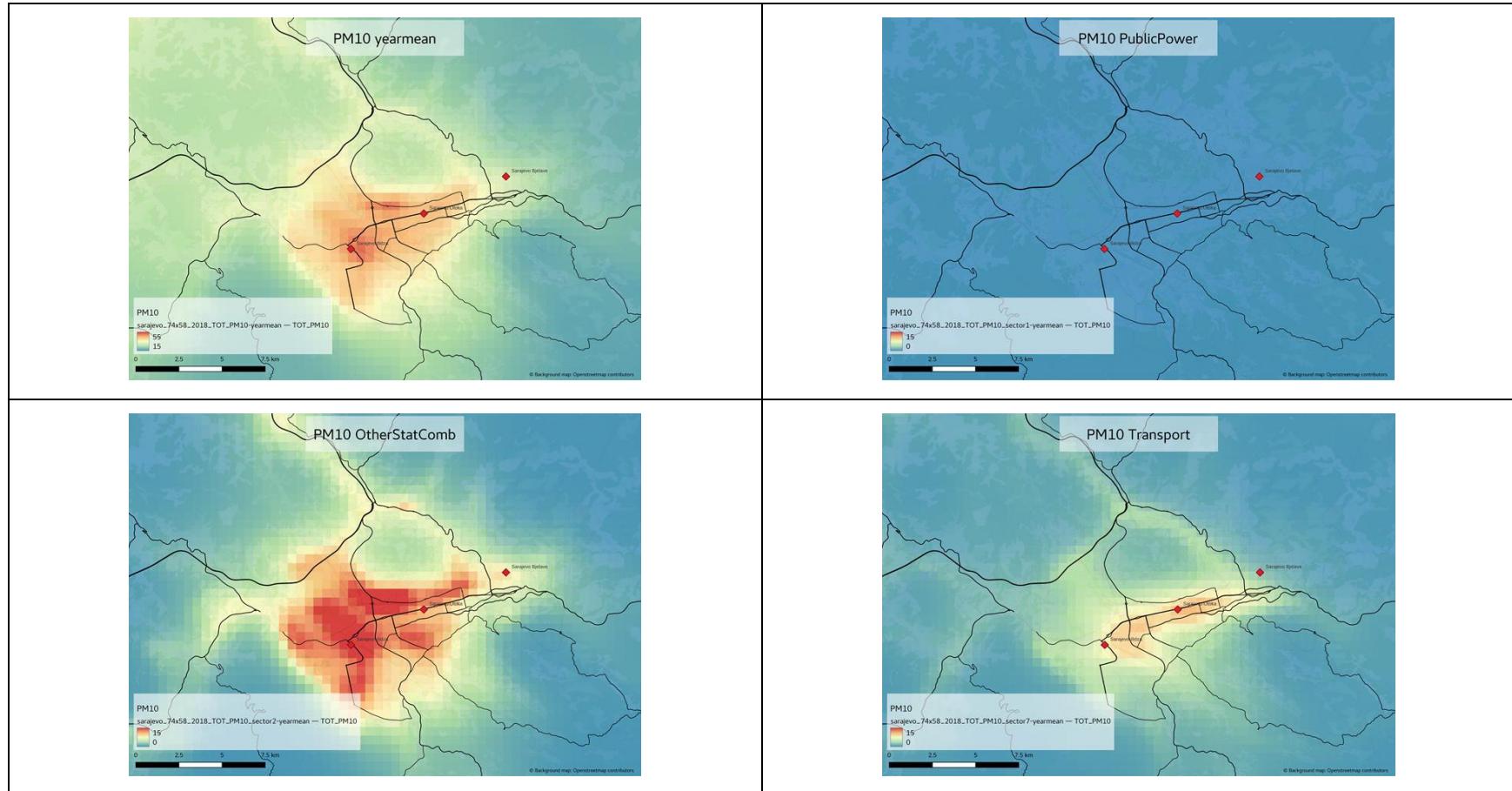
Slika A-3. Prostorne karte modeliranih sezonskih prosjeka SO<sub>2</sub> tokom; a) januar-mart (JFM), b) april-jun (AMJ), c) juli-septembar (JAS) i d) oktobar-decembar (OND) u Sarajevu, 2018. Jedinice su u ug/m<sup>3</sup>



