

Kristijan LAVTIŽAR

Ocena izpostavljenosti prometnim onesnaževalom glede na mrežo osnovnih šol in prometnic z uporabo geostatistične analize

V mestih je onesnaženost zraka pogost predmet okoljskih diskusij, ki bo zaradi gostote naselitve in obremenjene prometne mreže še dolgo prisoten in aktualen izziv. Čeprav se je kakovost ozračja zaradi novih tehnologij, selitve industrije iz mest, vgradnje daljinskega ogrevanja ali uporabe novih čistejših energentov v zadnjih desetletjih za določena onesnaževala izboljšala, je obremenitev zraka s prometnimi onesnaževali še vedno nerešen problem. Prispevek se posveča izpostavljenosti ljubljanskih osnovnih šol prometnim onesnaževalom. V njihovih prostorih in na zunanjih površinah se zadržujejo otroci, ki so še posebej dovzetni za morebitne zdravstvene zaplete v povezavi z onesnaženim zrakom. V analitičnem delu z uporabo geografskih informacijskih sistemov (v nadaljevanju: GIS) ugotavljamo, katere šole

v mestu so prostorsko najbolj izpostavljene in katere bi bilo dobro podrobneje proučiti. Z nadaljnimi raziskavami bi pridobili informacije o kakovosti zraka v njihovi neposredni bližini. Rezultat raziskave je razvrstitev osnovnih šol glede na to, koliko so njihovi učenci potencialno izpostavljeni prometnim onesnaževalom. V razpravnem delu prispevka so navedeni sklepi o kakovosti zraka v Ljubljani ter razprava o načrtovanju ukrepov in sprejemanju strategij za izboljšanje kakovosti zraka v mestih.

Ključne besede: izpostavljenost, onesnaževala, promet, osnovne šole, Mestna občina Ljubljana

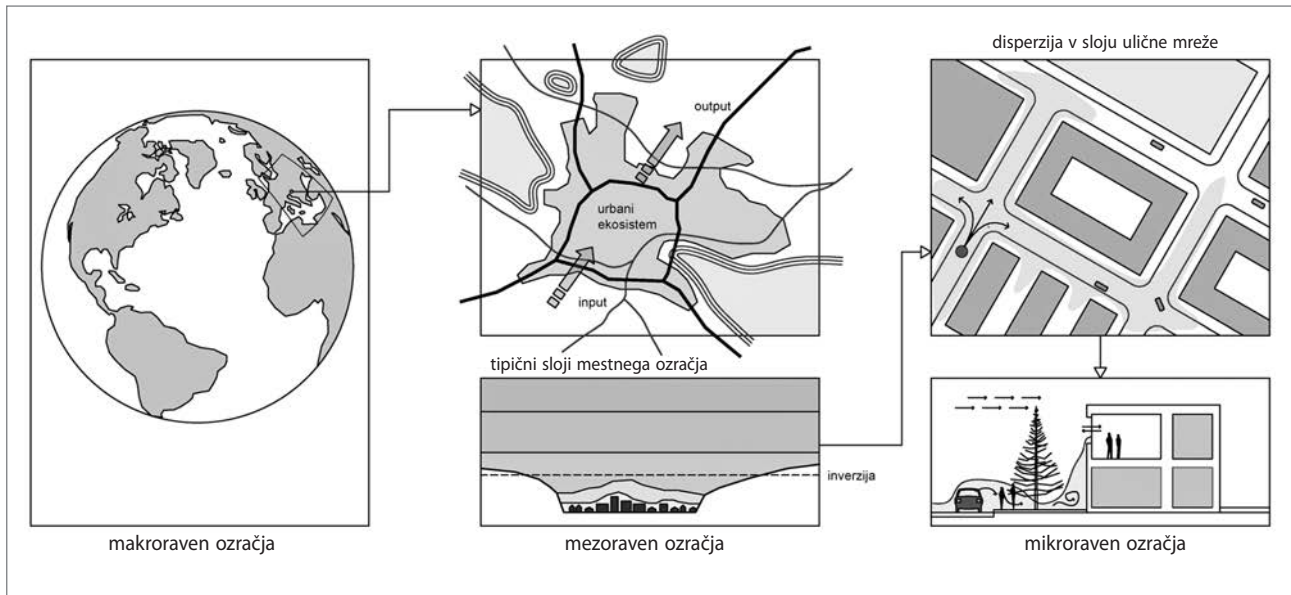
1 Uvod

Kakovost zraka spada med pomembne determinante fizičnega okolja in nas spremlja tako v zunanjem kot tudi v notranjem prostoru, zato jo uvrščamo med pomembne determinante zdravja (Levy idr., 1998). V Sloveniji jo redno spremlja Agencija Republike Slovenije za okolje (v nadaljevanju: ARSO), ki izdaja letna poročila. Onesnaževala v zraku so lahko lokalnega izvora in tako prizadenejo bližnjo okolico ali pridejo od drugje, saj lahko z gibanjem zračnih mas prepotujejo tudi velike razdalje. Pri tem nekatera v ozračju kemično reagirajo, zato lahko njihov vpliv seže daleč od prvotnih virov (ARSO, 2019). Na lokalno onesnaženost vplivajo izpusti in geografski pogoji – predvsem relief in s tem povezane meteorološke razmere. V bližini prometnih cest in mestnih središč ima pomemben vpliv promet. Motorna vozila, ki delujejo na fosilna goriva, poleg delcev izpuščajo v zrak še ogljikov dioksid, dušikove ali žveplove okside. Han in Naeher (2005) navajata, da se ta onesnaževala pojavljajo predvsem na ravni ulice, v gosto naseljenih urbanih območjih, kjer se lahko zgoščajo v uličnih kanjonih (ang. *street canyon*).

Epidemija covid-19 je leta 2020 povzročila spremembo v strukturi modalnosti prebivalstva in upad rabe javnega potni-

škega prometa, kar je vnovič povečalo uporabo osebnih avtomobilov. Proti koncu epidemije so bile spremembe uporabe javnega prometa še zaznavne ter ob povečani uporabi osebnih vozil in spremembi modalnosti se je povečala skupna gostota prometa (Sengupta in Plumer, 2020). Pri zmanjšanih samočistilnih dejavnikih v okolici cest, ob neugodnih vremenskih razmerah (denimo pri temperaturnem obratu) ali v gosto pozidanih delih mest so negativni učinki prometnega onesnaževanja dodatno okrepljeni (Jernej, 2000).

