

UDK 629.056.8:543.26:546.17
Pregledni znanstveni članak / Review

Analiza prostornih podataka za praćenje kvalitete zraka

Marina KUKAVICA, Mateo GAŠPAROVIĆ, Mladen ZRINJSKI – Zagreb¹

SAŽETAK. Ovaj rad daje pregled praćenja kvalitete zraka, naglašavajući koliko je precizno i kontinuirano praćenje ključno za zaštitu ljudskog zdravlja u suvremenom svijetu, gdje su posljedice zagađenja zraka ozbiljan javnozdravstveni izazov. Posebna pažnja posvećena je dušikovom dioksidu (NO_2), jednom od najvažnijih pokazatelja urbanog onečišćenja zraka. Analiza se temelji na podacima prizemnih koncentracija NO_2 , kao i atmosferskih koncentracija NO_2 dobivenih satelitskim mjerenjima, uz dodatnu analizu meteoroloških, atmosferskih i geomorfoloških podataka kako bi se istražila prostorna i vremenska varijabilnost NO_2 na području Zagreba. Rezultati pokazuju da satelitske metode značajno nadopunjuju ograničena točkasta mjerenja i omogućuju detaljnije razumijevanje i praćenje zagađenja, dok istovremeno ukazuju na složenost odnosa između NO_2 , meteoroloških uvjeta i urbanih čimbenika. Rad također naglašava potrebu za naprednim modelima u svrhu preciznije procjene i praćenja kvalitete zraka.

Ključne riječi: kvaliteta zraka, dušikov dioksid, prostorna analiza, Sentinel-5P, TROPOMI, javno zdravlje.

1. Uvod

Kvaliteta zraka jedan je od ključnih faktora koji izravno utječe na zdravlje ljudi, ekosustave i klimu. Zbog toga je praćenje i analiza podataka o kvaliteti zraka postalo nužno za razumijevanje stanja okoliša, planiranje javnog zdravlja i poduzimanje odgovarajućih mjera zaštite. U današnjem društvu, uz razvoj tehnologije i napredak u metodama prikupljanja podataka, dostupno je sve više alata za prikupljanje i analizu podataka o kvaliteti zraka.

¹ Marina Kukavica, mag. ing. geod. et geoinf., EKONERG – Institut za energetiku i zaštitu okoliša, Koranska 5, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: marina.kukavica@ekonerg.hr
izv. prof. dr. sc. Mateo Gašparović, Sveučilište u Zagrebu Geodetski fakultet, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mateo.gasparovic@geof.unizg.hr
prof. dr. sc. Mladen Zrinjski, Sveučilište u Zagrebu Geodetski fakultet, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mladen.zrinjski@geof.unizg.hr

Ovaj rad usmjeren je na analizu prostornih podataka koji se koriste za praćenje kvalitete zraka, s naglaskom na javno dostupne podatke prikupljene putem terenskih mjernih stanica, kao i na podatke prikupljenih metodama daljinskih istraživanja. U radu će biti analizirani podaci dostupni preko Copernicus servisa prikupljeni od strane satelita poput *Sentinel-5P* te podaci s meteoroloških i klimatskih modela kao što su *ERA5* i *CAMS* (engl. *Copernicus Atmosphere Monitoring Service*). Ovi izvori podataka omogućuju preciznu, prostorno-vremensku analizu sastava atmosfere, omogućujući praćenje koncentracija zagađivača poput dušikovog dioksida (NO_2), ozona (O_3) i čestica $\text{PM}_{2,5}$ na globalnoj razini.

Kombiniranjem podataka s različitih izvora, od mjernih stanica na tlu do satelitskih i modelskih podataka, moguće je stvoriti holistički pregled kvalitete zraka u realnom vremenu i predvidjeti njegovu dinamiku. Osim toga, integracija omogućava bolje razumijevanje varijacija u kvaliteti zraka, identificiranje potencijalnih izvora zagađenja te donošenje učinkovitijih odluka za smanjenje negativnog utjecaja na zdravlje i okoliš.

Kako bi se najbolje analizirala kvaliteta zraka na nekom području koristi se mreža terenskih mjernih stanica. Bralić i dr. (2012) proveli su istraživanje u kojem su predstavljene prva znanstvena mjerenja mjesečnih i sezonskih varijacija NO_2 , SO_2 i crnog dima u dijelu urbane zone grada Splita koja obuhvaća sportske i rekreacijske zone. Autori su analizirali podatke terenski prikupljene tijekom 2007. godine. Prosječne sezonske vrijednosti koncentracije onečišćujuće tvari NO_2 kretale su se u rasponu od 48,24 do 56,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dok je godišnji prosjek bio 50,37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, što je iznad zakonski dopuštenih vrijednosti u Hrvatskoj. Najviše koncentracije NO_2 zabilježene su tijekom hladnih i suhih zimskih dana, što se pripisuje povećanom izgaranju fosilnih goriva. Rad također analizira utjecaj sezonalnosti, pri čemu je utvrđeno da koncentracije onečišćujuće tvari SO_2 više varirale, od koncentracija NO_2 , te su ljeti bile veće zbog visokih temperatura i suše. Doprinos rada je u detaljnoj sezonskoj i mjesečnoj analizi urbanog onečišćenja te isticanju važnosti kontinuiranog monitoringa za javno zdravlje.

Nadalje, Pintarić i dr. (2016) analizirali su utjecaj koncentracija onečišćujuće tvari NO_2 , O_3 i meteoroloških uvjeta mjerenih mrežom državnih stanica za kontinuirano praćenje kvalitete zraka na broj hitnih bolničkih prijema zbog kardiovaskularnih bolesti u Zagrebu tijekom razdoblja 2008. – 2010. godine. Istraživanje je obuhvatilo je više od 20 000 pacijenata, a rezultati su pokazali da povećanje koncentracije NO_2 , čak i ispod zakonskih pragova, značajno korelira s povećanjem broja hitnih prijema. Najveći broj prijema zabilježen je zimi, a regresijskom analizom potvrđeno je da povećanje NO_2 i sniženje temperature zraka vode do većeg broja kardiovaskularnih poteškoća. Ovaj rad naglašava važnost praćenja NO_2 radi javnog zdravlja i doprinosi razumijevanju veza između kvalitete zraka i zdravstvenih ishoda u urbanim sredinama.

Petrinoli i dr. (2004) razvijaju metodološki pristup koji osim podataka terenskih mjerenja NO_2 , analizira i podatke o koncentracijama onečišćujuće tvari NO_2 dobivene satelitskim opažanjem na području talijanske doline rijeke Po. Istraživanje je pokazalo da satelitska mjerenja mogu pouzdano detektirati prostorne obrasce i žarišta NO_2 , ali je nužna validacija i korekcija podacima sa

Zemljine površine zbog ograničenja prostorne i vremenske rezolucije. Također, znanstveni doprinos ovog rada je u potvrđivanju mogućnosti korištenja podataka satelitskih opažanja za regionalno praćenje NO_2 , kao i razvoju metoda za integraciju različitih izvora podataka. Nadalje, Chan i dr. (2023) zaključuju da su podaci GOME-2 satelita visokopouzdana za praćenje koncentracije NO_2 nad europskim kontinentom.

Kako bi se poboljšali podaci opažanja koncentracija onečišćujućih tvari u atmosferi sa satelita konstantno se radi na unapređenju procesa analize i obrade snimljenih podataka. Liu i dr. (2019) opisuju poboljšani algoritam za određivanje ukupnih i troposferskih kolona NO_2 iz GOME-2 podataka. Algoritam koristi DOAS metodu za izračun kolona, separaciju stratosferske i troposferske komponente te preračunavanje u vertikalne kolone. Liu i dr. (2021a) predstavljaju poboljšani algoritam za određivanje troposferskih kolona NO_2 iz TROPOMI mjerenja nad Europom. Algoritam uključuje naprednu separaciju stratosferske i troposferske komponente te korištenje regionalnog kemijskog modela (POLYPHEMUS/DLR) za apriori profile. Validacija s MAX-DOAS mjernim postajama u Europi pokazuje dobru korelaciju, a nova verzija algoritma značajno smanjuje razliku između satelitskih i prizemnih mjerenja NO_2 .