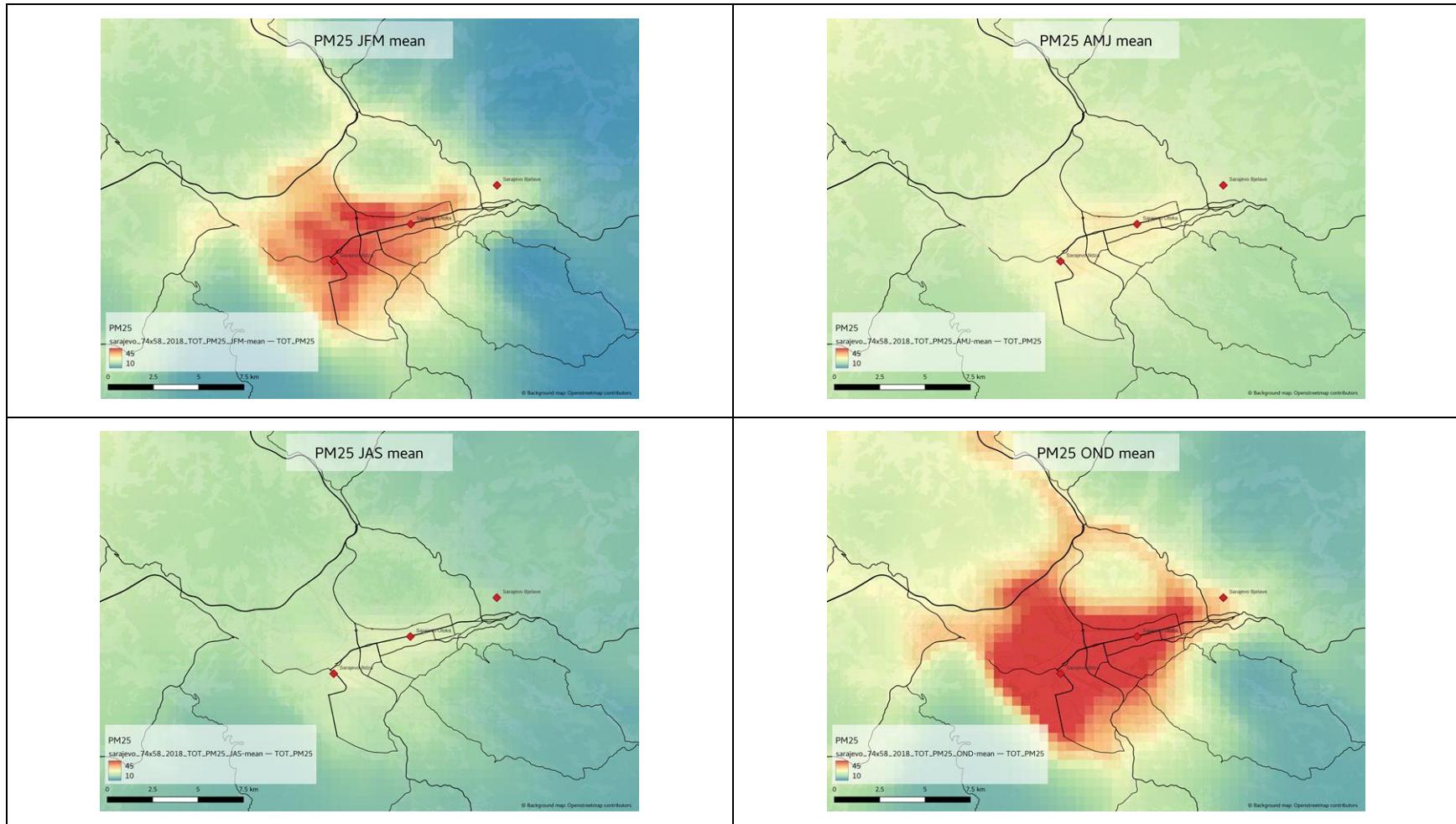
Slika A-4. Prostorne karte modeliranih koncentracija SO<sub>2</sub> u Sarajevu, 2018. za a) ukupnu godišnju srednju vrijednost zasnovanu na svim dostupnim sektorskim emisijama unutar domene modela, uključujući pozadinske koncentracije sa granice. Izvorna raspodjela koncentracija SO<sub>2</sub> za tri različita sektora izračunata sa novim skupom podataka visoke rezolucije o lokalnoj emisiji iz b) Javne energije, c) Ostalog stacionarnog sagorijevanja i d) Transporta



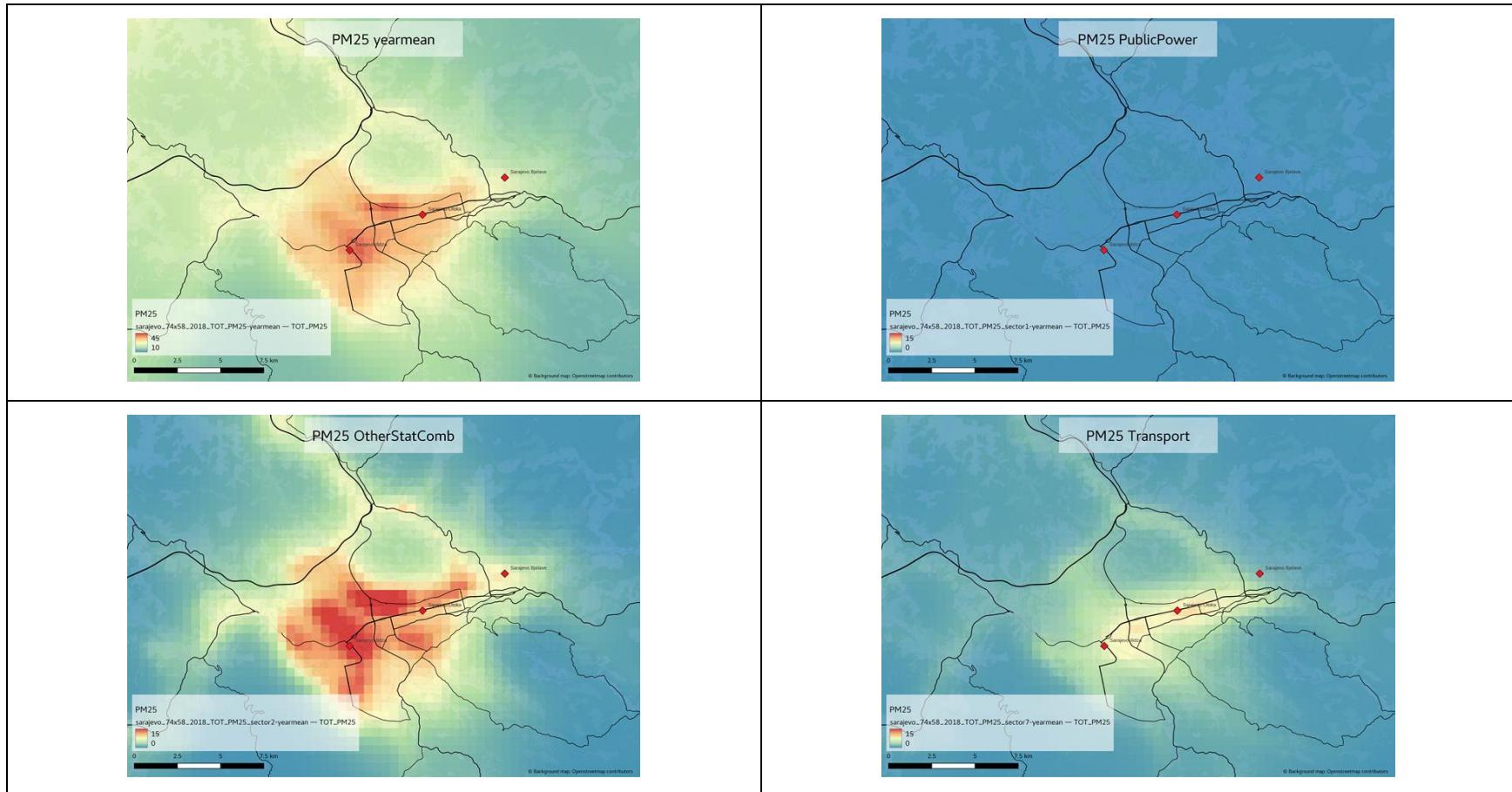
Slika A-5. Prostorne karte modeliranih sezonskih prosjeka PM10 tokom; a) januar-mart (JFM), b) april-jun (AMJ), c) juli-septembar (JAS) i d) oktobar-decembar (OND) u Sarajevu, 2018. Jedinice su u ug/m<sup>3</sup>