Najbolj ogrožena skupina ljudi pri izpostavljenosti onesnaženemu zraku so otroci (Smith idr., 2000; Fiala idr., 2001; Selgrade idr., 2007; Stranger idr., 2008; Brook idr., 2010; Franck idr., 2011). Večja občutljivost otrok je povezana s tem, da so dihalne poti otrok ožje, obrambni mehanizmi dihalnih poti še niso polno razviti, pogostnost dihanja pa je večja, kar poveča količino vdihanega zraka in onesnaževal v njem na enoto telesne teže v primerjavi z odraslimi (Eržen idr., 2010). Tako so z onesnaževali najbolj obremenjeni otroci, ki se večji del dneva zadržujejo v vzgojno-izobraževalnih zavodih (Tayarani, 2018). Po oceni Svetovne zdravstvene organizacije (v nadaljevanju: SZO) je na svetu okoli 93 % otrok, mlajših od 15 let, ki vsak



Slika 1: Merila obravnave ozračja na treh ravneh – mikroraven, mezoraven in makroraven (vir: lastni)

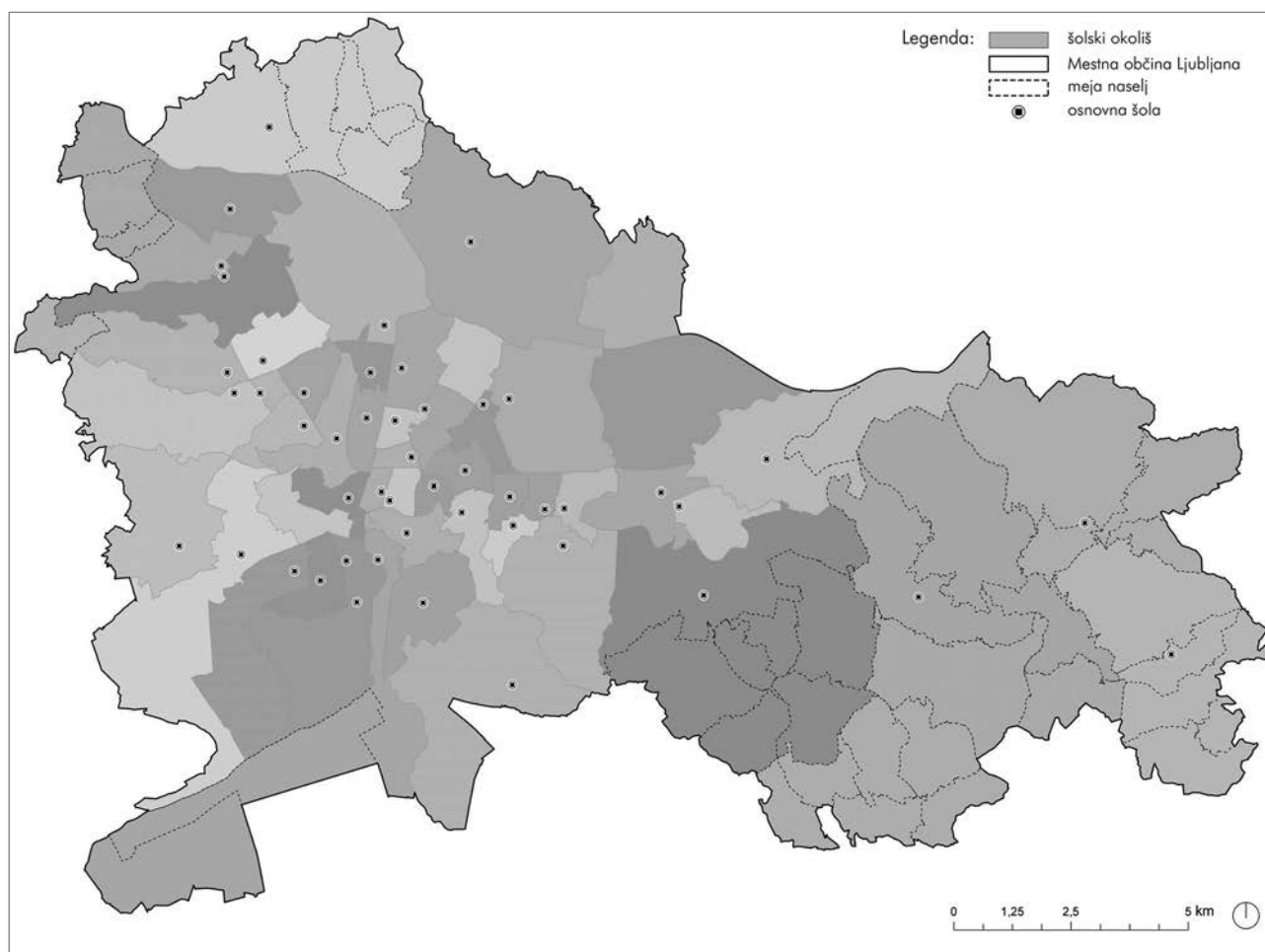
dan dihalo onesnažen zrak (SZO, 2018). Zagotavljanje ustrezne kakovosti zraka v šolah je zato ključna strategija varovanja javnega zdravja. Večina šol v Sloveniji se danes še vedno v celoti zanaša na naravno prezračevanje (Jutraž idr., 2019), zato se je smiselno prednostno posvetiti oceni in prenovi obstoječega stavbenega fonda izobraževalnih objektov. Pred tem je treba ustrezno oceniti obstoječe razmere in obremenjenost z onesnaževali zunaj šol in tudi v njihovih notranjih prostorih.

Onesnaženost zraka v mestu je vezana zlasti na obremenjenost z viri onesnaževal, vendar so koncentracije onesnaževal odvisne tudi od prostorske in časovne spremenljivosti razmer v ozračju. Zadnje lahko razdelimo na tri ločene ravni obravnave ali merila: makroraven, mezoraven in mikroraven (slika 1). Z vidika prostora je onesnaženje ozračja odvisno od mikroklimatskih pogojev prostora, kot so pokrivnost tal, razmerje med grajenimi in zelenimi površinami in od odprtosti ali zračnosti prostora (Oke idr., 2017). Tako mesta meritev v okolici in znotraj šol kot tudi izbira lokacij so pogojeni z oddaljenostjo od linijskih in točkovnih virov onesnaževal (Lavtižar, 2019). Na ravni kakovosti zraka in mikroklimatske posamezne šole se raziskava posveča obremenitvam izpustov motornega prometa. Ulična porazdelitev onesnaževal je variabilna, odvisna od geometrije kanjona, meteorološke slike, prometa, turbulence, emisij prometa in disperzije onesnaževal zraka ter tudi od razpolovnega časa oziroma življenjske dobe posameznih onesnaževal (Britter in Hanna, 2003; Llaguno-Munitxa idr., 2017; Oke idr., 2017). Oke (2017) navaja, da so najvišje vrednosti izmerjene najgloblje v uličnem kanjonu, torej bližje viru emisij na ravni ulice, in na zavetrni strani kanjona. Kadar prevladujejo vetrovi skoraj pravokotno na njegovo os, se ustvari asimetrija v razmerju razporeditve onesnaževal. Ob zavetrni steni

je namreč vzorec vrtničenja tak, da povzroča bolj onesnažen zrak, nasprotno pa je na privetrni strani boljše samočistilna sposobnost, ki niža koncentracije onesnaževal (Lavtižar, 2020).