Pomoću satelitskih opažanja koncentracije onečišćujućih tvari u zraku analizirane su anomalije koje su se dogodile za vrijeme *lockdowna* i smanjenog obujma poslovanja prouzročeno COVID-19 pandemijom. Liu i dr. (2021b) analiziraju promjene koncentracije NO_2 nad Europom tijekom COVID-19 *lockdowna* koristeći GOME-2 i TROPOMI podatke. Rezultati pokazuju značajan pad koncentracija NO_2 u urbanim i industrijskim područjima, što se jasno vidi u satelitskim vremenskim nizovima.

Pomoću metoda strojnog učenja i odabira optimalnih ulaznih parametara modela mogu se kartirati koncentracije NO_2 . Metode strojnog učenja pronalaze prirodne uzorke i poveznice u podacima te na temelju toga stječu uvid, odlučuju i predviđaju. Primjenjuju se već svakodnevno za donošenje bitnih odluka u medicinskoj dijagnostici, trgovanju i mešetarenju dionicama, predviđanju potrošnje energije, analizi snimaka, računalnom vidu, itd. Strojno učenje aproksimira funkciju koja predstavlja odnose između ulaznih i izlaznih podataka linearnom i nelinearnom regresijom (Bolf 2021).

Li i dr. (2022) razvili su model koristeći Random Forest metodu strojnog učenja za procjenu i predviđanje koncentracije prizemnog NO_2 za područje Kine te su pri tome za modeliranje koristili podatke terenskih stanica za mjerenje koncentracije NO_2 , podatke o koncentraciji NO_2 iz Sentinel-5P satelita, meteorološke podatke poput temperature, vlažnosti, smjeru vjetera, sloj visina atmosferskih granica te NDVI spektralni radiometrijski indeks.

Kim i dr. (2021) modelirali su prizemne koncentracije NO_2 na području Alpa koristeći metodu strojnog učenja Extreme gradient-boosted tree ensemble. Za treniranje modela koristili su podatke satelitskog opažanja Sentinel-5P o koncentracijama NO_2 , podatke o korištenju zemljišta (Copernicus CLC proizvod), podatke digitalnog modela visina (Copernicusov EU-DEM) te meteorološke podatke ECMWF servisa. Chan i dr. (2023) procjenjivali su koncentraciju prizemnog NO_2 pomoću modela neuronskih mreža te su za treniranje modela koristili podatke o prizemnim koncentracijama NO_2 na području Njemačke, o koncen-

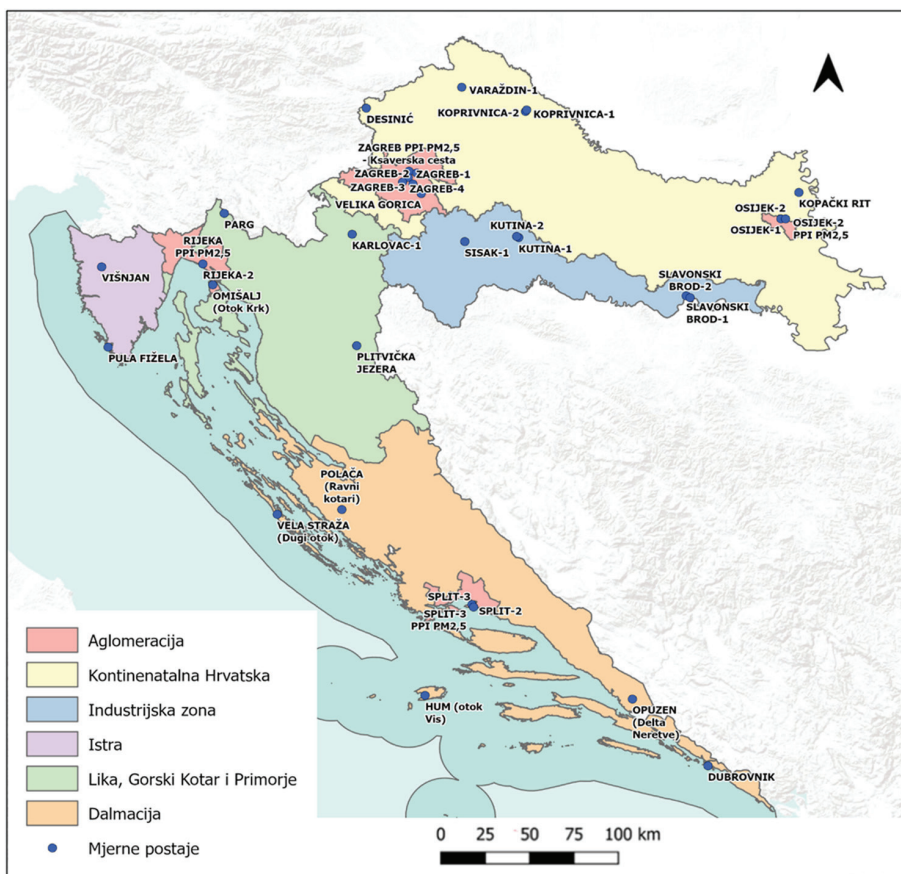
tracijama NO₂ dobivenih iz Sentinel-5P opažanja, meteoroloških podataka EC-MWF servisa, podataka o visinama terena te podacima o stanovništvu.

Kroz ovaj rad, analizirat ćemo različite tehnologije prikupljanja podataka, uključujući tradicionalne mjerne stanice i moderne metode daljinskog istraživanja, koje mogu pomoći u razumijevanju i praćenju kvalitete zraka, s posebnim fokusom na prostornu analizu.

2. Praćenje kvalitete zraka na nacionalnoj razini

U Republici Hrvatskoj sustav praćenja kvalitete zraka provodi Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ), koji je odgovoran za nacionalnu procjenu kvalitete zraka sukladno zakonodavstvu Europske unije i domaćim propisima. Sustav je organiziran kroz mrežu automatskih i ručnih mjernih postaja, koje su podijeljene u dvije osnovne kategorije:

- Državna mreža (slika 1) obuhvaća postaje koje su dio sustava praćenja definiranog zakonom i koje ispunjavaju obveze izvještavanja prema EU. Ovom mrežom upravlja DHMZ i njome se osigurava reprezentativno praćenje zraka na nacionalnoj razini. Podaci iz ove mreže koriste se za procjenu onečišćenja u cijeloj državi, za međunarodne obveze i znanstvena istraživanja.
- Lokalne mreže organiziraju i financiraju jedinice lokalne i područne (regionalne) samouprave. Njihov je cilj praćenje specifičnih izvora onečišćenja u urbanim i industrijskim područjima, kao i pružanje podrške lokalnim planovima zaštite okoliša. Ove mreže mogu koristiti istu vrstu opreme kao i državna mreža, ali su češće usmjerene na problematična područja u gradovima i oko industrijskih pogona.



Slika 1. Prikaz stanica državne mreže za praćenje kvalitete zraka (URL 1).

Procjena kvalitete zraka obuhvaća mjerenje koncentracija niza štetnih tvari, uključujući:

- lebdeće čestice (PM_{10} i $PM_{2,5}$),
- ugljični monoksid (CO),
- sumporov dioksid (SO_2),
- ozon (O_3),
- dušikov dioksid (NO_2) i dušikove okside (NO_x),
- benzen (C_6H_6),
- teške metale poput olova (Pb), kadmija (Cd), žive (Hg), arsena (As) i nikla (Ni),
- kao i benzo(a)piren, policiklički aromatski ugljikovodik.

Mjerenja se provode kontinuirano, te se koncentracije onečišćujućih tvari bilježe svakih sat vremena, što omogućuje detaljno praćenje promjena u kvaliteti

zraka u stvarnom vremenu. Vrijednosti masene koncentracije onečišćujućih tvari dobivene mjerenjem (C_m) i pri izmjerenom volumnom udjelu kisika (V_m), preračunavaju se na masenu koncentraciju (C_z) za propisani volumni udio kisika (V_z) za određeni nepokretni izvor prema izrazu (Narodne novine 2007):

$$C_z = \frac{21 - V_z}{21 - V_m} C_m, \quad (1)$$

gdje su:

C_z – masena koncentracija s obzirom na volumni udio određujućeg kisika (V_z),

C_m – izmjerena masena koncentracija pri izmjerenom volumnom udjelu kisika (V_m),

V_m – izmjereni volumni udio kisika u % volumena suhog otpadnog plina,

V_z – volumni udio određujućeg kisika u % za određeni nepokretni izvor.