Slika A-6. Prostorne karte modeliranih koncentracija PM10 u Sarajevu, 2018. za a) ukupnu godišnju srednju vrijednost zasnovanu na svim raspoloživim sektorskim emisijama unutar domene modela, uključujući pozadinske koncentracije sa granice. Izvorna raspodjela koncentracija PM10 za tri različita sektora izračunata sa novim skupom podataka visoke rezolucije o lokalnoj emisiji iz b) Javne energije, c) Ostalog stacionarnog sagorijevanja i d) Transporta

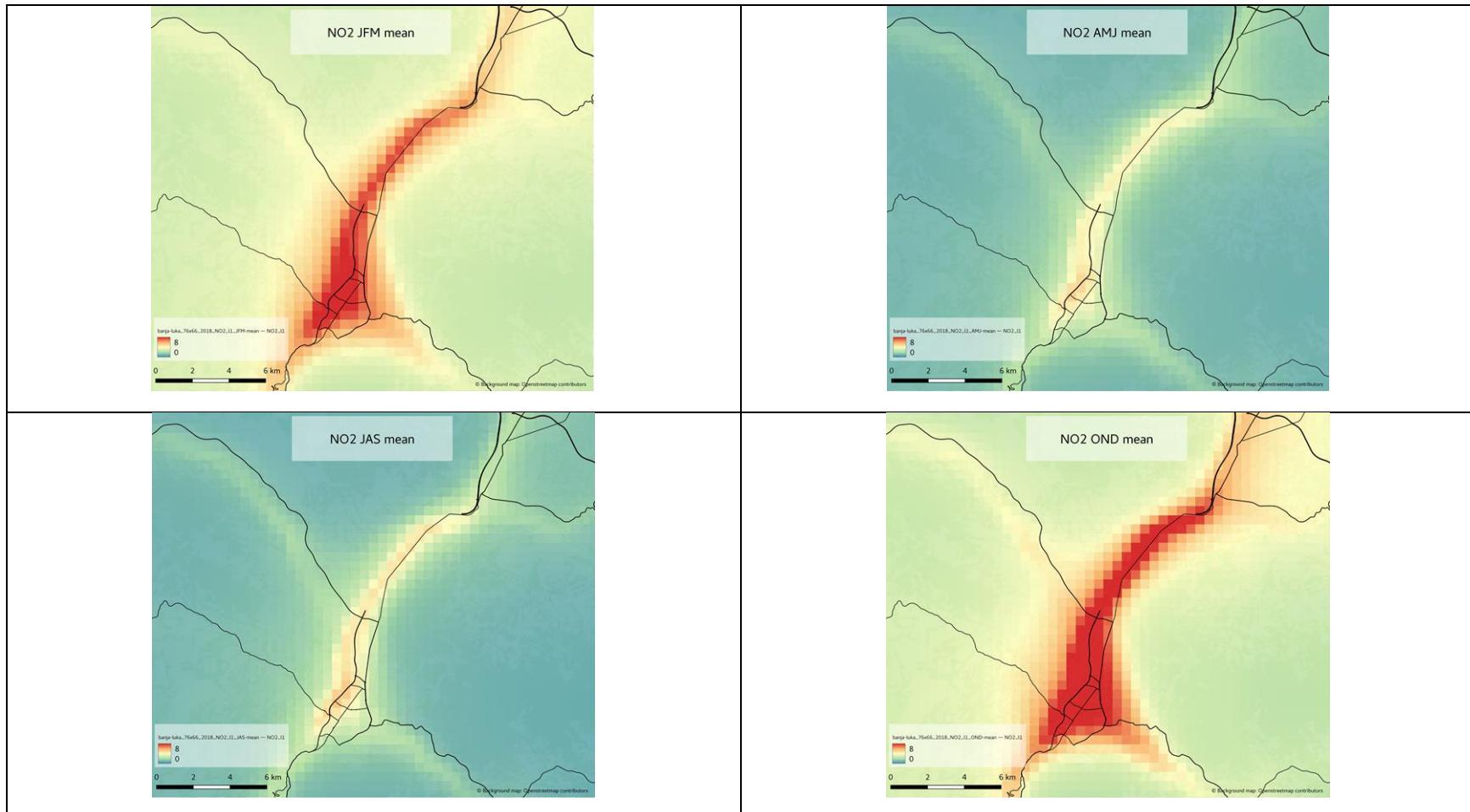


Slika A-7. Prostorne karte modeliranih sezonskih prosjeka PM<sub>2,5</sub> tokom; a) januar-mart (JFM), b) april-jun (AMJ), c) juli-septembar (JAS) i d) oktobar-decembar (OND) u Sarajevu, 2018. Jedinice su u ug/m<sup>3</sup>