Tako velika časovna in prostorska variabilnost onesnaževal v mestnem prostoru je zahtevna za ustrezne meritve, zato je računsko modeliranje zaradi velikih procesorskih zahtev pogosto nepraktično. To pomeni, da se je v določenih primerih smiselno zadovoljiti s površno oceno izpostavljenosti onesnaževalom. V raziskavi se zato določene spremenljivke opuščajo, pri grobi oceni in razvrščanju osnovnih šol pa se uporabljajo tradicionalna računsko orodja v okolju GIS za pridobitev prostorske informacije. Metode dela in orodja so pojasnjeni v nadaljevanju.

Ljubljana je mesto z izrazito heterogeno podobo in raznoliko mestno krajino, zaradi česar imajo posamezne mestne četrti lastne mikroklimatske razmere. V središču mesta, kjer je največ pozidanih površin, je pojav mestnega toplotnega otoka najizrazitejši. Poleg tega ta velja za najmanj prevetren del mesta. Po drugi strani ima Mestna občina Ljubljana (v nadaljevanju: MOL) v svojih šolskih četrtih tudi predele, ki se lahko obravnavajo kot popolnoma zunajmestni. V južnem delu občine se raztezajo barjanske kmetijske površine, na vzhodu pa izrazito hribovit in gozdat prostor. Razvejanost prometne mreže in prometna obremenjenost sta v teh delih občine občutno manjši in s tem tudi morebitna izpostavljenost prometnim emisijam. Namen raziskave je zato oceniti izpostavljenost posameznih osnovnih šol prometnim virom onesnaževal in jih nato razvrstiti v razrede izpostavljenosti. Končen rezultat je ocena trenutnega stanja onesnaženosti v okolici javnih osnovnih šol in splošno izpostavljenosti njihovih učencev. Cilj raziskave je dati izhodišča za morebitne nadaljnje raziskave s celostnimi



Slika 2: Prikaz osnovnih šol in pripadajočih šolskih okolišev v MOL za leto 2021 (vir: MOL, 2021).

meritvami v problematičnih okoliših osnovnih šol. V MOL danes deluje 1.060 oddelkov osnovnega šolstva, v mestu pa je 47 javnih osnovnih šol, od tega ima 46 šol določen svoj šolski okoliš (MOL, 2018). Njihove lokacije in šolski okoliši so prikazani na sliki 2. V raziskavi so v analizo vključene vse javne osnovne šole v občini in pripadajoči šolski okoliši v MOL. Lokacije osnovnih šol so ocenjene in razvrščene na podlagi podatkov o onesnaženosti posameznih prometnic.

Rezultati raziskave Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani (glej Ogrin idr., 2014), v kateri so meritve onesnaženega zraka v Ljubljani izvajali med letoma 2013 in 2014, so uporabljeni za informacijo o onesnaženosti ob posameznih prometnicah. Merili so koncentracije dušikovih oksidov, ozona, benzena in črnega ogljika. Uporabili so gosto mrežo merilnih točk, ki omogočajo ugotavljanje neposrednega vpliva cest na kakovost zraka, in sicer s pomočjo ugotavljanja spreminjanja koncentracij onesnaževal v prečni razdalji glede na cesto, ki je glavni vir onesnaževanja, v prečnih profilih ob cesti. Ocena izpostavljenosti za druga onesnaževala se nekoliko razlikuje, ker so v bazo podatkov vključeni samo podatki za dušikove okside. Na podlagi referenčnih meritev je izdelana regresijska analiza

s pomočjo orodij GIS. Podatki katastra stavb in gospodarske javne infrastrukture so opremljeni z opisnimi podatki registra nepremičnin. Glede na kategorizacijo po katastru gospodarske javne infrastrukture so prometnice razdeljene po kategorijah, in sicer HC – avtoceste in hitre ceste, RC – regionalne ceste I., II. in III. reda, GC – glavne ceste I. in II. reda, ZC – zbirne ceste, med katerimi so tudi mestne ali krajevne ceste. Lokalne ceste (z oznako LC) in preostale kategorije cest nižjega reda so izvzete in se v analizi obravnavajo kot malo prometne ceste mirnega urbanega okolja. Osmim prometnicam so dodana vplivna območja in izdelana je mreža točk vzdolž njihovih osi. Točkam so nato dodeljeni atributi meritev dušikovih oksidov v petih razredih. Najvišje vrednosti $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ so pripisane razredu avtocest in hitrih cest, sledijo preostali razredi s postopoma padajočimi vrednostmi dušikovih oksidov v razredih $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Najnižji razred nekategoriziranih cest je opredeljen kot območje t. i. mestnega ozadja v vrednosti $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Na podlagi prijetih vrednosti je sledila izdelava interpolacijskega polja z ločljivostjo v velikosti celice 12,5 m. Vrednosti reklasificiranega polja so nato izračunane in agregirane v točke, s pomočjo katerih so pridobljene vrednosti izpostavljenosti onesnaževalom za posamezne osnovne šole. Te so prikazane v točkah in

poligonih. Interpolacijski oblak točk je nato upodobljen še s celično metodo (ang. *tessellation*). Najbolj ogroženi oziroma izpostavljeni objekti stavbnega fonda in problematični šolski okoliši so kartirani glede na rezultate izpostavljenosti. Izsledki analize so močno poenostavljeni in niso namenjeni natančni predstavitvi dejanskega stanja onesnaženosti v Ljubljani. Podatki so uporabljeni izključno za izdelavo primerjalne matrike posameznih kategorij prometnic – na njeni osnovi je izdelan model izpostavljenosti prometnim onesnaževalom v okolici osnovnih šol v Ljubljani. V sklepu so obravnavani rezultati in navedene lastnosti nekaterih lokacij šolskih stavb.

2 Ocena emisij cestnega prometa

Avtomobilski promet ostaja najbolj priljubljena izbira mobilnosti v Ljubljani, saj je glede na ugotovitve MOL (2017) kar 58 % potovanj opravljenih z avtomobilom. Prometno najbolj obremenjen del mesta in občine Ljubljana je nedvomno zahodni odsek avtoceste, kjer povprečni letni dnevni promet (v nadaljevanju: PLDP) po podatkih Družbe za avtoceste v Republiki Sloveniji (v nadaljevanju: DARS) (2019) znaša več kot 74.000 vozil. Prometna obremenjenost posameznih cest in odsekov cest se sicer z leti spreminja. Slovenska cesta je bila na primer še pred kratkim ena najbolj obremenjenih prometnic v mestu, po končani prenovi leta 2018 pa je odprta le še za javni potniški promet. Po ugotovitvah MOL (2017) so se po uvedbi spremenjenega prometnega režima na Slovenski cesti koncentracije črnega ogljika znižale za 70 %, medtem ko se koncentracije na okoliških cestah niso povečale. Na sliki 3 so prikazane kategorije prometnic na območju MOL.