Mreža mjernih postaja usklađena je sa zakonodavstvom Europske unije, posebno s Direktivom 2008/50/EK o kvaliteti okolnog zraka i čistijem zraku za Europu iz 2008. godine, Direktivom o teškim metalima i policikličkim aromatskim ugljikovodicima u zraku iz 2004. godine (2004/107/EK) te Direktivom Komisije (EU) 2015/1480 iz 2015. godine o izmjeni određenih priloga Direktivama 2004/107/EK i 2008/50/EK Europskog parlamenta i Vijeća o utvrđivanju pravila za referentne metode, validaciju podataka i lokaciju točaka uzorkovanja za ocjenjivanje kvalitete zraka. Ova regulative definiraju pragove kvalitete zraka koje države članice moraju pratiti i poštovati, a podaci iz mreže koriste se za izradu izvješća, planova poboljšanja kvalitete zraka, kao i za informiranje javnosti. Europski indeks kvalitete zraka pruža građanima uvid u trenutnu razinu onečišćenja zraka jer se temelji na koncentracijama onečišćujućih tvari mjerenih na terenu. Propisane su kratkoročne (satne i dnevne), tako i dugoročne (godišnje) granične vrijednosti za kvalitetu zraka. Ovaj indeks obrađuje podatke o pet glavnih zagađivača: lebdećim česticama (PM_{10} i $PM_{2,5}$), prizemnom ozonu (O_3), dušikovom dioksidu (NO_2) i sumpornom dioksidu (SO_2) te su razine indeksa određene najvišom izmjerenom koncentracijom (tablica 1).

Tablica 1. Prikaz razina indeksa po onečišćujućim tvarima (URL 1).

Onečišćujuća tvar	Razina indeksa (na osnovi koncentracija u $\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
	Dobro	Prihvatljivo	Umjereno	Loše	Vrlo loše	Izuzetno loše
Lebdeće čestice manje od $2,5 \mu\text{g}$ ($PM_{2,5}$)	0 – 10	10 – 20	20 – 25	25 – 50	50 – 75	75 – 800
Lebdeće čestice manje od $10 \mu\text{g}$ (PM_{10})	0 – 20	20 – 40	40 – 50	50 – 100	100 – 150	150 – 1200
Dušikov dioksid (NO_2)	0 – 40	40 – 90	90 – 120	120 – 230	230 – 340	340 – 10 000
Prizemni ozon (O_3)	0 – 50	50 – 100	100 – 130	130 – 240	240 – 380	380 – 800
Sumporov dioksid (SO_2)	0 – 100	100 – 200	200 – 350	350 – 500	500 – 750	750 – 1250

3. Praćenje kvalitete zraka na regionalnoj i globalnoj razini

U posljednjim desetljećima satelitsko praćenje postalo je jedan od ključnih alata za proučavanje atmosferskih procesa i praćenje kvalitete zraka na regionalnoj i globalnoj razini. Dok su prizemne postaje i dalje nezamjenjive za lokalna i visokoprecizna mjerenja koncentracija zagađivača, njihov prostorni domet i gustoća su ograničeni. Nasuprot tome, satelitske tehnologije omogućuju sustavno, dugoročno i globalno pokrivanje, čime se nadopunjuju prizemna mjerenja te omogućuje bolje razumijevanje dinamike atmosferskih onečišćenja.

Satelitski instrumenti za praćenje atmosfere uglavnom se oslanjaju na spektroskopske metode, najčešće ultraljubičasto, vidljivo i infracrveno područje elektromagnetskog spektra. Mjerenja se temelje na apsorpciji i raspršenju sunčeva zračenja u atmosferi (engl. *Differential Optical Absorption Spectroscopy*, *DOAS*), kojom se detektiraju koncentracije različitih plinova i aerosola na temelju njihovih specifičnih spektralnih obilježja.

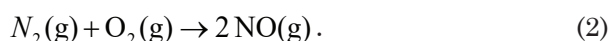
Ključni satelitski instrumenti za praćenje kvalitete zraka na globalnoj razini i njihove karakteristike dani su u tablici 2.

Tablica 2. *Prikaz mjernih satelitskih instrumenata kvalitete zraka te njihovih karakteristika (Bovensmann i dr. 1999, Bracher i dr. 2005, Martin 2008, Bucsela i dr. 2013, Hooloway i dr. 2021).*

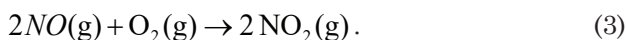
Instrument	Misija	Glavni parametri	Rezolucija	Vrsta mjerenja	Razdoblje rada
Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography SCIAMACHY	Envisat	Ozon, dušični oksidi (NO_2), sumporni dioksid (SO_2), ozonski prekursori, aerosoli	30 km (horizontalno)	Spektroskopija u UV-VIS-NIR dijelu spektra	2002 – 2012
Ozone Monitoring Instrument OMI	Aura (NASA)	Ozon, dušični oksidi (NO_2), ugljični monoksid (CO), sumporni dioksid (SO_2), metan (CH_4)	13x24 km	Spektroskopija u UV-VIS dijelu spektra	2004 –
Global Ozone Monitoring Experiment GOME-2	ERS-2 (ESA)	Ozon, dušični oksidi (NO_2), sumporni dioksid (SO_2), klor, metan (CH_4)	40 km (horizontalno)	Spektroskopija u UV-VIS dijelu spektra	1995 – 2011
Tropospheric Monitoring Instrument TROPOMI	Sentinel-5 Precursor	Ozon, dušični oksidi (NO_2), ugljični monoksid (CO), metan (CH_4), amonijak (NH_3), aerosoli	7 km (horizontalno)	Spektroskopija u UV-VIS-NIR dijelu spektra	2017 –

4. Kvaliteta zraka iskazana dušikovim dioksidom NO₂

Dušikov dioksid (NO₂) jedan je od ključnih atmosferskih zagađivača koji ima značajnu ulogu u urbanoj kvaliteti zraka i predstavlja ozbiljnu prijetnju ljudskom zdravlju. NO₂ pripada skupini dušikovitih oksida (NO_x), koji se u atmosferu ispuštaju primarno kao posljedica visokotemperaturnih izgaranja fosilnih goriva u motorima s unutarnjim izgaranjem, industrijskim postrojenjima i termoelektranama. NO₂ se može izravno emitirati ili sekundarno nastajati u atmosferi iz dušikovog monoksida (NO) oksidacijom uz prisustvo ozona (O₃). Osnovna reakcija za stvaranje NO₂ u atmosferi dana je jednadžbom (Crutzen 1979):



NO (dušikov oksid) tada može reagirati s dodatnim kisikom (O₂) u atmosferi kako bi se formirao NO₂:



Koncentracija NO₂ u atmosferi izrazito je promjenjiva u vremenu i prostoru te ovisi o nizu faktora, uključujući intenzitet emisijskih izvora, ali i meteorološke i topografske uvjete. Temperatura ima važnu ulogu u fotokemijskim reakcijama u kojima NO se oksidira u NO₂, osobito tijekom sunčanih i toplih dana kada je fotokemijska aktivnost pojačana. Istodobno, visoke temperature u urbanim sredinama često potiču formiranje tzv. urbanih toplinskih otoka, što dodatno mijenja lokalnu dinamiku zraka i pridonosi zadržavanju zagađivača. Tijekom ljetnih mjeseci, jače zagrijavanje tla i površina doprinosi stvaranju konveksijskih strujanja, ali istovremeno može povećati fotokemijsku aktivnost, što utječe na transformaciju dušikovitih oksida i stvaranje prizemnog ozona. S druge strane, temperaturne inverzije, koje se češće javljaju tijekom hladnijih zimskih mjeseci, mogu spriječiti vertikalno miješanje zraka, uzrokujući nakupljanje NO₂ u prizemnim slojevima atmosfere. Atmosferski tlak i stabilnost zraka dodatno utječu na zadržavanje i razgradnju NO₂, pri čemu stabilna atmosfera pogoduje stagnaciji onečišćenja, dok nestabilni uvjeti omogućuju njegovu disperziju. Padaline djeluju kao prirodni pročistač atmosfere, gdje tijekom kiše dolazi do ispiranja topljivih plinova i lebdećih čestica, uključujući i dušikove spojeve. Međutim, NO₂ ima ograničenu topljivost u vodi, pa ovaj mehanizam ima slabiji učinak.