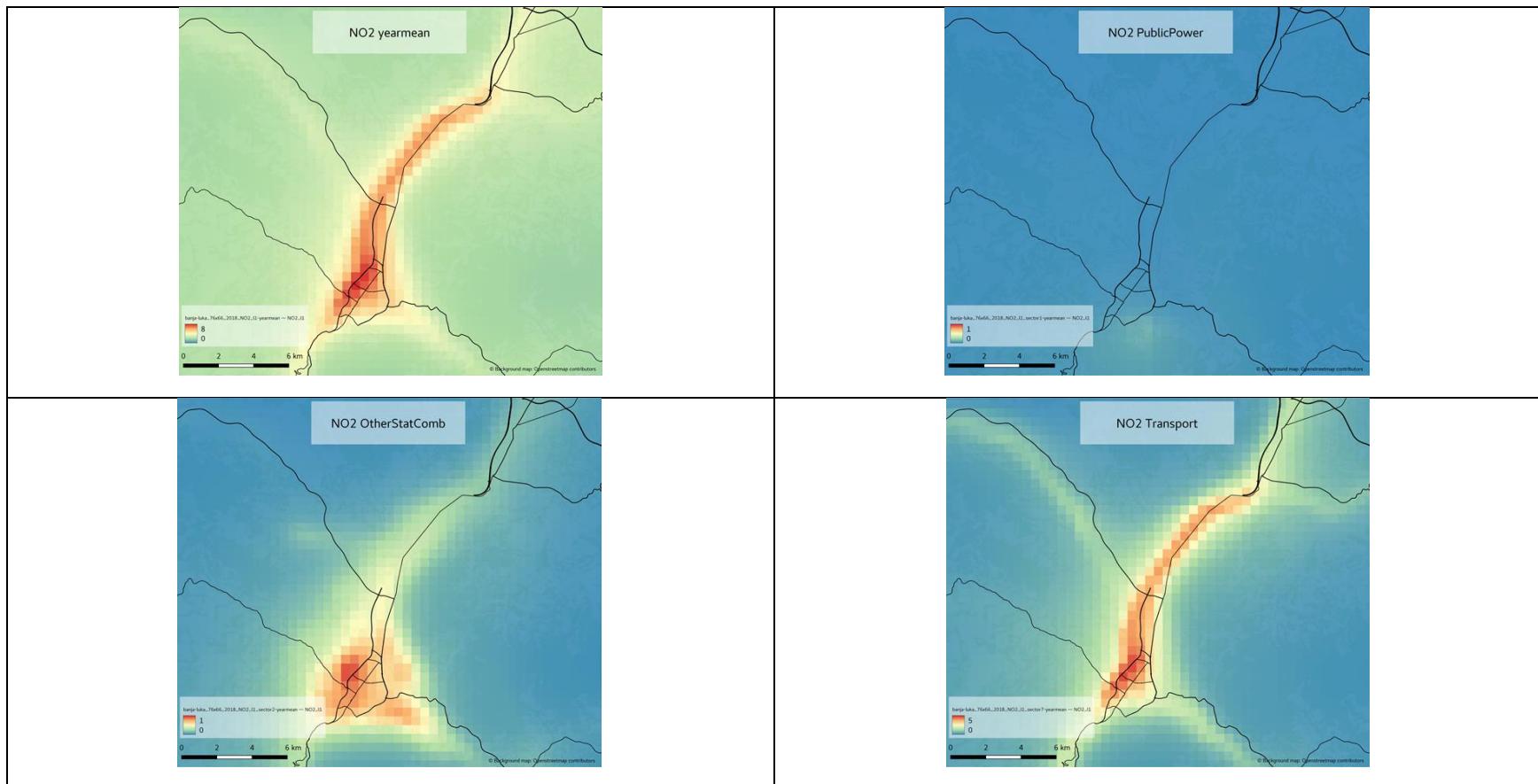


Slika A-8. Prostorne karte modeliranih koncentracija PM<sub>2,5</sub> u Sarajevu, 2018. za a) ukupnu godišnju srednju vrijednost zasnovanu na svim dostupnim sektorskim emisijama unutar domene modela, uključujući pozadinske koncentracije sa granice. Izvorna raspodjela koncentracija PM<sub>2,5</sub> za tri različita sektora izračunata sa novim skupom podataka visoke rezolucije o lokalnoj emisiji iz b) Javne energije, c) Ostalog stacionarnog sagorijevanja i d) Transporta

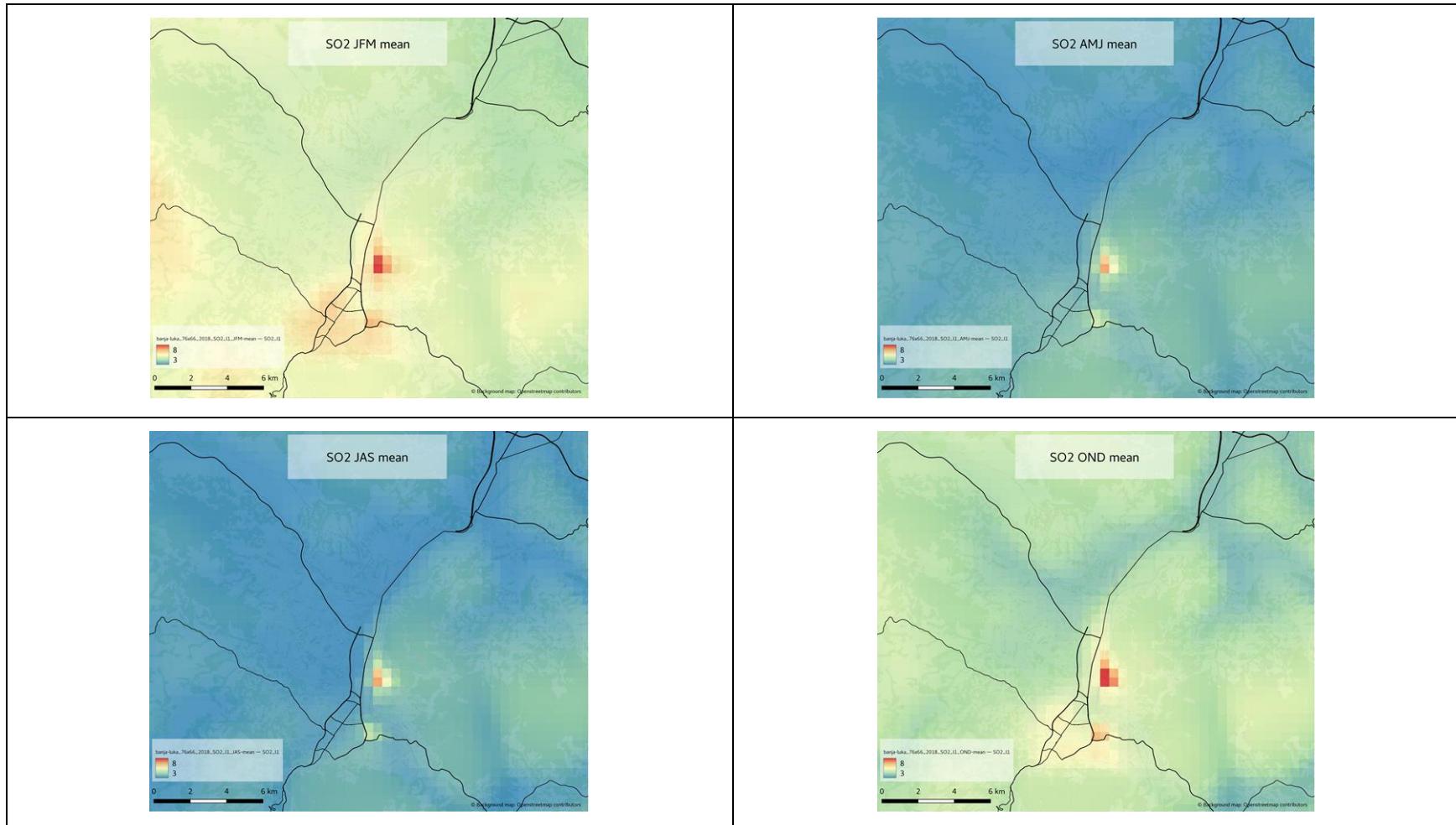
### Prilog 3 – Banja Luka, karte disperzije i raspodjele izvora