Tudi emisije cestnega prometa se razlikujejo glede na več dejavnikov. Na količino emisij najbolj vpliva sestava voznega parka in orodja za regulacijo emisij, vendar pa lahko za osebna motorna vozila zanesljivo rečemo, da so na prometni mreži bistveni pretočnost prometa, število in hitrost vozil (Kholod, 2016; Ntziachristos in Samaras, 2019). Agencija z uporabo modela COPERT (ang. *Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport*) ocenjuje, da so emisije delcev iz osebne motorne prometa s povprečno sestavo vozil v Sloveniji pri hitrosti 110 km/h za četrtno manjše kot pri hitrosti 130 km/h (Uradni list RS, št. 77/17). Pri zmanjšanju hitrosti s 130 km/h na 90 km/h je zmanjšanje emisij delcev kar 40-odstotno. Računalniški modelom, kot so COPERT in podobni programi, je danes splošno priznana uporabna vrednost ocenjevanja emisij cestnega prometa, težava pa ostaja pri težko dostopnih terenskih podatkih o dejanski aktivnosti cestnega prometa (Kholod, 2016). Čeprav na primer težka vozila sestavljajo velik del skupnih emisij v prometu, se v mestih pojavljajo izjemoma. Prištevek njihovih emisij lahko tako privede do napačnih izračunov (Singh idr., 2018). Poleg tega izračuni o kumulativnem

doprinosu emisij ne prinesejo vpogleda v prostorske oziroma geografske razsežnosti emisij.

Znani učinki prometa in prometne mreže na koncentracije onesnaževal so v nadaljevanju aplicirani v mestu Ljubljana, njihov vpliv pa je preverjen v okolju GIS. Na podlagi analize GIS je ocenjena izpostavljenost posameznih osnovnih šol. Tovrstne raziskave prostorske izpostavljenosti prometnim onesnaževalom brez uporabe disperzijskih modelov (Singh idr., 2018; Tayaran in Rowangould, 2020) uporabljajo deterministični model z metodo tehtanja (ang. *weighting factor*), pri kateri se križajo podatki o prebivalstvu, podatki o emisijah in prometne strukture na celični mreži. Khan idr. (2018) ocenjujejo, da je deterministično modeliranje danes najpogosteje uporabljena tehnika ocenjevanja izpostavljenosti onesnaženosti zraka in hrupu v cestnem prometu.

Geografske lastnosti, morfološke lastnosti, klimatološka nihanja, lokalni in regionalni vetrovi ter časovna nihanja, ki nedvomno vplivajo na razporeditev onesnaževal in drugih plinov v mestnem ozračju, niso vključeni v analizo. Opisani učinki širjenja onesnaževal in lastnosti padanja koncentracij z razdaljo do točke koncentracij onesnaževal v mestnem ozadju so aplicirani na simetrično postavljeno razlivno cono (ang. *buffer*) glede na kategorične lastnosti prometnic v Ljubljani. Ta cona izraža aplicirane vrednosti meritev Filozofske fakultete (glej Ogrin idr., 2014) in referenčne vrednosti PLDP za leto 2012. Prostorska in časovna ujemanja med prometnim hrupom in prometnim onesnaženjem so v današnjih raziskavah večinoma ovržena (Fecht, 2016), saj prostorski, meteorološki in časovni učinki nanju različno vplivajo. Vendar pa je pridružujočim raziskavam skupna ocena PLDP. V raziskavi se zato upošteva kategorična razdelitev prometne obremenitve iz poročila o Nivelaciji karte hrupa za MOL (2014). Povprečne dnevne obremenitve na območju Ljubljane so namreč razdeljene na te razrede: 40.000, 20.000, 10.000 in 0 vozil. Podatki o obremenjenosti cest, ki so bili pridobljeni z avtomatskimi števci, so upoštevani v 5-delni delitvi razredov lastne raziskave.

3 Tipi mestnega prostora

V mestu se gostota, razmestitev in vrsta virov onesnaževanja v različnih prostorih bistveno razlikujejo, tako v merilu mesta kot tudi znotraj posameznih mestnih predelov in četrti. Prepletajo se dejavnosti in raba zemljišč, spreminjata se število prometnic in gostota prometa. V širšem merilu sta pri obravnavi pomena prostorskih sestavin na podnebje in onesnaženost ozračja pomembni oblika in dimenzija mestne naselbine. Velikost mesta, centralnost ali policentralnost, radialnost proti linearosti, razpršenost proti zgoščenosti. To so spremenljivke, ki vplivajo na mezoraven podnebja.



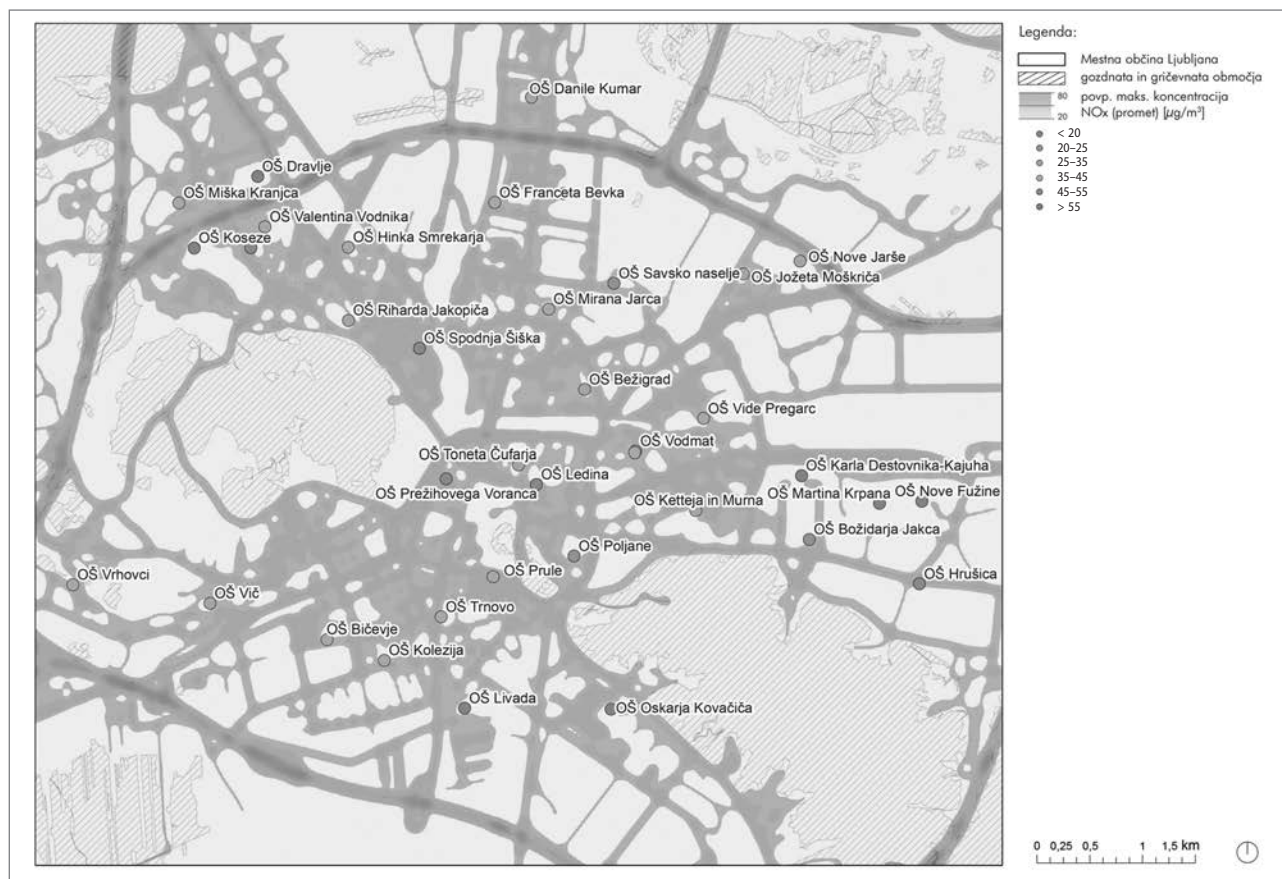
Slika 3: Obravnavano vplivno območje prometnic višjih kategorij na območju Mestne občine Ljubljana. Upoštewane so kategorije avtocest, hitrih cest, regionalnih cest, glavnih cest in zbirnih cest (vir: Geodetska uprava Republike Slovenije, v nadaljevanju GURS, 2021).