Brzina i smjer vjetra su ključni za horizontalnu disperziju NO₂. U uvjetima slabe cirkulacije zraka, osobito u urbanim kotlinskim područjima, može doći do lokalno povišenih koncentracija. Naprotiv, snažni vjetrovi brzo raznose zagađivače i smanjuju njihovu koncentraciju, ali istodobno mogu transportirati zagađenje u udaljenije regije. Smjer i brzina vjetra se određuju pomoću u i v komponenti vjetra. Brzina vjetra računa se prema izrazu (Stieren i dr. 2021, URL 2):

$$ws = u^2 + v^2, \quad (4)$$

gdje su:

u : komponenta vjetra (vektorska veličina) s obzirom na os- x ,

v : komponenta vjetra (vektorska veličina) s obzirom na os- y .

Smjer vjetra računa se prema izrazu (Žabić 2022):

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v}{u}. \quad (5)$$

Smjer vjetra potrebno je preračunati na navigacijski koordinatni sustav pri čemu se kut mjeri u smjeru kretanja kazaljke na satu u odnosu na y -os, odnosno sjeverno, prema izrazu (Grange 2014):

$$\theta_n = -\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) + 90. \quad (6)$$

Pritom reljef ima značajan utjecaj jer u dolinama i kotlinama dolazi do zadržavanja hladnog zraka i nakupljanja zagađenja, dok otvoreni i viši tereni omogućuju bolju ventilaciju atmosfere. Važan meteorološki parametar u tom kontekstu je i visina graničnog sloja atmosfere (engl. *Boundary Layer Height*, *BLH*), koji označava visinu sloja zraka neposredno iznad tla u kojem dolazi do miješanja i razmjene mase i energije s površinom. BLH varira tijekom dana i noći, ovisno o insolaciji, stabilnosti zraka i lokalnim uvjetima. Tijekom dana, zbog zagrijavanja tla, granični sloj se širi i omogućuje razrjeđivanje zagađivača, dok noću, kada se površina hladi, dolazi do stvaranja plitkog sloja u kojem se zagađenje nakuplja. Niske vrijednosti graničnog sloja često su povezane s povišenim koncentracijama NO_2 i ostalih zagađivača jer se one zadržavaju unutar ograničenog volumena zraka pri tlu (Gao i dr. 2025).

NO_2 je usko povezan s pojavom lebdećih čestica (PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$) i ukupnim aerosolnim opterećenjem. Ova veza proizlazi iz činjenice da NO_2 može sudjelovati u sekundarnoj formaciji čestica putem reakcija s amonijakom, sumpornim dioksidom i organskim spojevima, posebno u uvjetima visoke vlažnosti i niskih temperatura. Visoke koncentracije aerosola dodatno pogoršavaju kvalitetu zraka jer djeluju kao medij za kemijske reakcije, ali i zbog učinka na radijativne karakteristike atmosfere, što opet povratno utječe na meteorološke uvjete.

Urbane prometnice predstavljaju dominantan izvor NO_2 u većini gradova. Emisije iz vozila, osobito dizelskih motora, glavni su uzrok povišenih razina NO_2 uz cestovne koridore. Prometnice u uskim urbanim kanjonima dodatno otežavaju cirkulaciju zraka i stvaraju lokalizirane otoke onečišćenja.

NO_2 je visokoreaktivan plin koji, pri kroničnoj izloženosti, može izazvati niz respiratornih problema, osobito kod djece, starijih osoba i osoba s postojećim bolestima dišnog sustava. Kratkotrajna izloženost može izazvati iritaciju

sluznice nosa i grla, smanjenu plućnu funkciju te povećati osjetljivost na respiratorne infekcije (Holloway i dr. 2021). Dugoročno, izloženost NO_2 povezuje se s razvojem astme, bronhitisa i kronične opstruktivne plućne bolesti, a brojne epidemiološke studije potvrđuju i povezanost s povećanom smrtnošću u urbanim sredinama (Weinmayr i dr. 2010, Hamra i dr. 2015, Harari i dr. 2020, Shahriyari i dr. 2022).

Zbog svih navedenih čimbenika, praćenje koncentracije NO_2 predstavlja ključni indikator kvalitete zraka, zdravlja okoliša i živih bića koji borave u istom. Integracija satelitskih, meteoroloških i topografskih podataka u analizu omogućuje cjelovit pristup razumijevanju prostorne dinamike ovog zagađivača, čime se otvaraju mogućnosti za učinkovitije upravljanje zrakom, urbanim planiranjem i javnozdravstvenim politikama.

5. Dodatni prostorni podaci povezani s kvalitetom zraka

Prostorni podaci koji omogućuju analizu utjecaja meteoroloških i geografskih čimbenika na onečišćenje zraka danas su javno široko dostupni putem programa *Copernicus*, europskog sustava za promatranje Zemlje. Među najrelevantnijim izvorima podataka su podaci koje vodi Europski centar za srednjoročne vremenske prognoze (engl. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF*), a odnose se na petu generaciju atmosferske reanalize globalne klime (engl. *ECMWF ReAnalysis version 5, ERA5*) i Copernicusov sustav za praćenje atmosfere (engl. *Copernicus Atmosphere Monitoring Service, CAMS*), koji omogućuju detaljno vremensko i prostorno modeliranje atmosferskih uvjeta i sastava zraka. *ERA5*, pruža visokorezolucijske reanalize vremenskih podataka u globalnom i regionalnom opsegu, uključujući ključne varijable poput temperature zraka, tlaka, količine padalina, vlažnosti, brzine i smjera vjetera, kao i parametara površine poput albeda i zračenja. Podaci su dostupni u satnim intervalima i prostornoj rezoluciji od oko 30 km, što omogućuje preciznu rekonstrukciju atmosferskih uvjeta u gotovo realnom vremenu te analizu dugoročnih trendova. *CAMS* predstavlja ključnu komponentu za razumijevanje kvalitete zraka i distribucije atmosferskih sastojaka te osigurava podatke o koncentracijama lebdećih čestica (PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$), ozona (O_3), dušikovih i sumpornih spojeva (NO_2 , SO_2), ugljikova monoksida (CO) te ukupnih aerosola. *CAMS* podaci temelje se na kombinaciji satelitskih opažanja i numeričkih modela atmosfere, što omogućuje visok stupanj pouzdanosti i prostornu pokrivenost te su dostupni za preuzimanje u prostornoj rezoluciji 44 km.

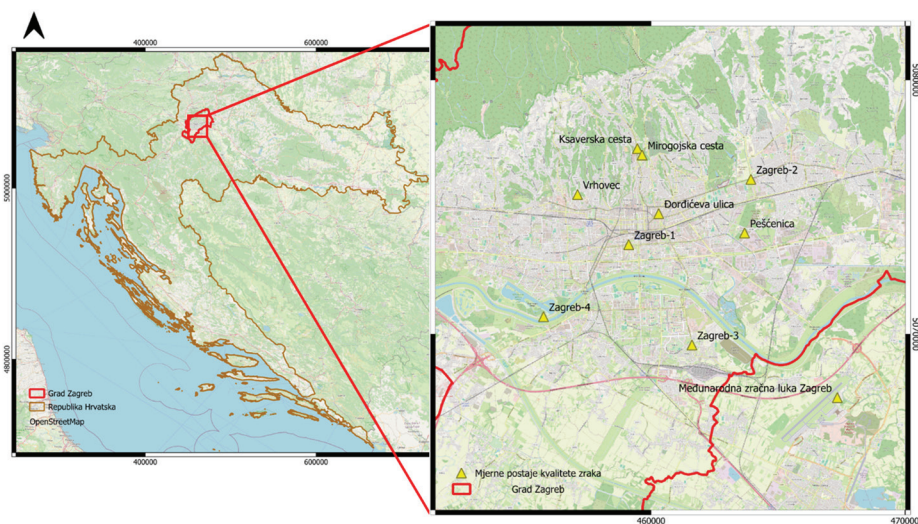
Za uključivanje topografskih i geografskih elemenata u analizu kvalitete zraka koristi se digitalni model reljefa (engl. *Digital Elevation Model, DEM*), koji je također dostupan putem Copernicusova servisa za praćenje zemljišta (engl. *Copernicus Land Monitoring Service, CLMS*). *DEM* pruža podatke o nadmorskoj visini i morfologiji terena s prostornom rezolucijom do 25 m.

Za dodatno prostorno obogaćivanje analize kvalitete zraka koriste se i podaci sa satelita Sentinel-2, koji su dio programa Copernicus. Sentinel-2 pruža višespektralne optičke snimke visoke prostorne rezolucije (do 10 m), pogodne za praćenje Zemljine površine, vegetacije, urbanizacije i promjena u okolišu.

