ALTERNATOR
Misliti znanost.

Odkrivanje nevidnega – zmanjševanje onesnaženosti zraka v urbanih okoljih s pomočjo prebivalcev

23. 5. 2024

Številka: 12/2024

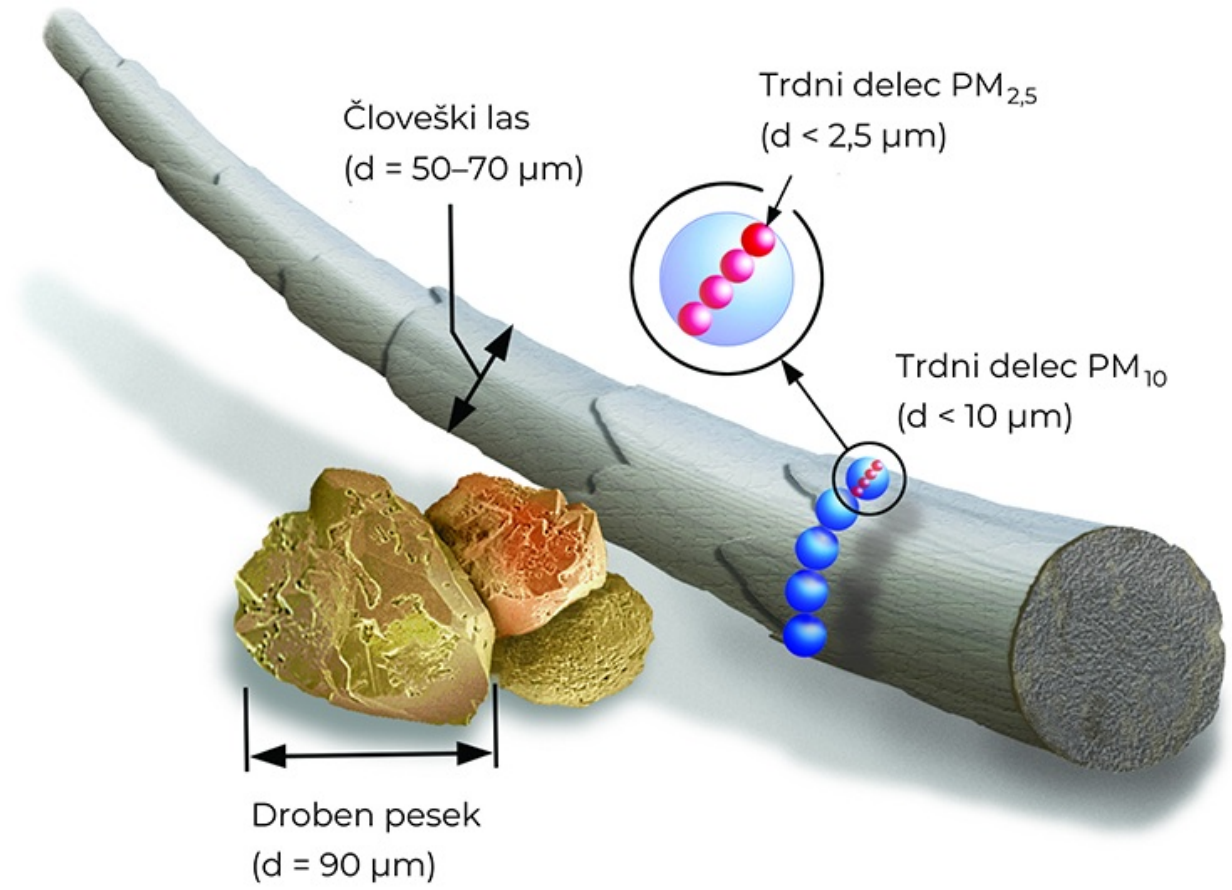
Avtorica:

- Anja Ilenič



Foto: Arne Hodalič

Onesnaženost zraka, predvsem v urbanih okoljih, je eden največjih izzivov za javno zdravje in okolje. Vpliv onesnaženega zraka na okolje in ljudi je ogromen, pri čemer se ocenjuje, da kar 99 % prebivalstva na svetu (https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1) živi v okolju, ki je vsaj deloma izpostavljeno višjim koncentracijam atmosferskih onesnaževal, kot jih priporoča Svetovna zdravstvena organizacija (WHO). Med najbolj problematičnimi so trdni delci (angl. *particulate matter* ali krajše PM) (Slika 1).