Izpusti dušikovih oksidov (NO_x) se podajajo kot kazalnik onesnaženosti in vsota vseh spojin in se izražajo v skupnem ekvivalentu dušikovega dioksida NO_2 (Kulkarni in Grigg, 2008; Sundell idr., 2011). Koncentracije emisij dušikovih oksidov, ogljikovega oksida in delcev so na splošno najvišje ob cestah, tem sledi urbano ozadje, najnižje pa so na podeželskih postajah. Znano je, da se posamezna mestna območja med seboj najbolje ločujejo glede na dušikove okside in ogljikov oksid, medtem ko so razlike za grobe delce razmeroma majhne. Oke idr. (2017) to pojasnjuje z različnim reakcijskim časom v atmosferi, saj se dušikovi oksidi v mestnem ozračju obdržijo le do nekaj ur, ogljikov oksid pa ima povprečen čas zadrževanja od nekaj tednov do meseca dni. Čeprav so prometne obremenitve v uličnih kanjonih mestnega središča običajno manjše v kot na mestnih vpadnicah na robu mesta ali obvoznici, je prometna zasedenost teh površin visoka.

Koncentracije primarnih onesnaževal so zaradi zmanjšane samočistilne sposobnosti temu primerno večje, navajajo Ogrin idr. (2014). Večino onesnaževal sicer sčasoma iz urbane atmosfere odstranijo naravni procesi, ki so prisotni takoj po njihove-

mu izpustu, to so gravitacijsko usedanje, mokro odlaganje in kemične reakcije ali razpad (Franck idr., 2011; Oke idr., 2017). Ljubljana spada med slabše prevetrjena mesta, saj stalnih močnejših vetrov ni. To povzroča slabše samočistilne sposobnosti zraka. Mesto ima kotlinsko lego z južnoalpskim podnebjem in zmerni kontinentalni značaj. Kotlinska lega v mestu omeji njegove samočistilne sposobnosti z nizko povprečno hitrostjo vetra, ki je v zimskih mesecih nižja od 2,0 m/s, pogosto pa je tudi brezvetrje. Takrat so pogoste talne temperaturne inverzije, debelina mešalne plasti ozračja nad mestom pa znaša med 200 in 300 m (Jernej, 2000). Za širjenje onesnaževal in njihovo koncentracijo v t. i. mestnem ozračju je to še posebej pomembno, saj so takrat mešalne oziroma redčilne sposobnosti atmosfere omejene na spodnji sloj ozračja v višini do 300 m. Pojav inverzije sicer zmanjša korelacijski faktor dejanskega prometa in izmerjenih vrednosti onesnaževal (Oke, 2017), zato je mogoče pričakovati višje korelacijske vrednosti v poletnih mesecih, ko tega pojava ni.

Raziskovalci s Filozofske fakultete (glej Ogrin idr., 2014) so v raziskavah meritev onesnaženega zraka v Ljubljani postavili