Korištenjem ovih proizvoda, istraživači i donositelji odluka imaju pristup robusnim i vremenski kontinuiranim skupovima podataka koji omogućuju prostorno-vremensku analizu zagađenja zraka u korelaciji s meteorološkim i geografskim uvjetima. Takva sinergija podataka ključna je za razvoj modela predikcije kvalitete zraka, identifikaciju zagađenih zona i planiranje mjera zaštite okoliša na lokalnoj, regionalnoj i globalnoj razini.

6. Analiza prostornih podataka za praćenje kvalitete zraka na području grada Zagreba

Analiza prostornih podataka za praćenje kvalitete zraka je provedena na području glavnog grada Republike Hrvatske, grada Zagreba (slika 2), koji obuhvaća površinu od 641 km² te prema popisu stanovništva iz 2021. godine ima približno 767 131 stanovnika. Administrativno područje grada Zagreba obuhvaća i dio planine Medvednice, s najvišim vrhom Sljemenom na 1033 metra nadmorske visine. Nadalje, grad Zagreb ima najveću gustoću stanica za praćenje kvalitete zraka na razini države, koje kontinuirano bilježe koncentracije NO₂ pri tlu. Prostorni raspored stanica za mjerenje onečišćujuće tvari NO₂ prikazan je na slici 2, a na slici 3 prikazana je mjerna postaja Zagreb-3.



Slika 2. Prikaz stanica državne mreže za praćenje kvalitete zraka na području grada Zagreba.

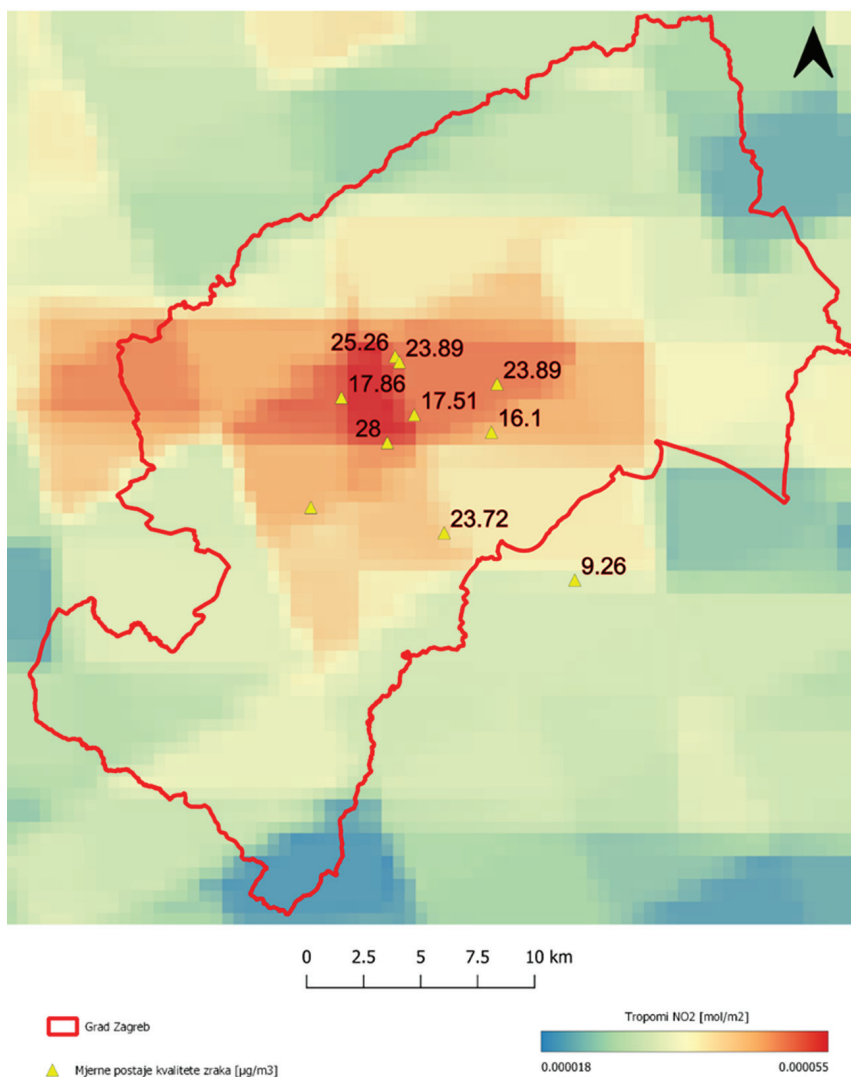


Slika 3. Stanica državne mreže za praćenje kvalitete zraka Zagreb-3.

Podaci o prizemnim koncentracijama NO_2 preuzete su za sve mjerne postaje na području grada Zagreba u formatu *csv* sa službenih stanica za praćenje kvalitete zraka koja je u nadležnosti Ministarstva Zaštite okoliša i zelene tranzicije (URL 1).

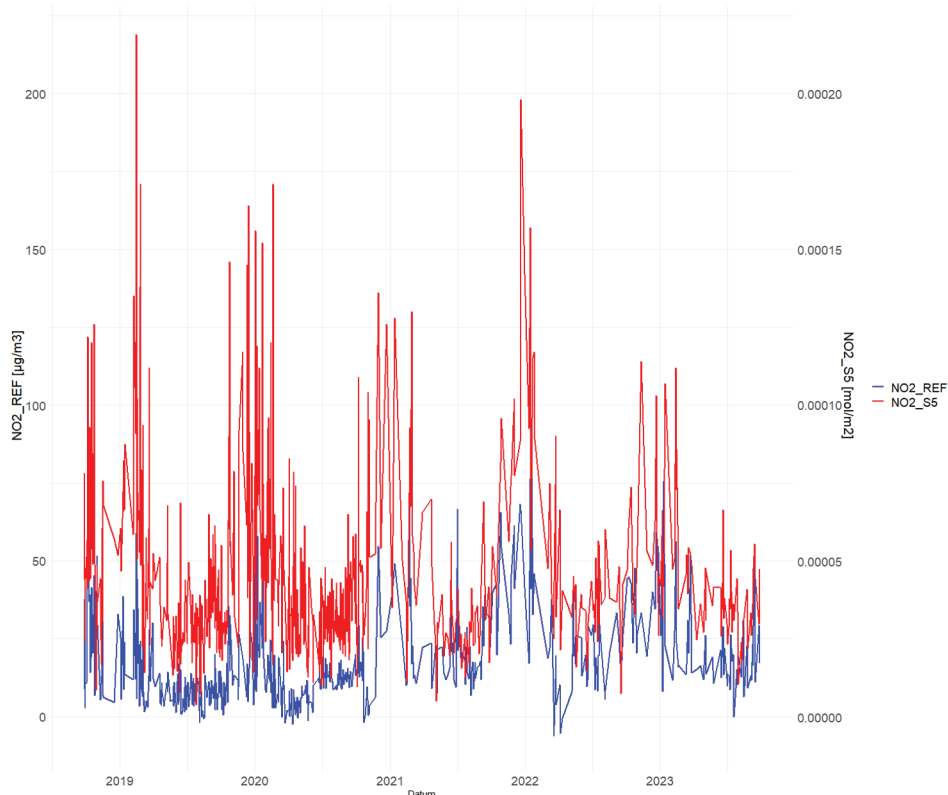
Podaci o koncentracijama NO_2 u atmosferi preuzete su s besplatno dostupne platforme Google Earth Engine (GEE), koja služi za analizu i vizualizaciju prostornih podataka, satelitskih slika, te omogućuje obradu velikih količina podataka u oblaku (URL 3). GEE u svojoj bazi podataka pruža pristup globalnim prostornim skupovima podataka koji se odnose na klimu i vrijeme, satelitske snimke, kao i na geofiziku. Korištenjem JavaScripta ili Pythona, korisnici mogu preuzeti neobrađene podatke, no mogu razviti analize i vizualizirati podatke odmah u oblaku te kasnije dijeliti rezultate analiza u interaktivnim kartama i grafovima. Preko GEE platforme preuzeti su podaci o koncentracijama onečišćujuće tvari NO_2 za područje grada Zagreba u formatima *geotif* i *csv*. Preuzeti rasteri su naknadno obrađena na način da je originalna prostorna rezolucija preuzorkovana na prostornu rezoluciju 500 m po uzoru na druge

radove (Chan i dr. 2021) te je transformirana u službeni državni koordinatni sustav HTRS96/TM. Slika 4 daje prikaz preuzetih satelitskih podataka o koncentracijama NO_2 na području grada Zagreba na dan 29.6.2021. i usporedno prikazuje vrijednost koncentracije onečišćujuće tvari NO_2 prikupljene terenskim mjernim stanicama u istom vremenskom intervalu u kojem je prikupljena snimka.