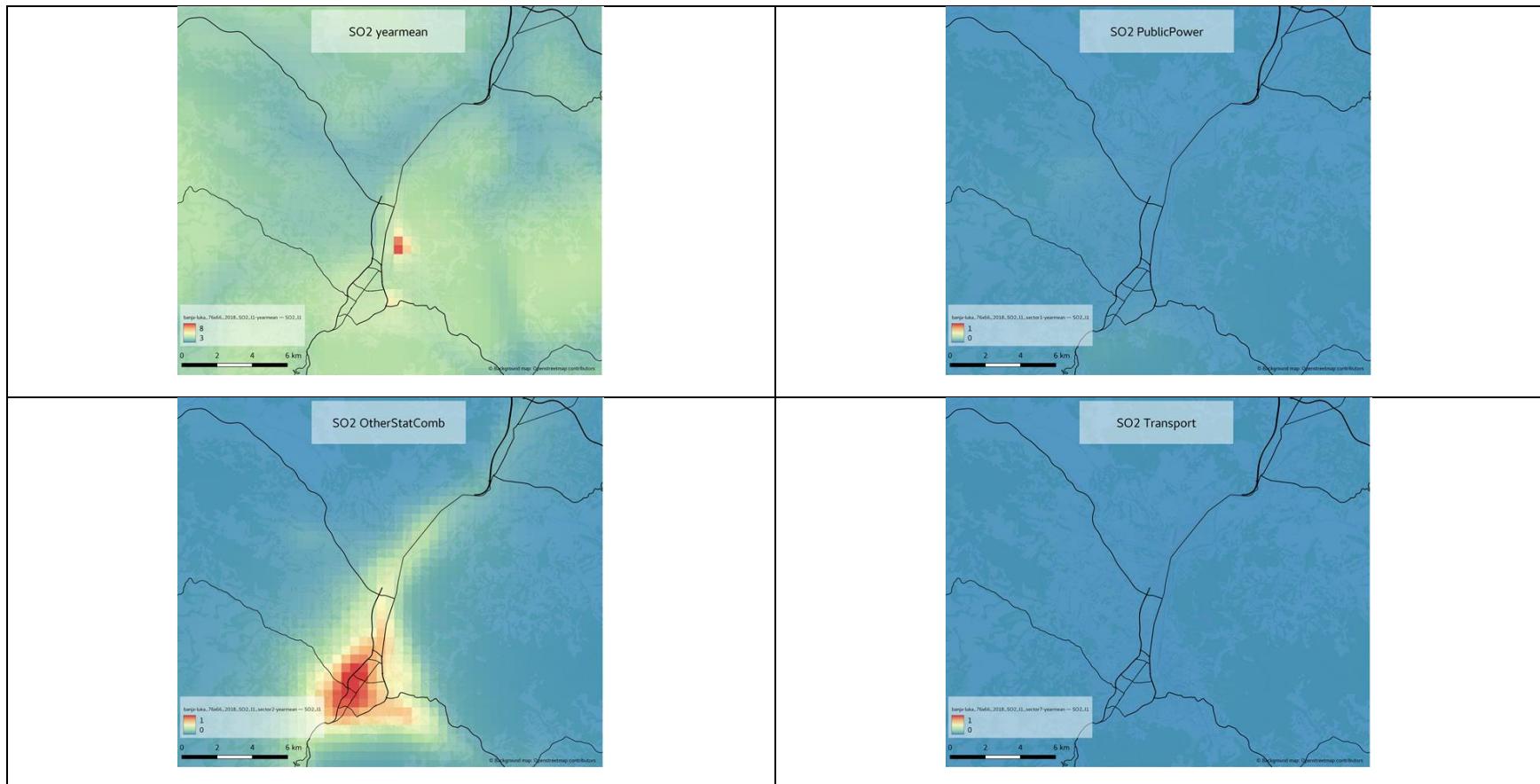
Slika B-1. Prostorne karte modeliranih sezonskih prosjeka NO<sub>2</sub> tokom; a) januar-mart (JFM), b) april-jun (AMJ), c) juli-septembar (JAS) i d) oktobar-decembar (OND) u Banjoj Luci, 2018. Jedinice su u ug/m<sup>3</sup>



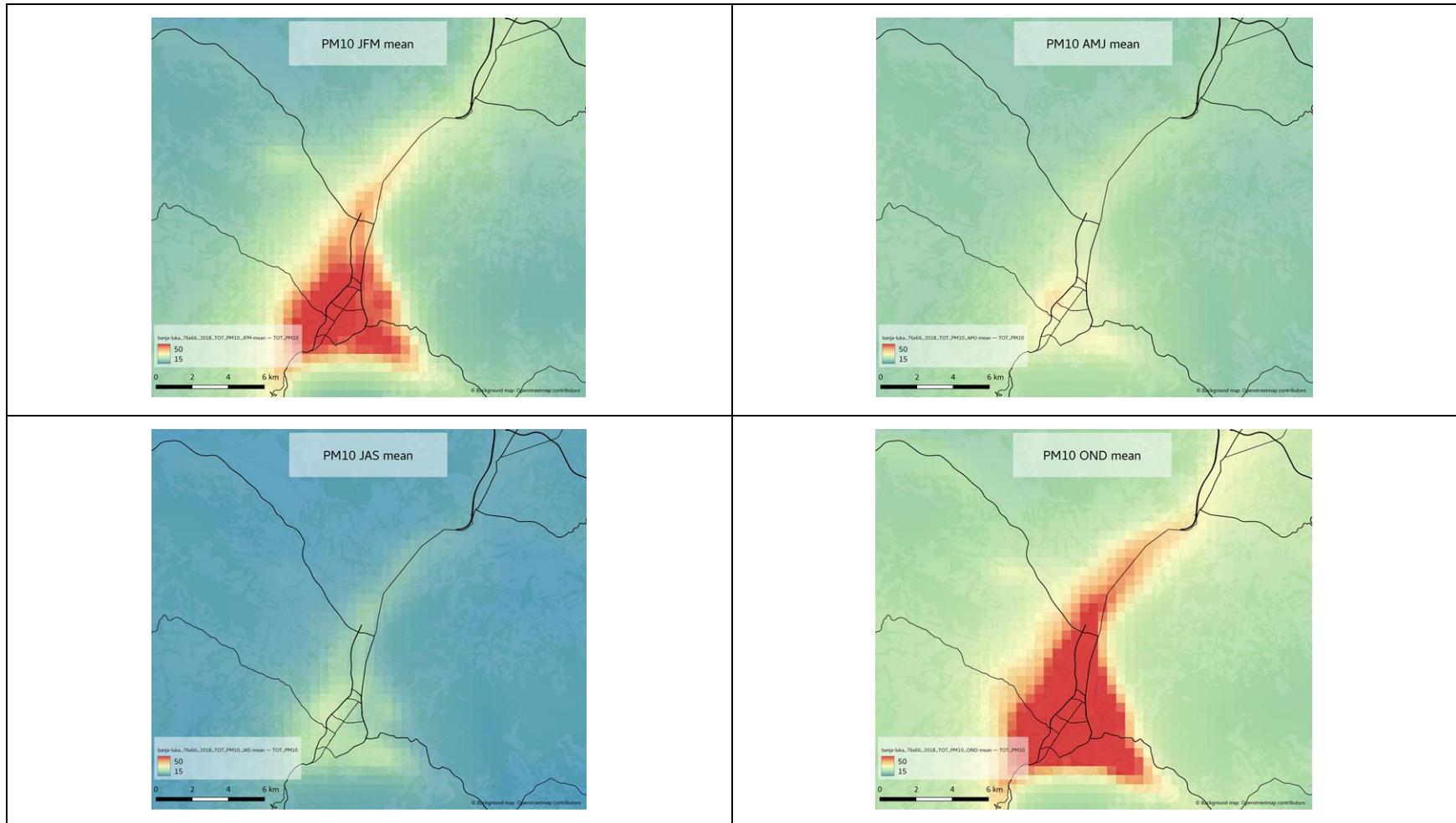
Slika B-2. Prostorne karte modeliranih koncentracija NO<sub>2</sub> u Banjoj Luci, 2018. za a) ukupnu godišnju srednju vrijednost zasnovanu na svim raspoloživim sektorskim emisijama unutar domena modela, uključujući pozadinske koncentracije sa granice. Izvorna raspodjela koncentracija NO<sub>2</sub> za tri različita sektora izračunata sa novim skupom podataka visoke rezolucije o lokalnoj emisiji iz b) Javne energije, c) Ostalog stacionarnog sagorijevanja i d) Transporta



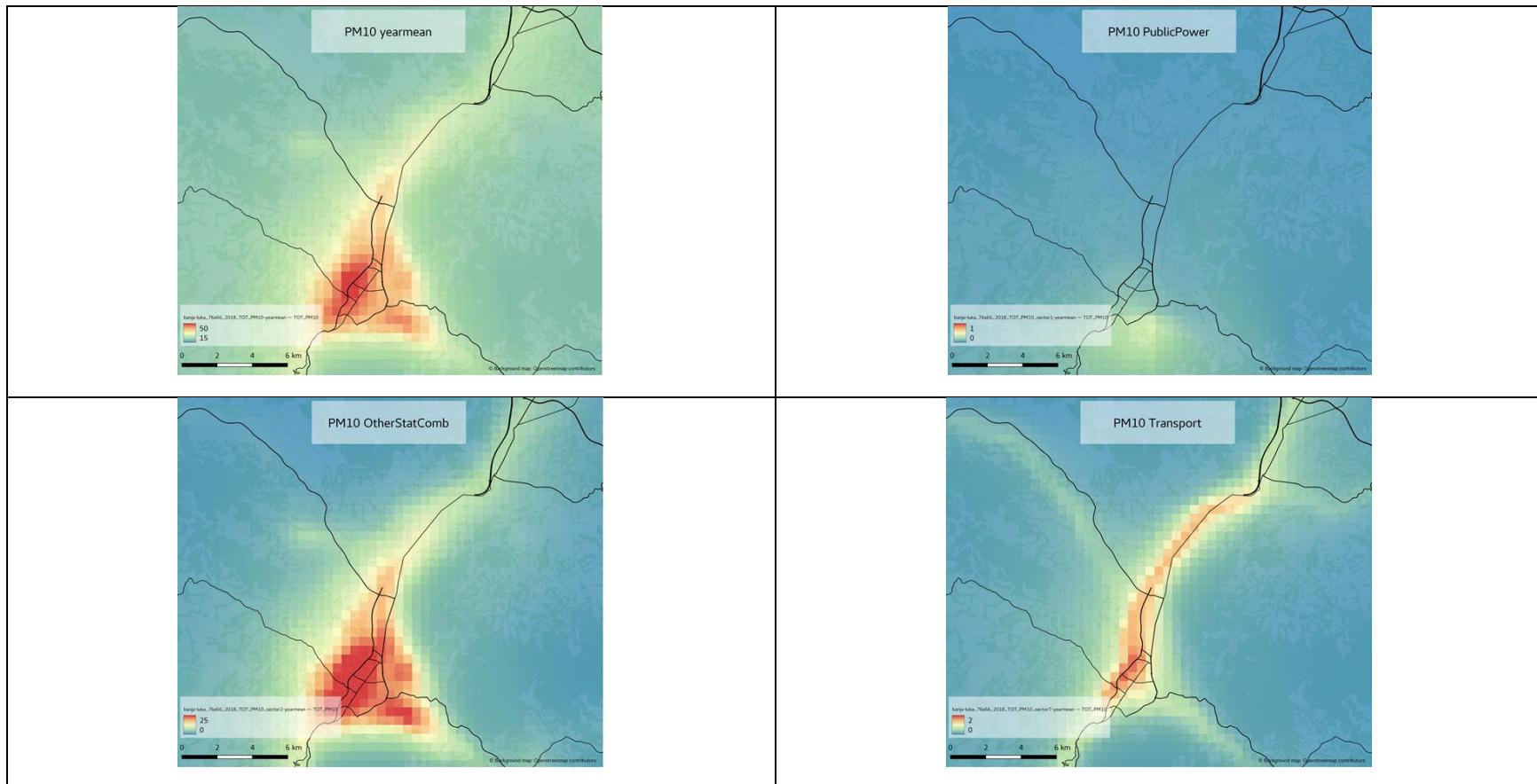
Slika B-3. Prostorne karte modeliranih sezonskih prosjeka SO<sub>2</sub> tokom; a) januar-mart (JFM), b) april-jun (AMJ), c) juli-septembar (JAS) i d) oktobar-decembar (OND) u Banjoj Luci, 2018. Jedinice su u ug/m<sup>3</sup>



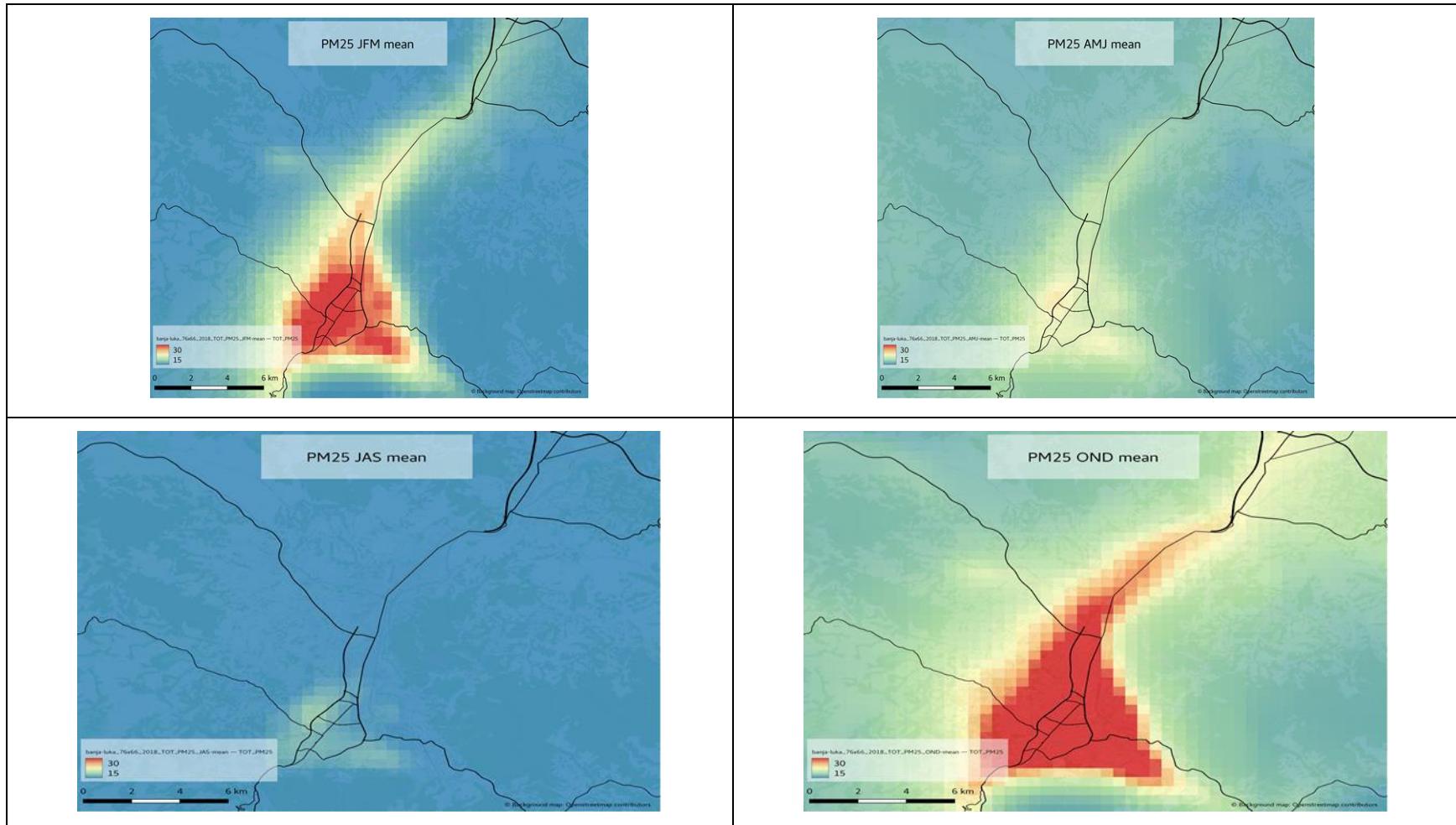
Slika B-4. Prostorne karte modeliranih koncentracija SO<sub>2</sub> u Banjoj Luci, 2018. za a) ukupnu godišnju srednju vrijednost na osnovu svih dostupnih sektorskih emisija unutar domena modela, uključujući pozadinske koncentracije sa granice. Izvorna raspodjela koncentracija SO<sub>2</sub> za tri različita sektora izračunata s novim skupom podataka visoke rezolucije o lokalnoj emisiji iz b) Javne energije, c) Ostalog stacionarnog sagorijevanja i d) Transporta



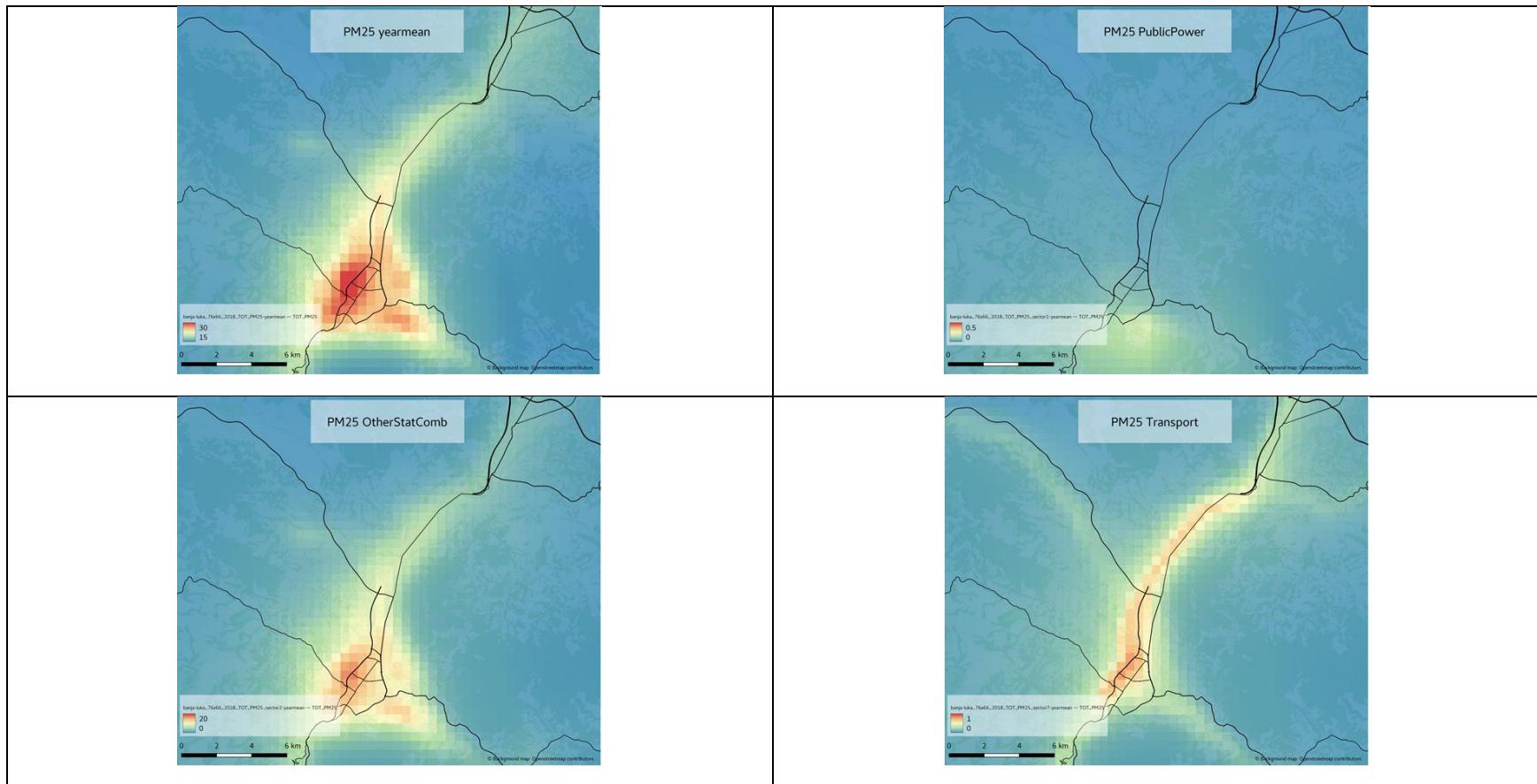
Slika B-5. Prostorne karte modeliranih sezonskih prosjeka PM10 tokom; a) januar-mart (JFM), b) april-jun (AMJ), c) juli-septembar (JAS) i d) oktobar-decembar (OND) u Banjoj Luci, 2018. Jedinice su u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Slika B-6. Prostorne karte modeliranih koncentracija PM10 u Banjoj Luci, 2018. za a) ukupnu srednju vrijednost na godišnjem nivou na osnovu svih dostupnih sektorskih emisija unutar domena modela, uključujući pozadinske koncentracije sa granice. Izvorna raspodjela koncentracija PM10 za tri različita sektora izračunata sa novim skupom podataka visoke rezolucije o lokalnoj emisiji b) Javne energije, c) Ostalog stacionarnog sagorijevanja i d) Transporta



Slika B-7. Prostorne karte modeliranih sezonskih prosjeka PM<sub>2,5</sub> tokom; a) januar-mart (JFM), b) april-jun (AMJ), c) juli-septembar (JAS) i d) oktobar-decembar (OND) u Banjoj Luci, 2018. Jedinice su u ug/m<sup>3</sup>



Slika B-8. Prostorne karte modeliranih koncentracija PM<sub>2,5</sub> u Banjoj Luci, 2018. za a) ukupnu godišnju srednju vrijednost zasnovanu na svim raspoloživim sektorskim emisijama unutar domena modela, uključujući pozadinske koncentracije sa granice. Izvorna raspodjela koncentracija PM<sub>2,5</sub> za tri različita sektora izračunata s novim skupom podataka visoke rezolucije o lokalnoj emisiji b) Javne energije, c) Ostalog stacionarnog sagorijevanja i d) Transport