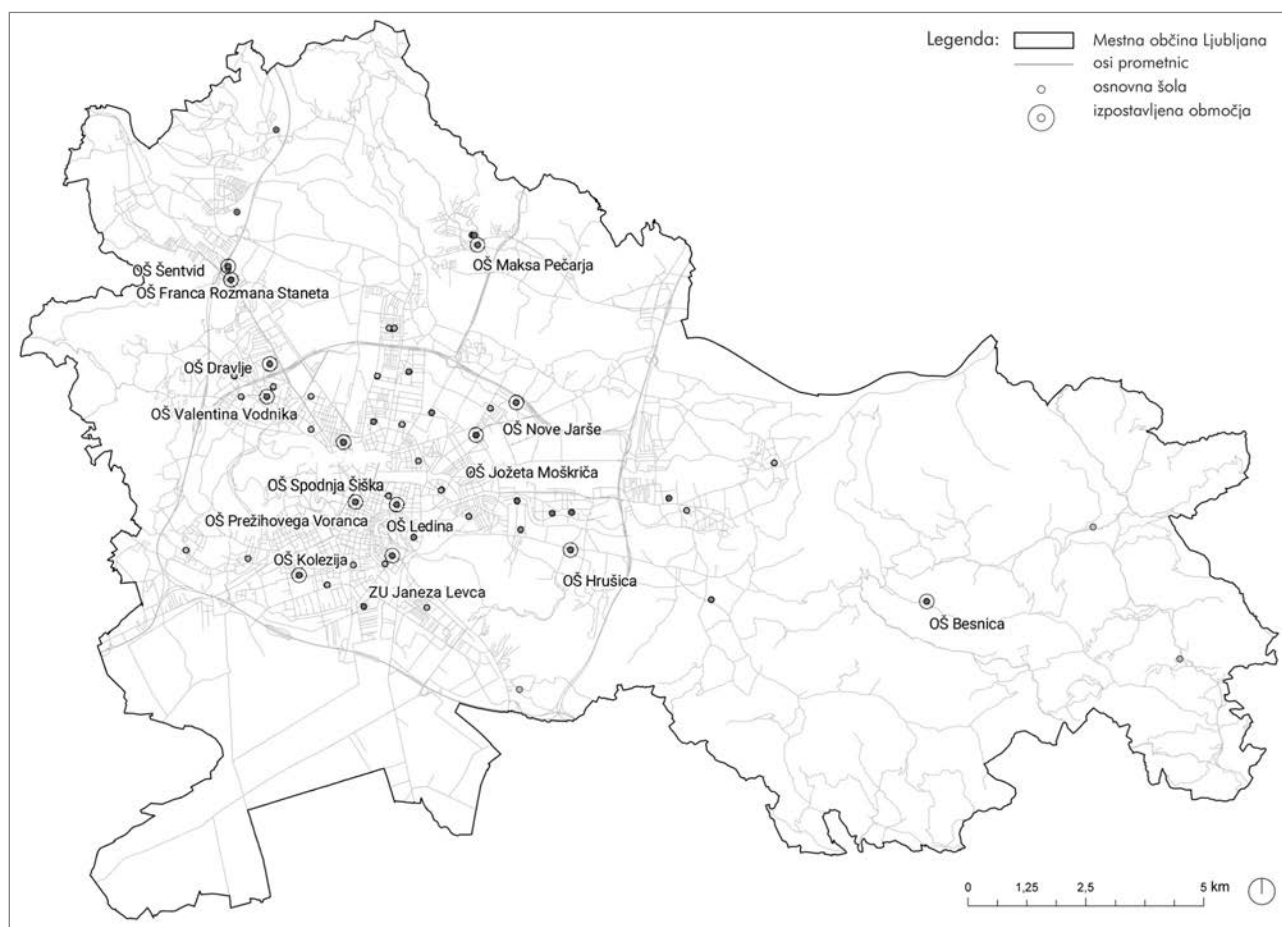


Slika 4: Regresijska analiza meritev onesnaženosti z NO_x (na primeru indikator onesnaženosti ozračja z emisijami prometa) na območju Mestne občine Ljubljana in sloj izpostavljenosti osnovnih šol (vir: Ogrin idr., 2014; GURS, 2021).

gosto mrežo merilnih mest v različnih tipih mestnega prostora. Z uporabo difuzivnih vzorčevalnikov so podobno kot v prejšnjih raziskavah (Ogrin idr., 2006; Ogrin, 2008) ugotavljali kakovosti zraka v mestu z meritvijo dušikovih dioksidov, ozona, žveplovega dioksida in benzena. Merilna mesta so določili glede na tri predhodno opredeljene tipe mestnega prostora in za posebno kategorijo prečnih profilov ob cestah, in sicer urbano ozadje, cestni koridorji in odprti prostor ob cestah.

Območja urbanega ozadja so na primer stanovanjske soseske in mirne stanovanjske četrti z manjšim številom spremljevalnih dejavnosti, parki in vrtički. Vsem je skupen odmik od večjih cest in drugih večjih virov prometnih onesnaževal. Drugi tip mestnega prostora so cestni koridorji, za kar se pojmujejo gosto pozidane mestne površine ob pomembnejših cestah ali vpadnicah z gostim prometom. Za tak tip prostora je značilen gost in upočasnen promet zaradi goste mreže ter velika števila križišč in parkirišč, kjer se promet ustavlja. Pomembna lastnost cestnih koridorjev je zmanjšana samočistilna sposobnost ozračja in tako višje pričakovane koncentracije primarnih onesnaževal. Tretji tip mestnega prostora so odprti prostori ob cestah.

Znova so upoštewane bolj prometne kategorije cest, vendar pa je samočistilna sposobnost boljša, zaradi širšega profila ceste (Ogrin idr., 2014). V teh primerih je onesnaženost odvisna od hitrosti in gostote prometa ter od prečnega profila ceste. MOL je za sprejetje Odloka o načrtu za kakovost zraka leta 2017 izdelala opis območij onesnaženosti, oceno onesnaženja, virov onesnaževanja in vplivov virov onesnaženosti v občini Ljubljana (Uradni list RS, št. 77/17). Na merilnem metu Biotehniške fakultete v Ljubljani, ki ima status mestnega ozadja, so ugotovili, da na koncentracije delcev na lokaciji vplivajo trije glavni viri. Najpomembnejša sta povezava s prometom in sekundarnimi anorganskimi delci, ki nastajajo z oksidacijo in pretvorbo plinastih izpustov (predvsem žveplov dioksid, dušikovi oksidi in amonijak). Vir, ki ga povezujemo s prometom in tudi resuspenzijo, je posledica izpustov iz motorjev in obrabe cestišča, zavor in pnevmatik. Delež tega vira na letni ravni je znašal 42 %, v zimskem času pa 39 % (Uradni list RS, št. 77/17). Emisije delcev iz prometa sicer predstavljajo 24-odstotni delež v skupnih emisijah delcev v Ljubljani in sorazmerno vplivajo na celotno obremenitev mestnega okolja.



Slika 5: Končna razvrstitev izpostavljenosti osnovnih šol emisijam prometa na območju Mestne občine Ljubljana (vir: Ogrin idr., 2014; GURS, 2021).

4 Rezultati in diskusija

Meritve dušikovih oksidov v urbanem ozadju v Ljubljani so pokazale, da viri na potek koncentracij ne vplivajo neposredno, temveč z zamikom. Najvišje koncentracije urbanega ozadja so izmerili na območju mestnega središča Ljubljane z izmerjenimi vrednostmi nad $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, najmanjše vrednosti pa so izmerili v predelih Ljubljane ob večjih zelenih klinih, kot so sta Rožnik in Golovec, z najmanjšo izmerjeno koncentracijo dušikovih oksidov ob Koseškem bajerju (Ogrin idr., 2014). Najnižje letne koncentracije onesnaževal v mestu – od 20 do $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – so poleg Koseškega bajerja sicer ugotovili ob zelenih klinih na Rožniku in na Ljubljanskem gradu. V koridorjih nekaterih zbirnih cest, kot sta Slovenska in Aškerčeva cesta, so namerili od 56 do $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dnevna nihanja koncentracije onesnaževal v urbanem ozadju so bila bistveno manjša kot ob cestah (Ogrin idr., 2014). Od skupaj šestih mest v cestnih koridorjih je le merilno mesto na Kongresnem trgu imelo koncentracijo nižjo od $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Meritve v odprtem prostoru ob cestah so izvajali ob večjih vpadnicah v mestu in razširitvah v cestnem prečnem profilu. Pokazale so visoke vrednosti, vendar

ne tako kot v cestnih koridorjih. Daleč najbolj onesnažen zrak z dušikovim dioksidom so izmerili na nadvozih nad ljubljansko obvoznico. Podobne ugotovitve so razkrili raziskovalci v raziskavi podnebja v Ljubljani (Jernej, 2000). V neposredni bližini cest v Ljubljani so koncentracije dušikovega dioksida z oddaljenostjo od vira hitro padle pod raven $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in se približale vrednostim mestnega ozadja. Najbolj onesnažen pas tako ni presegal 80 m.

Na sliki 4 so prikazani rezultati meritev dušikovih oksidov ob prometnicah, na podlagi katerih je izdelana regresijska analiza. Območje vpliva emisij prometa je ocenjeno v conah do $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, v najvišjih vrednostih ne mestih in v okolici ljubljanske vpadnice, vendar so NO_x uporabljeni kot indikator prometnih emisij. Gozdnata območja so izzeta, saj se obravnava območje poselitve v šolskih okoliših. Iz njih je razvidna jasna ločnica med vrstama mestnega prostora v Ljubljani, ki ju označujejo Ogrin idr. (2014) in Jernej (2000): prostor mestnega ozadja z mirnimi in manj gosto poseljenimi stanovanjskimi območji ter prostor občestnega prostora in cestnih koridorjev. Zaradi merila obravnave najizraziteje izstopa avtocestni obroč z vplivnim območjem med 30 in 150 m.