Slika 4. Usporedba prizemne koncentracije NO_2 izmjerene zemaljskim mjernim stanicama i atmosfere koncentracije NO_2 izmjerene Sentinel 5-P satelitom.

Na slici 5 prikazana je usporedba prizemnih koncentracija prikupljenih mjernim postajama i koncentracija prikupljenih satelitskim opažanjima za vremensko razdoblje od lipnja 2018. godine do kraja 2023.



Slika 5. Grafikon vremenskog niza koncentracija NO_2 prikupljenih zemaljskim mjernim stanicama i satelitskim opažanjima na području mjerne postaje Zagreb-3.

Vizualnom interpretacijom slike 5 vidljivo je da podaci imaju sličan trend te je u svrhu boljeg razumijevanja odnosa atmosferskih i prizemnih koncentracija NO_2 izračunat Pearsonov koeficijent korelacije prema izrazu (Sarapa 2002):

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (7)$$

gdje su:

x_i, y_i – pojedinačne vrijednosti varijabli,

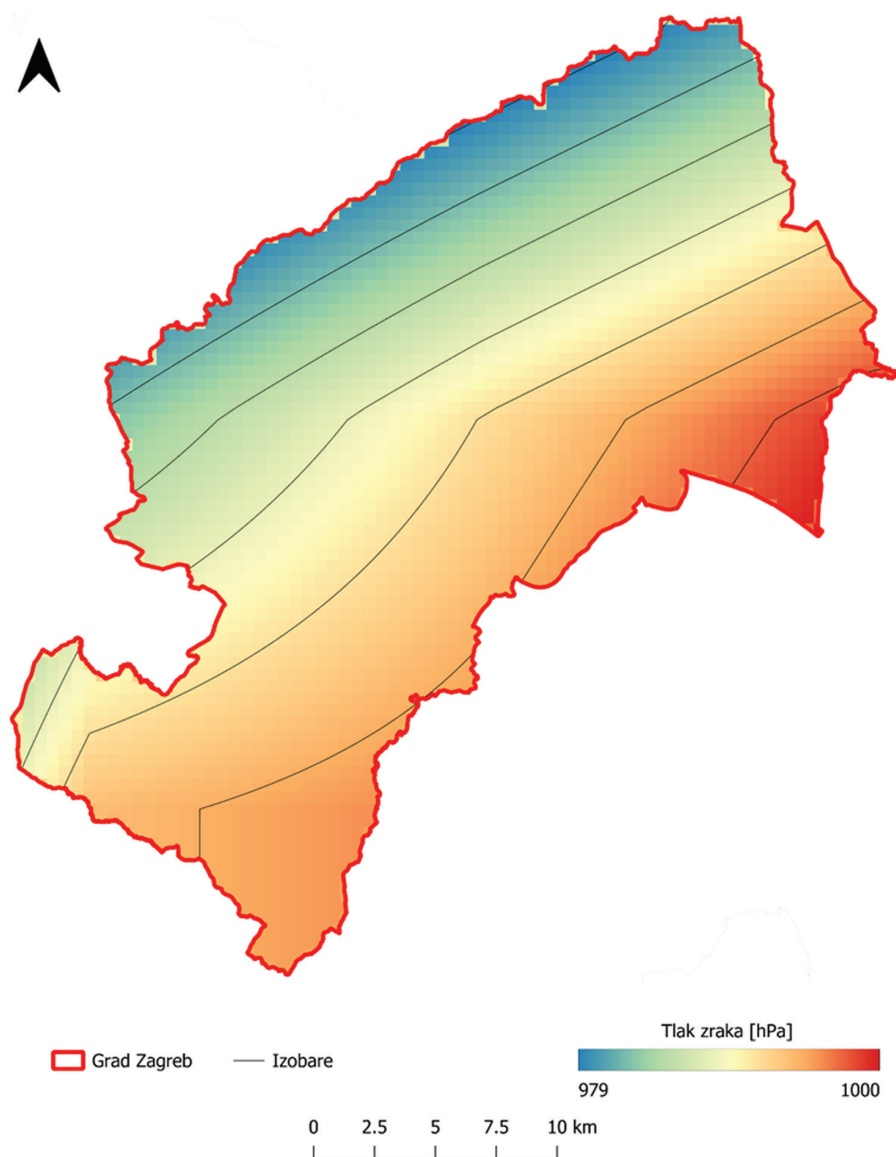
\bar{x}, \bar{y} – aritmetičke sredine varijabli.

Pearsonov koeficijent korelacije izražava mjeru linearne povezanosti te se koristi se za procjenu smjera i jačine veze između dviju varijabli. Vrijednosti koeficijenta su u intervalu od $[-1, 1]$, gdje -1 označava savršena negativna korelacija, a 1 savršena pozitivna korelacija, dok vrijednost 0 označava izostanak linearne veze. Koeficijent korelacije između prizemnih koncentracija NO_2 , prikupljenih terenskim mjerenjima na automatskim postajama za praćenje kvalitete zraka, i atmosferskih koncentracija NO_2 dobivenih satelitskim opažanjima iznosi $0,51$, što ukazuje na umjerenu pozitivnu korelaciju. Ova vrijednost sugerira da između satelitskih i prizemnih mjerenja postoji određena povezanost, kada raste koncentracija NO_2 u višim slojevima atmosfere, često raste i njegova koncentracija pri tlu. Međutim, ta veza nije dovoljno snažna da bi omogućila pouzdano predviđanje jedne varijable na temelju druge putem jednostavne linearne regresije. Kao što su pokazala i prethodna istraživanja, razlike u prostornoj i vremenskoj rezoluciji, utjecaj lokalnih izvora emisija, meteorološki uvjeti, kao i vertikalna raspodjela plinova u atmosferi, značajno utječu na podudarnost između satelitskih i prizemnih opažanja. Satelitski senzori, poput onih na Sentinel-5P satelitu, mjere NO_2 kroz cijelu debljinu atmosfere, dok terenske postaje bilježe koncentraciju u sloju zraka neposredno iznad tla, gdje se emisije i lokalna cirkulacija najizravnije osjećaju. Zbog toga se u literaturi sve češće ističe potreba za primjenom nelinearnih i višedimenzionalnih modela.

Nadalje, preko GEE platforme su preuzeti i dodatni prostorni podaci koji mogu pomoći u analizi koncentracija NO_2 , o meteorološkim i atmosferskim uvjetima, preko integriranih baza podataka CAMS i ERA-5 koje imaju podatke na satnoj razini, kao i podaci Sentinel-2 satelita. Podaci su preuzimani u formatima *geotif* i *csv* na način da su u vremenski usklađeni s preuzetim Sentinel-5P podacima. Iznimno podaci o visini graničnog sloja koji su dio ERA-5 podataka, nisu dostupni preko GEE te su preuzeti pomoću Copernicusova klimatskog servisa. Podaci koji su dodatno preuzeti prikazani su u tablici 3 i na slici 6.

Tablica 3. *Preuzeti dodatni prostorni podaci koji utječu na kvalitetu zraka za područje grada Zagreba.*

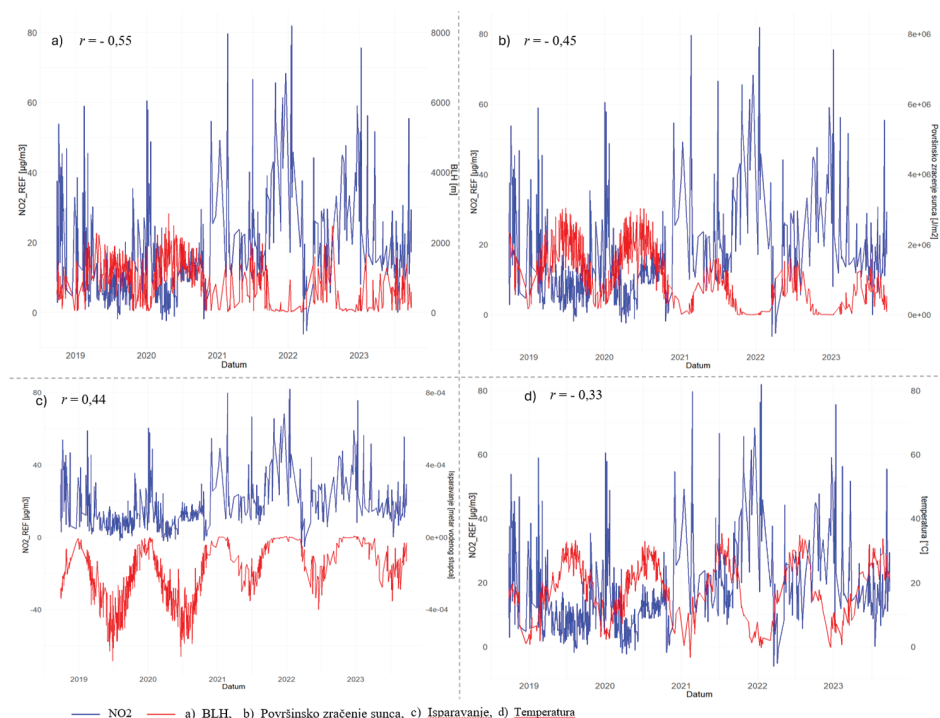
Izvor	Sloj	Opis
ERA-5	Oborine	Akumulirana tekuća i smrznuta voda, uključujući kišu i snijeg, koja pada na površinu Zemlje.
	Temperatura 2m	Temperatura zraka na 2 m iznad površine kopna, mora ili unutarnjih voda.
	Površinska temperatura	Temperatura površine Zemlje.
	Albedo	Albedo je mjera refleksivnosti površine Zemlje.
	Ukupno isparavanje	Ukupna količina vode koja je isparila s površine Zemlje, uključujući pojednostavljeni prikaz transpiracije, u paru, u zraku iznad.
	Tlak zraka	Tlak atmosfere na površini kopna, mora i unutarnjih voda.
	Površinsko zračenje sunca	Površinska solarna radijacija prema dolje, razložena s izvornim kumulativnim vrijednostima na satne vrijednosti.
	U – komponenta vjetra	Istočna komponenta vjetra na visini od 10 m.
	V – komponenta vjetra	Sjeverna komponenta vjetra na visini od 10 m.
CAMS	Ukupni aerosol	Ukupna optička debljina aerosola na 550 nm
	Lebdeće čestice	Lebdeće čestice promjera manjeg od 2,5 mikrometara (PM2,5)
CSS	Visina graničnog sloja	Visina graničnog označava visinu atmosferskog sloja najbližeg tlu.
ESA	Sentinel-2 kanali	Preuzeti su svi kanali, a oni pripadaju kanalima vidljivog spektra (crveni, zeleni i plavi), bliska infracrveni kanal, infracrveni kanali kratkih valnih duljina, te aerosolni kanal.



Slika 6. Kartografski prikaz sloja tlaka zraka za područje grada Zagreba na dan 29.6.2021.

Svi preuzeti podaci iz tablice 3 su uspoređeni s prizemnim koncentracijama NO_2 za mjernu stanicu Zagreb-3 na način da su uzeta mjerenja u vremenskom intervalu od 4,5 godina (od lipnja 2018. do kraja 2023.) te su za njih izračunati Pearsonovi koeficijenti korelacije. Najveće apsolutne vrijednosti Pearsonova

koeficijenta korelacije se odnose na temperaturu, površinsko zračenje sunca, isparavanje i visinu graničnog sloja (slika 7).



Slika 7. Grafikon vremenskog niza prizemnih koncentracija NO₂ prikupljenih zemaljskim mjernim stanicama i dodatnih satelitskih podataka koji utječu na koncentracije NO₂.

Prema slici 7 negativne vrijednosti Pearsonova koeficijenta za visinu graničnog sloja, površinskog zračenja sunca i temperature ukazuju na to da se, u prosjeku, s porastom ovih varijabli bilježi smanjenje koncentracije NO₂. Ovi rezultati su očekivani, s obzirom na to da viši granični sloj i jače sunčevo zračenje pridonose razrjeđivanju i foto-kemijskom raspadu NO₂ u atmosferi. S druge strane, pozitivan koeficijent za isparavanje mogao bi ukazivati na povezanost s meteorološkim uvjetima koji istovremeno pogoduju emisiji ili zadržavanju NO₂, no ova veza nije jednoznačna. Međutim, iako su navedeni koeficijenti statistički značajni, njihova apsolutna vrijednost je srednje niska, što upućuje na slabu do umjerenu linearnu povezanost. Drugim riječima, iako postoji određeni odnos između dodatnih podataka i prizemne koncentracije NO₂, on nije dovoljno snažan da bi se mogao koristiti za pouzdano predviđanje ili objašnjenje ponašanja NO₂ isključivo na temelju tih podataka. Ovo ograničenje ističe važnost pristupa koji nadilaze jednostavnu linearnu korelaciju. U stvarnom atmosferskom sustavu odnosi između meteoroloških uvjeta i zagađujućih tvari su nelinearni, često zavise o više faktora simultano, uključujući lokalne emisijske izvore, topografiju, promet, vegetaciju i druge utjecaje. Stoga, za kvalitetnije

modeliranje i razumijevanje dinamike NO_2 , potrebni su složeniji algoritmi koji mogu obuhvatiti nelinearnosti, međuovisnosti i vremensku dinamiku. Jedan od takvih pristupa je primjena algoritama strojnog učenja, koji omogućuju prepoznavanje skrivenih uzoraka i kompleksnih odnosa u podacima.

7. Zaključak

Ovim radom dan je sveobuhvatan pregled praćenja kvalitete zraka na nacionalnoj, regionalnoj i globalnoj razini, s posebnim osvrtom na dušikov dioksid (NO_2) kao ključni pokazatelj urbanog onečišćenja zraka. NO_2 je izuzetno važan ne samo zbog svog utjecaja na okoliš, već prije svega zbog dokazanih štetnih učinaka na ljudsko zdravlje, dugotrajna izloženost može rezultirati pogoršanjem respiratornih bolesti, povećanom učestalošću astme i ostalim kroničnim smetnjama dišnog sustava, osobito među osjetljivim skupinama stanovništva. Praćenje koncentracija NO_2 zato postaje temeljno za zaštitu javnog zdravlja i donošenje učinkovitih mjera zaštite. Tradicionalno, sustavi praćenja kvalitete zraka temelje se na terenskim mjerenjima pomoću automatiziranih mjernih postaja. Iako su ta mjerenja vrlo točna, pokrivaju vrlo ograničenu površinu pa veliki dijelovi urbanih i prigradskih područja ostaju nedovoljno obuhvaćeni. Ovdje svoju ključnu ulogu preuzimaju satelitske metode, koje omogućuju prostorno kontinuirano praćenje nad cijelim područjem, neovisno o dostupnosti kopnenih stanica. Implementacija prizemnih koncentracija NO_2 s atmosferskim koncentracijama NO_2 dobivenih pomoću TROPOMI instrumenta Sentinel-5P satelita, kao i prostornih podataka koji su povezani s koncentracijama NO_2 , a odnose se na meteorološke, atmosferske uvjete i geomorfološke uvjete pružaju mogućnost procjene onečišćenja zraka na visokoj prostornoj rezoluciji. Na taj način moguće je otkriti prostorne i vremenske zakonitosti i odstupanja, koje bi inače ostale nezapažene, te se na taj način znatno poboljšava kvaliteta i upotrebljivost informacija za javno zdravstvo i donositelje odluka. U ovom istraživanju pokazana je umjerena pozitivna korelacija (Pearsonov $r = 0,51$) između površinskih i atmosferskih koncentracija NO_2 za područje mjerne postaje Zagreb-3, a također su analizirani podaci iz dodatnih izvora. Najveće jednostavne korelacije su iskazane za temperaturu, površinsko sunčevo zračenje, isparavanje i visinu graničnog sloja, što potvrđuje kako je dinamika NO_2 u atmosferi višestruko uvjetovana i velikim brojem međusobno povezanih varijabli. Složene interakcije između meteoroloških elemenata, izvora emisija, karakteristika urbanog prostora i drugih čimbenika čine modeliranje i razumijevanje prostorne i vremenske razdiobe NO_2 iznimno zahtjevnim. Jednostavniji analitički pristupi često nisu dovoljni za prikaz stvarnog stanja, zbog međuovisnosti i nelinearnosti odnosa te se preporuča primjena naprednih analitičkih i modelskih metoda, za dublje razumijevanje i praćenje kvalitete zraka, kao i pravovremenu reakciju kroz politike smanjenja rizika za zdravlje stanovništva.

ZAHVALA. Ovaj rad financirala je Hrvatska zaklada za znanost u okviru projekta ALCAR: "Procjena dugotrajnog učinka klimatskih i antropogenih utjecaja na prostorno-vremensku dinamiku vegetacijskog pokrova u Hrvatskoj korištenjem satelitskih opažanja" (br. projekta HRZZ IP-2022-10-5711).

Literatura

- Bolf, N. (2021): Osvježimo znanje: Strojno učenje, Kemija u industriji, Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske, 70 (9–10), 591–593.
- Bovensmann, H., Burrows, J. P., Buchwitz, M., Frerick, J., Noel, S., Rozanov, V. V., Goede, A. P. H. (1999): SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes, *Journal of the atmospheric sciences*, 56 (2), 127–150.
- Bracher, A., Sinnhuber, M., Rozanov, A., and Burrows, J. P. (2005): Using a photochemical model for the validation of NO₂ satellite measurements at different solar zenith angles, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5 (2), 393–408.
- Bralić, M., Buljac, M., Periš, N., Buzuk, M., Dabić, P. i Brinić, S. (2012): Monthly and Seasonal Variations of NO₂, SO₂ and Black-smoke Located Within the Sport District in Urban Area, City of Split, Croatia, *Croatica Chemica Acta*, 85 (2), 139–145.
- Bucsela, E. J., Krotkov, N. A., Celarier, E. A., Lamsal, L. N., Swartz, W. H., Bhartia, P. K., Pickering, K. E. (2013): A new stratospheric and tropospheric NO₂ retrieval algorithm for nadir-viewing satellite instruments: applications to OMI, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6 (10), 2607–2626.
- Chan, K. L., Khorsandi, E., Liu, S., Baier, F., Valks, P. (2021): Estimation of surface NO₂ concentrations over Germany from TROPOMI satellite observations using a machine learning method, *Remote Sensing*, 13 (5), 969.
- Chan, K. L., Valks, P., Heue, K. P., Lutz, R., Hedelt, P., Loyola, D., Wenig, M. (2023): Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) daily and monthly level-3 products of atmospheric trace gas columns, *Earth System Science Data*, 15 (4), 1831–1870.
- Crutzen, P. J. (1979): The role of NO and NO₂ in the chemistry of the troposphere and stratosphere, In: *Annual review of earth and planetary sciences*, Volume 7, 443–472.
- Gao, X., An, C., Yan, Y., Ji, Y., Wei, W., Xue, L., Li, H. (2025): Impacts of NO₂ on Urban Air Quality and Causes of Its High Ambient Levels: Insights from a Relatively Long-Term Data Analysis in a Typical Petrochemical City in the Bohai Bay Region, China, *Toxics*, 13 (3), 208.
- Grange, S. K. (2014): Averaging wind speeds and directions, University of Auckland, Auckland, New Zealand, Technical report, 12.
- Hamra, G. B., Laden, F., Cohen, A. J., Raaschou-Nielsen, O., Brauer, M., Loomis, D. (2015): Lung cancer and exposure to nitrogen dioxide and traffic: a systematic review and meta-analysis, *Environmental health perspectives*, 123 (11), 1107–1112.
- Harari, S., Raghu, G., Caminati, A., Cruciani, M., Franchini, M., Mannucci, P. (2020): Fibrotic interstitial lung diseases and air pollution: a systematic literature review, *European Respiratory Review*, 29 (157).
- Holloway, T., Miller, D., Anenberg, S., Diao, M., Duncan, B., Fiore, A. M., Zondlo, M. A. (2021): Satellite monitoring for air quality and health, *Annual review of biomedical data science*, 4 (1), 417–447.

- Kim, M., Brunner, D., Kuhlmann, G. (2021): Importance of satellite observations for high-resolution mapping of near-surface NO_2 by machine learning, *Remote Sensing of Environment*, 264, 112573.
- Li, M., Wu, Y., Bao, Y., Liu, B., Petropoulos, G. P. (2022): Near-Surface NO_2 Concentration Estimation by Random Forest Modeling and Sentinel-5P and Ancillary Data, *Remote Sensing*, 14 (15), 3612.
- Liu, S., Valks, P., Pinardi, G., De Smedt, I., Yu, H., Beirle, S., Richter, A. (2019): An improved total and tropospheric NO_2 column retrieval for GOME-2, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12 (2), 1029–1057.
- Liu, S., Valks, P., Pinardi, G., Xu, J., Chan, K. L., Argyrouli, A., Loyola, D. G. (2021a): An improved TROPOMI tropospheric NO_2 research product over Europe, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14 (11), 7297–7327.
- Liu, S., Valks, P., Beirle, S., Loyola, D. G. (2021b): Nitrogen dioxide decline and rebound observed by GOME-2 and TROPOMI during COVID-19 pandemic, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14 (11), 1737–1755.
- Martin, R. V. (2008): Satellite remote sensing of surface air quality, *Atmospheric environment*, 42 (34), 7823–7843.
- Narodne novine (2007): Uredba o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz stacionarnih izvora, Vlada Republika Hrvatske, Zagreb.
- Petritoli, A., Bonasoni, P., Giovanelli, G., Ravegnani, F., Kostadinov, I., Bortoli, D., Fortezza, F. (2004): First comparison between ground-based and satellite-borne measurements of tropospheric nitrogen dioxide in the Po basin, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109 (D15).
- Pintarić, S., Zeljković, I., Pehnc, G., Neseck, V., Vrsalović, M., Pintarić, H. (2016): Utjecaj meteoroloških parametara i onečišćenja zraka na preglede u Hitnoj službi zbog kardiovaskularnih bolesti u gradu Zagrebu, Hrvatska, *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 67 (3), 240–246.
- Sarapa, N. (2002): Teorija vjerojatnosti, treće prerađeno izdanje, Školska knjiga, Zagreb.
- Shahriyari, H. A., Nikmanesh, Y., Jalali, S., Tahery, N., Zhiani Fard, A., Hatamzadeh, N., Mohammadi, M. J. (2022): Air pollution and human health risks: mechanisms and clinical manifestations of cardiovascular and respiratory diseases, *Toxin Reviews*, 41 (2), 606–617.
- Stieren, A., Gadde, S. N., Stevens, R. J. (2021): Modeling dynamic wind direction changes in large eddy simulations of wind farms, *Renewable Energy*, 170, 1342–1352.
- Weinmayr, G., Romeo, E., De Sario, M., Weiland, S. K., Forastiere, F. (2010): Short-term effects of PM_{10} and NO_2 on respiratory health among children with asthma or asthma-like symptoms: a systematic review and meta-analysis, *Environmental health perspectives*, 118 (4), 449–457.
- Žabić, D. (2022): Optimizacija plana leta prema prognoziranim podacima o vjetru, završni rad, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Mrežne adrese

URL 1: Kvaliteta zraka u Republici Hrvatskoj,
<https://iszz.azo.hr/iskzl/mreza.html?t=1>, (5. 7. 2025.).

URL 2: Copernicus,
<https://help.marine.copernicus.eu/en/articles/5487266-how-to-average-winds>, (25. 6. 2025.).

URL 3: Google Earth Engine, <https://earthengine.google.com>, (10. 6. 2025.).

Spatial Data Analysis for Air Quality Monitoring

ABSTRACT. This paper provides an overview of air quality monitoring, emphasizing the importance of accurate and continuous monitoring for the protection of human health in today's world, where the consequences of air pollution represent a serious public health challenge. Special attention is given to nitrogen dioxide (NO_2), one of the key indicators of urban air pollution. The analysis is based on ground-level NO_2 concentration data, as well as atmospheric NO_2 concentrations obtained through satellite measurements, complemented by an analysis of meteorological, atmospheric, and geomorphological data to investigate the spatial and temporal variability of NO_2 in the Zagreb area. The results show that satellite-based methods significantly complement the limitations of point measurements and enable a more detailed understanding and monitoring of pollution, while also highlighting the complexity of the relationship between NO_2 , meteorological conditions, and urban factors. The paper also underscores the need for advanced models to enable more accurate assessment and monitoring of air quality.

Keywords: air quality, nitrogen dioxide, spatial analysis, Sentinel-5P, TROPOMI, public health.

Primljeno / Received: 2025-10-08

Prihvaćeno / Accepted: 2025-12-16