Slika 1: Shematski prikaz velikosti trdnih delcev

Trdni delci so heterogena zmes mikroskopsko majhnih trdnih in kapljičnih delcev, razpršenih v ozračju. Izvirajo lahko iz naravnih virov, kot so vulkanski izbruhi, gozdni požari in erozija tal, ali pa so posledica antropogenih aktivnosti, kot so izgorevanje fosilnih goriv ter emisije iz prometa in kurišč, industrijskih in kmetijskih obratov ter gradbišč. Tvorijo jih večinoma raznolike ogljikove spojine, poleg njih pa trdne delce sestavljajo tudi različne oblike soli, mineralov in težkih kovin, kot so npr. arzen (As), kadmij (Cd), svinec (Pb) in nikelj (Ni). Po podatkih (https://www.eea.europa.eu/themes/air/country-fact-sheets/2021-country-fact-sheets/slovenia-1) Svetovne zdravstvene organizacije vsako leto zaradi slabe kakovosti zraka v Evropski uniji (EU) umre približno 300.000 ljudi, v Sloveniji pa okoli 1000. Številne epidemiološke raziskave so dokazale, da izpostavljenost trdnim delcem povzroča znatna zdravstvena tveganja, vključno s kroničnimi in akutnimi boleznimi dihal, srca in ožilja, kar lahko povzroči skrajšanje pričakovane življenjske dobe za približno tri leta, tudi pri zelo nizkih koncentracijah trdnih delcev. Učinki izpostavljenosti in povezani zdravstveni ter okoljski izzivi so odvisni predvsem od porazdelitve velikosti delcev, njihove kemične sestave, fizioloških sposobnosti osebe ter okoljskih pogojev, kot so vlaga, temperatura in veter. Trdne delce glede na aerodinamični premer, s čimer je povezan njihov transport v zraku in telesu, delimo na grobe delce PM_{10} (premer < 10 µm), fine delce $PM_{2,5}$ (premer < 2,5 µm), ultrafine delce $PM_{0,1}$ (premer < 0,1 µm); trdne delce vseh velikosti imenujemo tudi suspendirani delci TSP (angl. *total suspended particulate matter*; premer <100 µm). Od premera delca je odvisen čas zadrževanja v atmosferi. Povprečni zadrževalni časi delcev v velikostnem razponu 1–10 µm znašajo od 10 do 100 ur (https://doi.org/10.1016/0004-6981(71)90113-2) . Grobi delci lahko vstopijo v zgornje dihalne poti in se tam odlagajo, fini delci lahko prodrejo v spodnje dihalne poti in dosežejo pljučne mešičke, ultrafini delci pa so dovolj majhni, da lahko prečkajo pljučno krvno-zračno pregrado in poškodujejo živčni sistem. Onesnaženost zraka s trdnimi delci škoduje tudi okolju, saj vpliva na podnebne spremembe in redčenje ozonskega plašča ter spodbuja procese evtrofikacije (https://sl.wikipedia.org/wiki/Evtrofikacija) , ki povzroča cvetenje voda zaradi povečane koncentracije anorganskih hranil, in zakisljevanja tal (https://en.wikipedia.org/wiki/Soil_acidification) , ki znižuje pH in rodovitnost. Onesnaženost zraka poleg zdravstvenih in okoljskih posledic povzroča tudi obsežno ekonomsko škodo, ki se jo v Evropi letno ocenjuje na približno 1,5 milijarde evrov (https://unece.org/air-pollution-and-economic-development) .

V EU v zadnjih letih opažamo postopno zmanjševanje koncentracij trdnih delcev, povprečno za 2−6 % na leto, kar je predvsem rezultat omejevanja uporabe določenih goriv v avtomobilskem in energetskem sektorju ter uvedbe ukrepov in direktiv. V Sloveniji je trenutno veljavna Uredba o kakovosti zunanjega zraka (http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED5493) (Uradni list RS, št. 9/11, 8/15, 66/18 in 44/22 – ZVO-2), ki sledi Evropski Direktivi 2008/50/ED (https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/ALL/?uri=CELEX:32008L0050) o kakovosti zunanjega zraka. Uredba določa letne in dnevne mejne vrednosti koncentracij trdnih delcev, ki lahko že imajo škodljive učinke na zdravje ljudi in okolje. Letna mejna vrednost za varovanje zdravja je za koncentracijo grobih delcev (PM_{10}) 40 µg/m^3, finih delcev ($PM_{2,5}$) pa 25 µg/m^3. Poleg zakonodaje obstajajo tudi priporočila Svetovne zdravstvene organizacije, ki je leta 2021 objavila posodobljene – strožje smernice, ki navajajo, da so škodljivi vplivi na zdravje opazni že pri letni vrednosti 5 µg/m3 za grobe delce in 15 µg/m^3 za fine delce. Leta 2021 je bila povprečna koncentracija grobih delcev na ravni EU 18,5 µg/m^3, v Sloveniji pa 20,6 µg/m^3.

V Sloveniji k visokim koncentracijam grobih in finih trdnih delcev največ prispeva uporaba goriv v gospodinjstvih in storitvenem sektorju, kar predstavlja 59−72 % vseh antropogenih trdnih delcev. Cestni promet (http://rte.arso.gov.si/zrak/kakovost%20zraka/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/kakovost_letna.html) k skupnim državnim izpustom prispeva 6 %, pri čemer znaša delež izpustov finih trdnih delcev 5 %. Poleg goriva h koncentraciji trdnih delcev pomembno prispeva tudi obraba cest, gum in zavor.

Evropska komisija je v okviru evropskega zelenega dogovora (https://www.europarl.europa.eu/news/sl/headlines/society/20200618STO81513/zeleni-dogovor-kljuc-do-podnebno-nevtralne-in-trajnostne-eu?&at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=zeleni%20dogovor&at_topic=Green_Deal&at_location=SI&gclid=Cj0KCQjw8NilBhDOARIsAHzpbL1xyQdHa_a-nlKvjMR0FLEHrNJO3QqbRFXY4J7V0PDg6U5DMsaArnoEALw_wcB) sprejela akcijski načrt za doseganje podnebne nevtralnosti do leta 2030 in ničelnih izpustov do leta 2050. V skladu z dogovorom so se članice EU zavezale, da bodo do leta 2030 zmanjšale neto emisije toplogrednih plinov za vsaj 55 % v primerjavi z ravnmi iz leta 1990 ter sprejele dodatne ukrepe, ki bi prispevali k zmanjšanju števila smrti zaradi povišanih koncentracij finih trdnih delcev.

V urbanih območjih se za oceno in analizo kakovosti zraka pogosto uporabljajo stacionarne merilne postaje, ki stalno spremljajo kakovost zraka. V Sloveniji to vlogo opravlja Agencija Republike Slovenije za okolje (http://hmljn.arso.gov.si/zrak/kakovost%20zraka/) (ARSO), ki redno izvaja urne, dnevne in mesečne meritve grobih in finih trdnih delcev, žveplovih in dušikovih oksidov, ogljikovega monoksida ter ozona. Med letoma 2018 in 2022 so bile koncentracije finih delcev sistematično spremljane na petih mestih v Sloveniji, in sicer v Celju, Ljubljani, Mariboru, Novi Gorici in Iskrbi. Leta 2022 je bila mreža spremljanja finih trdnih delcev razširjena na Mursko Soboto, Kranj, Novo mesto, Zagorje, Ptuj, Trbovlje, Hrastnik, Koper, Velenje in Žerjav.

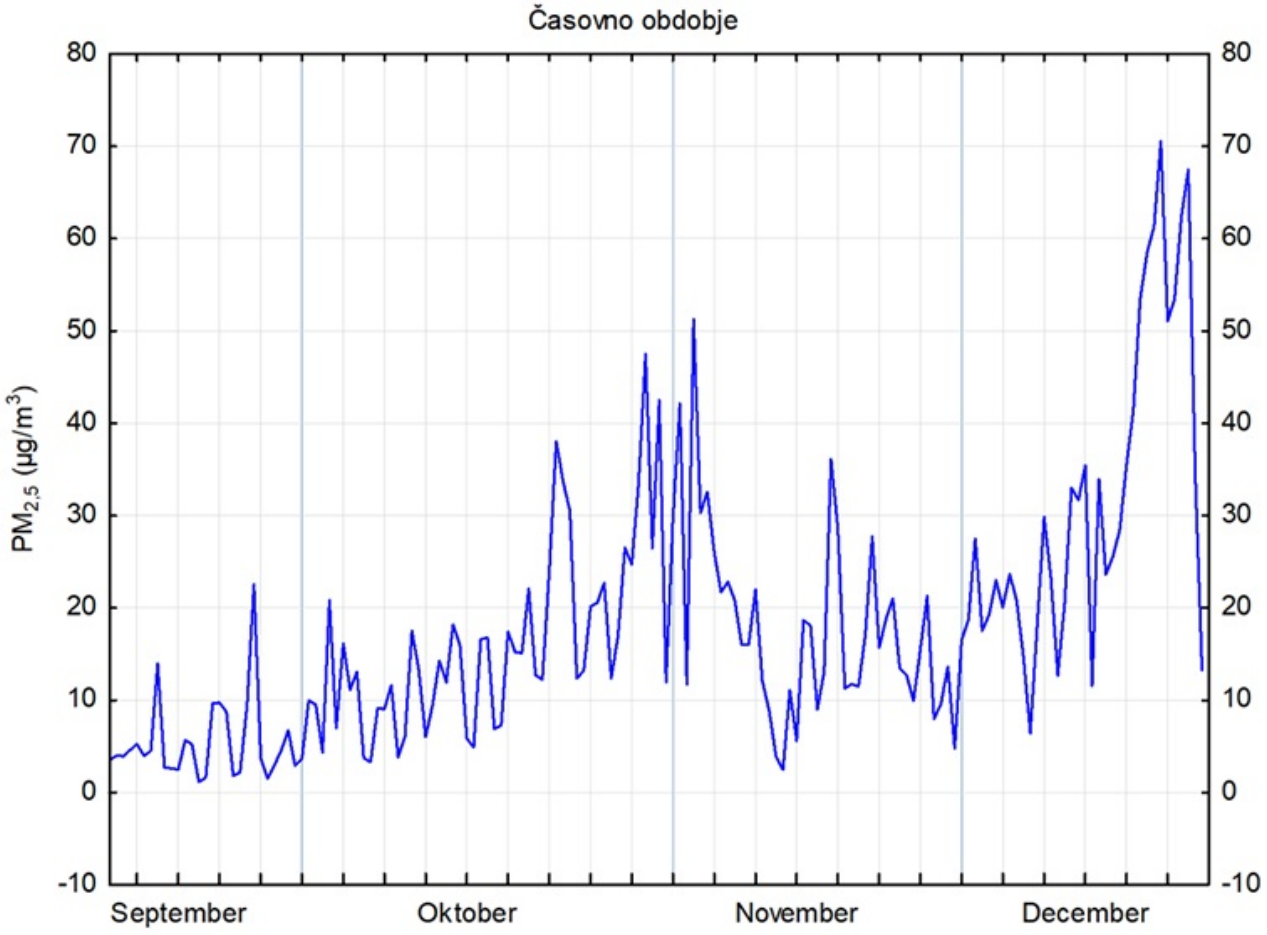
V slovenskih mestih, zlasti v kotlinah, se pogosto soočamo s težavami, povezanimi z onesnaženim zrakom, predvsem zaradi pogostih temperaturnih obratov in oslabljene prevetrenosti. To omejuje učinkovito mešanje zračnih mas, ki je ključno za razprševanje onesnaževal in lahko privede do njihove akumulacije. Ljubljana je eno izmed mest v Sloveniji, kjer je ta dinamika izrazito izražena. Analiza do sedaj zbranih podatkov kaže, da so bile povprečne letne koncentracije finih trdnih delcev v Ljubljani višje od državnega povprečja – gibale so se med 15 in 19 µg/m^3.

Meritve, ki se izvajajo na stalnih merilnih postajah, sledijo standardiziranim metodam za zagotavljanje in nadzor kakovosti, vendar so pogosto preveč razpršene, kar lahko vodi do pomanjkljivosti pri pridobivanju podrobnejših visoko-ločljivih časovnih in lokacijskih informacij za določene mikrolokacije. Alternativne metode z uporabo cenovno dostopnih senzorjev, ki se enostavno namestijo na kolesa in jih lahko uporabljajo občani, lahko predstavljajo učinkovit in celovit pristop za dodatno analizo tveganj in identifikacijo bolj onesnaženih stičišč v urbanih okoljih.

Pristop k znanstvenemu raziskovanju, ki v proces zbiranja podatkov vključuje širšo javnost, poznamo pod imenom občanska oziroma državljanska znanost (angl. *citizen science*). Ta participativni pristop omogoča pridobivanje bolj obsežnega vira informacij, ki lahko pripomorejo k izboljšanju obstoječih politik ter ustvarjanju bolj trajnostnih in kakovostnih življenjskih pogojev v urbanem okolju. Evropska komisija prepoznava vrednost takšnih raziskav in jih aktivno vključuje v svoje razpise za raziskovalne projekte (https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/citizen-science-eu-policies_en) . V Sloveniji je trenutno več aktivnih projektov (https://eu-citizen.science/) , ki segajo na področje varstva okolja, konservatorstva, biologije in biodiverzitete. Enega izmed projektov državljanske znanosti je med septembrom in decembrom 2022 koordiniral Zavod za gradbeništvo Slovenije. Glavni namen raziskovalne študije (https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169117) , v okviru katere je aktivno sodelovalo 19 prostovoljcev, je bil ugotoviti potencialno škodljive učinke izpostavljenosti finim trdnim delcem pri

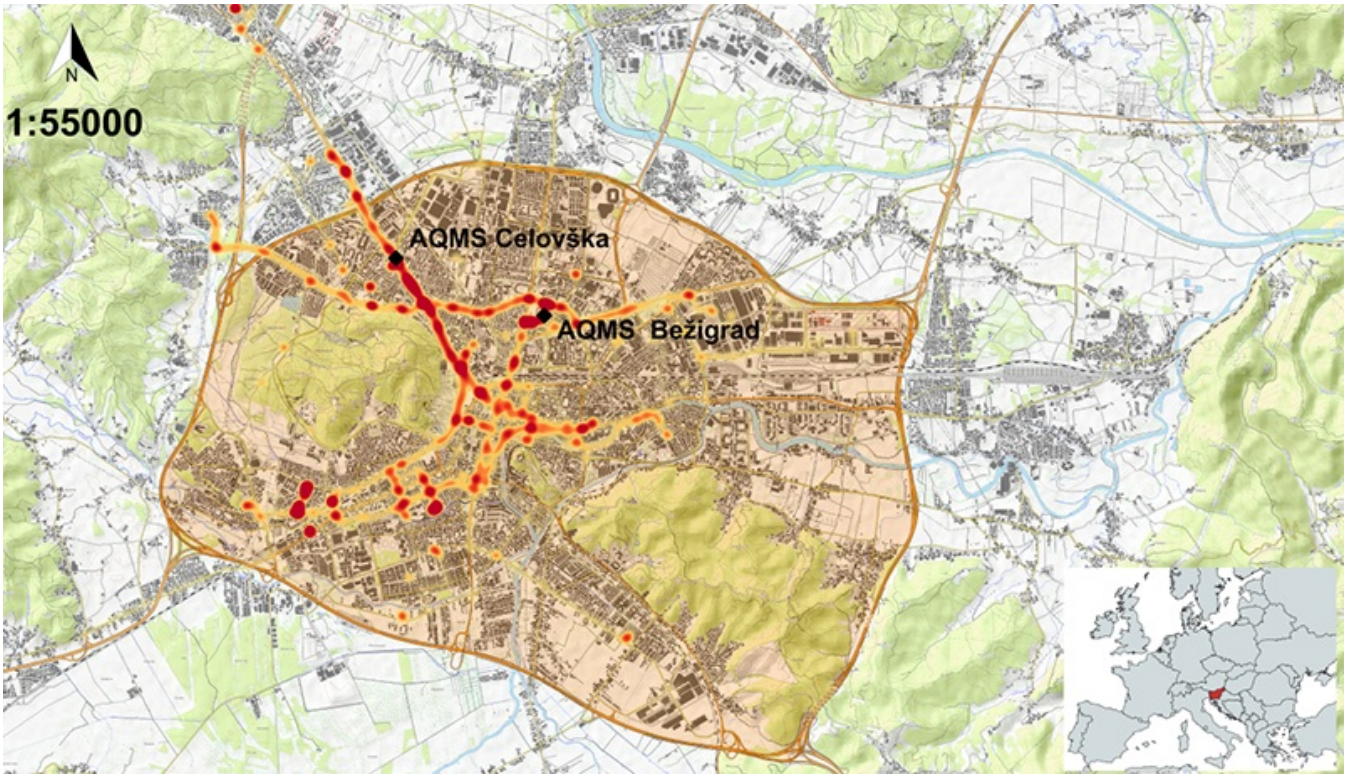
udeležencih v prometu. Udeleženci so skupno opravili 312 kolesarskih poti; med potjo so zbirali podatke o koncentracijah finih delcev, in sicer s pomočjo nizkocenovnih optičnih senzorjev Sensirion SPS30 z ločljivostjo 1 $\mu g/m^3$, ki delujejo po principu laserskega sipanja (https://www.malvernpanalytical.com/en/products/technology/light-scattering/laser-diffraction) , pri čemer je velikost delca določena na podlagi intenzitete sipane svetlobe. Večji kot je delec, manjši je kot sipane svetlobe. Merilci so tiskani s tehnologijo 3D, so odprtokodni in skupaj z navodili za izdelavo dostopni na spletni strani CanAirIO (https://canair.io/) .

Vsak prostovoljec je za zagotavljanje natančnosti in zanesljivosti pridobljenih podatkov poleg meritev izvedel tudi terensko so-lokacijsko kalibracijo ob eni izmed dveh merilnih postaj ARSA – Ljubljana Bežigrad ali Ljubljana Celovška. Rezultati so pokazali primerljive podatke s povprečno razliko 21 %, ki jo lahko pripisujemo učinkom nukleacije (https://en.wikipedia.org/wiki/Nucleation) (začetek procesa formiranja delcev) zaradi vpliva vlažnosti. Povprečne izmerjene vrednosti finih trdnih delcev so se gibale med 4,7 $\mu g/m^3$ in 32,3 $\mu g/m^3$, pri čemer so se koncentracije teh delcev povečevale z nižjo zunanjo temperaturo (Slika 2).



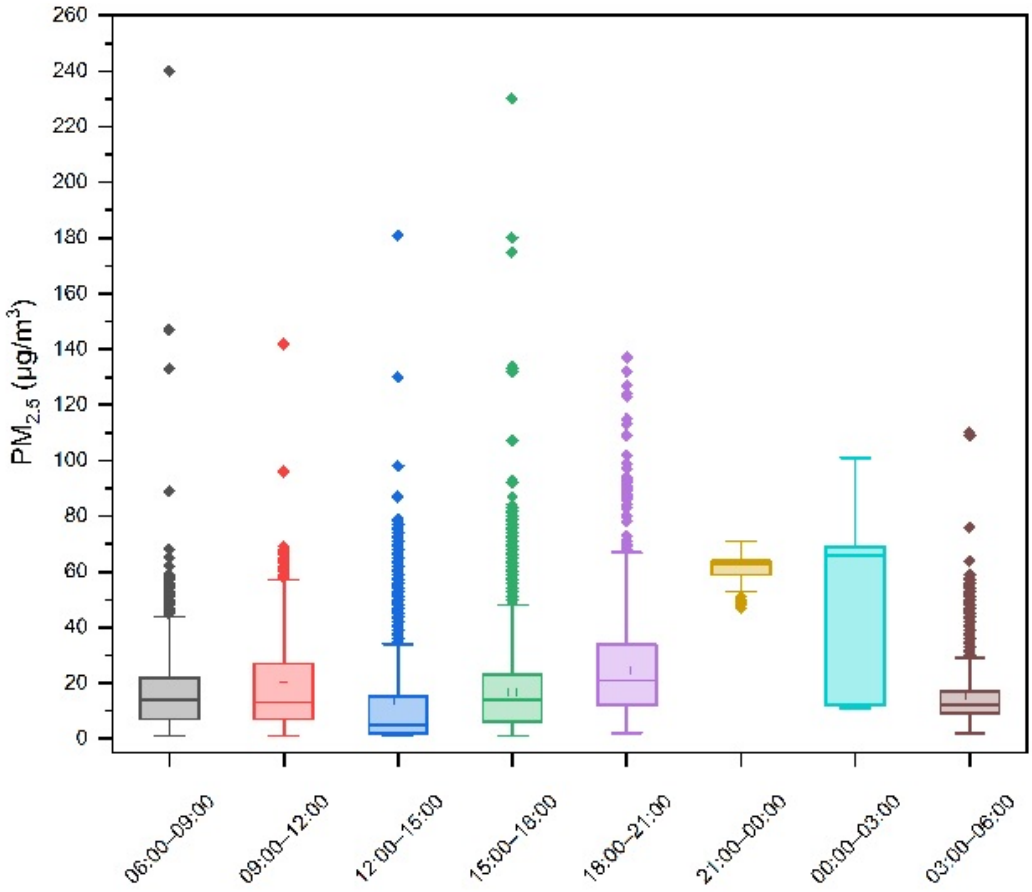
Slika 2: Graf mesečne porazdelitve finih trdnih delcev

V hladnejših mesecih so bile zabeležene višje ravni onesnaženja zraka, kar je predvsem posledica pogostih toplotnih inverzij in slabše prevetrenosti. Prostorska analiza podatkov je v decembru razkrila več stičišč obremenjenosti s finimi trdnimi delci v primerjavi s septembrom. Povišane koncentracije teh delcev so bile zaznane predvsem na območjih z gostejšim prometom ob mestnih vpadnicah, blizu gradbišč, avtobusne in železniške postaje ter ob avtocestni obvoznici (Slika 2).



Slika 3: Prostorska porazdelitev finih trdnih delcev

Poleg tega je časovna analiza finih trdnih delcev pokazala, da so bile najvišje koncentracije zabeležene ponoči med 21. uro in polnočjo, pri čemer je bila povprečna koncentracija 61 $\mu g/m^3$. Nasprotno so bile najnižje koncentracije opažene popoldne med 12. in 15. uro s povprečno koncentracijo 12 $\mu g/m^3$, kar je mogoče pripisati znatnemu vplivu planetarnega mejnega sloja (https://en.wikipedia.org/wiki/Planetary_boundary_layer) , ki se ponoči, ko so temperature nižje, zgosti in zadrži delce blizu površja. Pomembno vlogo v Ljubljani (poleg meteoroloških in topografskih dejavnikov ter stopnje urbanizacije in industrializacije) igrajo tudi lokalni viri emisij, predvsem individualna kurišča. Ugotovljeno je bilo, da ima popoldanska prometna konica večji vpliv na koncentracije finih trdnih delcev kot jutranja, in sicer z zabeleženimi povprečnimi koncentracijami 17,3 $\mu g/m^3$.



Slika 4: Graf dnevne porazdelitve finih trdnih delcev

V primerjavi z dnevnimi mejnimi vrednostmi, ki jih je določila Svetovna zdravstvena organizacija (15 µg/m^3), so vrednosti, izmerjene v okviru projekta državljanske znanosti, v opazovanem obdobju presegle to vrednost v 45 % vseh meritev. V decembru je ta odstotek dosegel kar 79 %. Mejna vrednost 50 µg/m^3 je bila presežena v 6 % izmerjenih vrednosti.

Študija je pokazala, da so lahko kolesarji v enakem časovnem obdobju (povprečen čas vožnje na delo) do 3-krat bolj izpostavljeni finim trdnim delcem kot pešci, predvsem zaradi razlik v frekvenci in volumnu dihanja, pri čemer moški vdihnejo približno 17 % več zraka kot ženske (https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.03.004) . Za boljše razumevanje razlik med prevoznimi sredstvi in izpostavljenostjo bi bilo treba upoštevati tudi realen čas, ki ga pešci in kolesarji preživijo v prometu. Analiza je med drugim pokazala, da so bili pešci v septembru najmanj izpostavljeni finim delcem, medtem ko so jim bili kolesarji v decembru najbolj izpostavljeni. Faktor tveganja za zdravje ni presegel vrednosti 1, kar pomeni minimalno tveganje za izpostavljenost tem delcem v Ljubljani.

Razumevanje izpostavljenosti negativnim učinkom slabše kakovosti zraka v mestih, vključno s sodelovanjem občanov v participativnih raziskavah, je ključnega pomena za prepoznavanje neželenih vedenjskih vzorcev prebivalcev. Prebivalci se lahko s pomočjo takšnih podatkov bolje zavejo lastnega prispevka k celotnemu onesnaženju urbanega zraka. S tem zavedanjem lahko sprejemajo bolj zelene in trajnostne odločitve, kot so pogostejša raba javnega prevoza in aktivna mobilnost (hoja, kolesarjenje) ter uporaba visokokakovostnega in suhega lesa za ogrevanje, ki dokazano povzroča manj izpustov trdnih delcev v atmosfero. Poleg tega lahko prebivalci z informacijo o problematičnih stičiščih znotraj urbanih središč izberejo manj obremenjene ceste izven časovnih okvirov prometnih konic. Z uporabo cenovno dostopnih in predhodno kalibriranih mobilnih senzorjev v povezavi s podatki, pridobljenimi na stalnih merilnih mestih (ARSO), je mogoče izboljšati oceno izpostavljenosti atmosferskim onesnaževalom, zagotoviti boljšo časovno in prostorsko porazdelitev podatkov ter s tem omogočiti enostavnejše oblikovanje učinkovitejših regulatornih okvirov in prostorskih načrtov za zmanjšanje onesnaženosti zraka v urbanih okoljih.

https://www.alternator.science/sl/daljse/odkrivanje-nevidnega-zmanjsevanje-onesnazenosti-zraka-v-urbanih-okoljih-s-pomocjo-prebivalcev/