Na prikazu so označene tudi vse enote osnovnih šol v občini, ki so obarvane glede na pripadajoče vrednosti emisij v preseku. Natančneje so razvrščene na sliki 5, kjer so glede na oceno izpostavljenosti poudarjene te osnovne šole: OŠ Šentvid, OŠ Franca Rozmana Staneta, OŠ, Dravlje, OŠ Spodnja Šiška, OŠ Prežihovega Voranca, OŠ Kolezija, ZU Janeza Levca, OŠ Ledina, OŠ Janeza Moškriča, OŠ Nove Jarše, OŠ Maksa Pečarja, OŠ Hrušica in OŠ Besnica. Treba je omeniti, da v oceni izpostavljenosti (poleg prej omenjenih spremenljivk v uvodnem poglavju) niso bile upoštevane posamezne karakteristike prometnega omrežja, kot je razdelitev poti glede na kategorizacijo cestnih vozil ali ustavljanje in pospeševanje prometa v križiščih, kjer nastajajo večji izpusti.

Pričakovano so najbolj izpostavljene šole, ki so umeščene v bližini avtocest, regionalnih cest in mestnih vpadnic. V nekaterih primerih so bile te zagrajene pozneje ali razširjene v zmogljivejše prometnice v njihovi okolici. Zaradi razvoja mesta in urbanizacije pa so se spremenili že obstoječi šolski okoliši. Podobno kot v ugotovitvah raziskovalcev ostaja problematično mestno središče, zlasti v primeru Osnovne šole Ledina in Prežihovega Voranca ob notranjem mestnem obroču med Bleiweisovo in Roško cesto. Med šolami v bližini avtoceste izstopajo OŠ Dravlje, OŠ Valentina Vodnika, OŠ Šentvid in OŠ Franca Rozmana Staneta. Vsem je skupna lokacija, saj so vse ob večjih priključkih na avtocestni obroč in ob priključku na eno glavnih mestnih vpadnic – Celovško cesto. V manjšem merilu je razvidno, da so prav vse tudi ograjene ter s tem ločene od prometa z nizom visoke zazidave in drevjem, zato se dejanske meritve na terenu verjetno precej razlikujejo. Na karti (slika 4) je razvidno, da je med najbolj izpostavljenimi Center Janeza Levca. V primeru izvedbe nadaljnjih meritev bi zaradi prostorskih razlik predlagali podrobnejše meritve na OŠ Nove Jarše in OŠ Jožeta Moškriča ob Šmartinski cesti, saj je okolica in prostorska umeščenost specifična pri vsaki od naštetih šol.

5 Sklep

V prostorskih analizah prometnih emisij se je izkazalo, da nekatere osnovne šole MOL izkazujejo pomanjkljivosti v svoji prostorski umestitvi glede na tip mestnega prostora in tveganje za morebitno visoko izpostavljenost prometnim onesnažilom. Skupno je takih 16 od 46 enot osnovnih šol. Notranja organizacija prostorov in okolica osnovnih šol sta seveda različni pri vsaki enoti, enako tudi njihove mikroklimatske lastnosti in preostale spremenljivke, ki vplivajo na koncentracijo prometnih onesnaževal v zraku. Rezultat raziskave je groba ocena izpostavljenosti in usmeritve za nadaljnje meritve. Poleg nadaljnjih meritev prometnih onesnaževal na izbranih problematičnih območjih šolskih okolišev je ob morebitni ugotovitvi presejanja mejnih vrednosti na lokacijah mogoče primerno uvesti raznovrstne ukrepe.

Zmanjšanje onesnaženosti se lahko doseže s strožjimi regulacijami virov izpustov, tehnološkimi postopki, nadzorom porabe energetskih virov in izvajanjem sodobne prometne politike. Emisijski ukrepi rešujejo problem pri izvoru, kar je v primeru prometa značilno linijski pojav na prometnicah in ob njih. V bližini navedenih osnovnih šol se prometni režim lahko spremeni tako, da se tam vzpostavi območje umirjenega prometa, zmanjša PLDP ali popolnoma prepove vožnja tovornim in drugim vozilom, ki čezmerno onesnažujejo ozračje. Ukrepi lahko obsegajo ne le zmanjšanje emisij, temveč tudi manjše sanacijske ukrepe, kar lahko imenujemo upravljanje ozračja z nadzorom onesnaževal – pri viru, lokaciji in višini izpustov onesnaževal v ozračje ter z izboljševanjem razprševanja z ustreznimi oblikovalskimi in načrtovalskimi načeli. Prostorsko se lahko ukrepa tako, da se ob šolskem zemljišču in prometnici zasadi zimzeleno drevje v traku (Fink, 2016) in ustrezno sasnira način zračenja osnovne šole (Jutraž idr., 2019; Zbašnik-Senegačnik, 2019). Ukrepi vsebujejo načela urejanja mest, ki so na razpolago v okviru mestnih politik – od načrtovanja skladne in mešane namenske rabe, pravilnega umeščanja in kategorizacije trajnostnega prometnega omrežja do načrtovanja zelenih površin in upoštevanja načel kompaktnega mesta. Med vsemi ukrepi je v mestih najučinkovitejše uravnavanje metabolizma za upravljanje porabe energije in odvečnih emisij. Ta politika se izvaja tako, da se načrtujejo kompaktni deli mest, ki so zasnovani tako, da zagotavljajo udobje in zdravo mikroklimo. V primeru meril za izbor kakovostnega prostora za načrtovanje šol je aplikacija zgoraj omenjenih načel zelo zahtevna, zagotavljanje najčistejšega zraka za vse uporabnike mesta tudi ni izvedljivo. Treba je doseči ravnovesje pri izogibanju umeščanja vzgojno-izobraževalnih zavodov na najbolj onesnažena območja in sočasno ostajati znotraj načrtovalskih okvirov kategorično višjih potreb mesta. Ta načela uravnavajo urbani metabolizem v kompaktnem prostoru mešane rabe in znotraj tega je treba poiskati prostore urbanega ozadja, med katere spadajo tudi osnovne šole.

.....
Kristijan Lavtižar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, Ljubljana
E-pošta: kristijan.lavtizar@fa.uni-lj.si

Viri in literatura

Agencija RS za okolje (2019). *Letno poročilo o kakovosti zraka 2019*. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor.

Britter, R. E., in Hanna, S. R. (2003). Flow and dispersion in urban areas. *Annual review of fluid mechanics*, 35(1), str. 469–496.

Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope III, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., idr. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), str. 2331–2378.

- Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji (2019). *Analiza prometnih obremenitev najbolj obremenjenih AC odsekov*. Dostopno na: https://www.dars.si/Prometne_obremenitve/Analiza_prometnih_obremenitev (sneto 30. 6. 2021).
- Eržen, I., Gajšek, P., Hlastan-Ribič, C., Kukec, A., Poljšak, B., in Zaletel-Kragelj, L. (2010). *Zdravje in okolje: izbrana poglavja*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta.
- Fiala, Z., Vyskocil, A., Krajac, V., Viau, C., Ettlerova, E., Bukac, J., Fialova, D., in Emminger, S. (2001). Environmental exposure of small children to polycyclic aromatic hydrocarbons. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 74, str. 411–420.
- Franck, U., Herbarth, O., Röder, S., Schlink, U., Borte, M., Diez, U., idr. (2011). Respiratory effects of indoor particles in young children are size dependent. *Science of the Total Environment*, 409(9), str. 1621–1631.
- Geodetska uprava Republike Slovenije (2021). *Prostorski podatki GIS*. Dostopno na: <https://egp.gu.gov.si/egp> (sneto 5. 5. 2021).
- Han, X., Aguilar-Villalobos, M., Allen, J., Carlton, C. S., Robinson, R., Bayer, C., in Naeher, L. P. (2005). Traffic-related occupational exposures to PM_{2.5}, CO, and VOCs in Trujillo, Peru. *International Journal of Occupational and Environmental Health*. str. 11(3), str. 276–288.
- Jernej, S. (2000). *Analiza klime Ljubljana*. Doktorska disertacija. Gradec, Univerza v Gradcu, Institut für Geographie der Karl Franzens.
- Ji, W., in Zhao, B. (2015). Estimating mortality derived from indoor exposure to particles of outdoor origin. *PLoS One*, 10(4), str. e0124238.
- Jutraž, A., Kukec, A., in Uršič, S. (2019). *Zdrav zrak, zdravi otroci – kakovost notranjega zraka v osnovnih šolah – priročnik projekta InAirQ: Priročnik za izobraževanje učencev in učiteljev osnovnih šol*. Ljubljana, NIJZ.
- Khan, J., Ketzler, M., Kakosimos, K., Sørensen, M., in Jensen, S. S. (2018). Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques. *Science of the Total Environment*, 634, str. 661–676.
- Kholod, N., Evans, M., Gusev, E., Yu, S., Malyshev, V., Tretyakova, S., in Barinov, A. (2016). A methodology for calculating transport emissions in cities with limited traffic data: Case study of diesel particulates and black carbon emissions in Murmansk. *Science of the Total Environment*, 547, str. 305–313.
- Kulkarni, N., in Grigg, J. (2008). Effect of air pollution on children. *Paediatrics and Child Health*, 18(5), str. 238–243.
- Lavtižar, K. (2019). Fundamentals of natural ventilation in buildings. *Igra ustvarjalnosti (IU)/creativity game (CG) – Theory and Practice of Spatial Planning*, 8, str. 12–33.
- Lavtižar, K. (2020). Urban design embracing the wind environment: Bezigrad neighbourhood case study in Ljubljana, Slovenia. *Research in Ecology*, 2(2), str. 23–31.
- Levy, M., Koeppen, B., in Stanton, B., (1998). *Berne and Levy principles of physiology*. St. Louis, Mosby Publishers.
- Llaguno-Munitxa, M., Bou-Zeid, E., in Hultmark, M. (2017). The influence of building geometry on street canyon air flow: Validation of large eddy simulations against wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 165, str. 115–130.
- Mestna občina Ljubljana (2014). *Končno poročilo: Novelacija karte hrupa za Mestno občino Ljubljana*. Ljubljana, Join Venture.
- Mestna občina Ljubljana (2017). *Celostna prometna strategija 2017*. Dostopno na: <https://www.ljubljana.si/sl/moja-ljubljana/promet-in-mobilnost/celostna-prometna-strategija> (sneto 29. 8. 2021).
- Mestna občina Ljubljana (2021). *Portal vzgoje in izobraževanja*. Dostopno na: https://gismol.gisportal.si/javno/profile.aspx?id=MOL_Solstvo@Ljubljana (sneto 5. 5. 2021).
- Ntziachristos, L., in Samaras, Z. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories*. European Environment Agency.
- Odlok o načrtu za kakovost zraka na območju Mestne občine Ljubljana*. Uradni list RS, št. 77/17. Ljubljana.
- Ogrin, D., Ogrin, M., Čemas, D., in Planinšek, A., (2006). *Prometno onesnaževanje ozračja v Ljubljani znotraj avtocestnega obroča*. Končno poročilo raziskovalnega projekta. Ljubljana, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo.
- Ogrin, M. (2008). *Prometno onesnaževanje ozračja z dušikovim dioksidom v Ljubljani*. GeograFF 1. Ljubljana, Znanstvena založba Filozofske fakultete, Oddelek za geografijo.
- Ogrin, D. (2010). Physical-geographical factors relevant for the development of Ljubljana. V: Krevs, M., Djordjević, D., in Pichler-Milanović, N. (ur): *Challenges of spatial development of Ljubljana and Belgrade*, str. 27–36. GeograFF 8. Ljubljana, Znanstvena založba Filozofske fakultete, Oddelek za geografijo.
- Ogrin, M., Vintar Mally, K., Planinšek, A., Močnik, G., Drinovec, L., Gregorič, A., in Iskra, I. (2014). *Onesnaženost zraka v Ljubljani*. Ljubljana, Znanstvena založba Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., in Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Selgrade, M. K., Plopper, C. G., Gilmour, M. I., Conolly, R. B., in Foos, B. S. (2007). Assessing the health effects and risks associated with children's inhalation exposures – asthma and allergy. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 71(3), str. 196–207.
- Sengupta, S., in Plumer, B. (2020). How cities are trying to avert gridlock after coronavirus lockdowns. *The New York Times*. Dostopno na: <https://www.nytimes.com/2020/06/26/climate/cities-cars-traffic-congestion.html> (sneto 15. 4. 2021).
- Singh, J., Levin, H., Nazaroff, W. W., Cain, W. S., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., idr. (2011). Ventilation rates and health: Multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor Air*, 21(3), str. 191–204.
- Singh, V., Sahu, S. K., Kesarkar, A. P., in Biswal, A. (2018). Estimation of high resolution emissions from road transport sector in a megacity Delhi. *Urban Climate*, 26, str. 109–120.
- Smith, K. R., Samet, J. M., Romieu, I., in Bruce, N. (2000). Indoor air pollution in developing countries and acute lower respiratory infections in children. *Thorax*, 55(6), str. 518–532.
- Stranger, M., Potgieter-Vermaak, S. S., in Van Grieken, R. (2008). Characterization of indoor air quality in primary schools in Antwerp, Belgium. *Indoor Air*, 18(6), str. 454–463.
- Svetovna zdravstvena organizacija (2018). *More than 90% of the world's children breathe toxic air every day*. Ženeva.
- Tayarani, M., in Rowangould, G. (2020). Estimating exposure to fine particulate matter emissions from vehicle traffic: Exposure misclassification and daily activity patterns in a large, sprawling region. *Environmental Research*, 182, str. 108999.
- Zaletel, K. L., Eržen, I., in Kukec, A. (2016). *Metode javnega zdravja. študijsko gradivo za EMŠ medicina*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta, Katedra za javno zdravje
- Zbašnik-Senegačnik, M. (2019). *Pogledi na prostor javnih vrtcev in osnovnih šol*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo.