



AIRNOMINAL

ODPRTA PLATFORMA ZA ZBIRANJE IN
DELJENJE PODATKOV O KVALITETI ZRAKA

RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA
RAZISKOVALNA NALOGA

FILIP ŠTAMCAR, 4. A
JAKOB KRALJ, 4. A

MENTOR: ALENKA MOZER

GIMNAZIJA VIČ
LJUBLJANA, 2022–2023



KAZALO VSEBINE

Povzetek	4
Uvod	5
Onesnaženost zraka	5
Ljubiteljska znanost	6
Cilji projekta.....	7
Kakšen je naš glavni namen.....	7
Katere probleme obravnavamo.....	7
Obstoječe alternative	8
Kako deluje	9
Merilna postaja na osnovi Arduina.....	9
Knjižnica za Arduino mikrokrmilnike	10
Komunikacijski HTTP API	10
Strežnik	11
Spletna stran.....	11
Izvorna koda	12
Kako se uporablja	12
Registracija postaj.....	12
Konfiguracija postaj	13
Pregledovanje postaj	13
Pregledovanje meritev	14
Promocijski načrt.....	15
Finančni načrt.....	16
Analiza podatkov	16
Onesnaženost zraka v okolici šole	16
Kakovost zraka v šolskih prostorih	18
Števci prometa na slovenskih cestah	19
Prihodnji razvoj.....	20
Zaključek.....	21
Zahvale	22
Bibliografija.....	22

KAZALO SLIK

Slika 1: Razpon velikosti običajnih virov onesnaženja	6
Slika 2: Shema za komunikacijski vmesnik	10
Slika 3: Prikaz obrazca za registracijo postaje	12
Slika 4: Seznam povezanih postaj in njihovih podatkov.....	13
Slika 5: Prikaz postaje in njenih podatkov na zemljevidu	14
Slika 6: Prikaz postaje s senzorjem za CO ₂ , temperaturo in vlago ter njenih meritev.....	14
Slika 7: Meritve s šolske postaje, obrnjene na šolsko dvorišče.....	17
Slika 8: Primerjava med šolsko postajo in postajo ARSO na istem območju	17
Slika 9: Meritve koncentracije CO ₂ na šolskem hodniku.....	18
Slika 10: Meritve koncentracije CO ₂ v učilnicah.....	18
Slika 11: Število vozil na ljubljanski vzhodni in severni obvoznici	19
Slika 12: Hitrost vozil na ljubljanski vzhodni in severni obvoznici.....	20

POVZETEK

Problem onesnaženosti zraka je eden izmed najbolj akutno nevarnih ekoloških problemov, s katerimi se danes soočamo. Glede na študije Svetovne zdravstvene organizacije (WHO) skoraj vsi prebivalci sveta dihaajo zrak, ki presega priporočene vrednosti WHO in vsebuje visoke ravni onesnaževalcev. Čeprav so senzorji in druga merilna oprema že dolgo na voljo, podatki, ki jih uporabljajo raziskovalci, običajno prihajajo z dveh do treh postaj na nekem območju, velike zbirke podatkov z visoko prostorsko ločljivostjo pa niso na voljo. Da bi raziskovalci lahko preverili, ali je potencialna rešitev, ki obravnava kakovost zraka, dejansko učinkovita, morajo imeti možnost pridobiti veliko podatkov višje kakovosti v standardizirani obliki.

Da bi rešili to težavo, so se avtorji naloge odločili, da zgradijo odprto platformo merilnih postaj za kakovost zraka, ki ljudem omogoča povezovanje in izmenjavo meritev kakovosti zraka ter drugih podatkov. Prav tako so želeli zagotoviti zasnovo odprte merilne postaje, ki jo lahko vsakdo zgradi in poveže s platformo. Na ta način bi državljani prispevali dragocene informacije za lokalne raziskave zraka in razkrili glavne vire/vzroke visokih koncentracij onesnaževal v zraku.

Izdelali so tudi osnovno merilno postajo, ki meri PM delce, ter povezali platformo z obstoječimi javno dostopnimi podatki, v prihodnosti, ko bodo na trgu spet na voljo cenovno sprejemljivi senzorji sprejemljive kakovosti, pa bodo dodani tudi drugi.

Ključne besede:

- Onesnaženost zraka
- Spremljanje zraka
- Javno zdravje
- Omrežje
- DIY

UVOD

Med vsemi ekološkimi problemi, s katerimi se danes soočamo, je le malo takšnih, ki so bolj nevarni kot problem onesnaženosti zraka. Glede na študije Svetovne zdravstvene organizacije skoraj vsi prebivalci sveta dihalo zrak, ki presega priporočene vrednosti WHO in vsebuje visoke ravni onesnaževal. Onesnaženost zraka je priznana kot dejavnik tveganja za številne bolezni, vključno z ishemično boleznijo srca, možgansko kapjo, kronično obstruktivno pljučno boleznijo, astmo in rakom. Ocenjuje se, da so bolezni, ki jih pripisujejo onesnaženosti zraka, zdaj enakovredne drugim zdravstvenim tveganjem, kot sta nezdrava prehrana in kajenje tobaka, ter da je samo ta težava vzrok za več kot 7 milijonov smrti na leto (to je več ljudi, kot je prebivalcev 12 držav članic EU). [1, p. 7] [2]

Problem je znan že vrsto let, senzorji in druga merilna oprema pa so poceni in lahko dostopni. Za veliko mladih, tudi za naju, je bilo zbiranje podatkov o meritvah zraka morda prvi projekt z Arduinom. Kljub temu podatki, ki jih uporabljajo raziskovalci, še vedno običajno prihajajo z dveh ali treh postaj na nekem območju, velike zbirke podatkov z visoko prostorsko ločljivostjo pa niso na voljo. Da bi lahko preizkusili, ali je katera koli rešitev, ki obravnava kakovost zraka, dejansko učinkovita, morajo imeti raziskovalci možnost pridobiti veliko podatkov višje kakovosti v standardizirani obliki.

Glede na to težavo smo se odločili, da bomo vzpostavili odprto platformo za zbiranje podatkov z merilnih postaj za merjenje kakovosti zraka; ta platforma bi ljudem omogočila povezovanje in izmenjavo meritev kakovosti zraka, vključno z vlago, temperaturo, koncentracijo delcev PM, dušikovimi oksidi (NO_x) in koncentracijo ozona. Delimo tudi našo zasnovo odprte merilne postaje, ki jo lahko vsakdo zgradi in poveže s platformo ter tako zagotovi dragocene informacije za raziskave ter razkrije glavne vire/vzroke visokih koncentracij delcev PM.

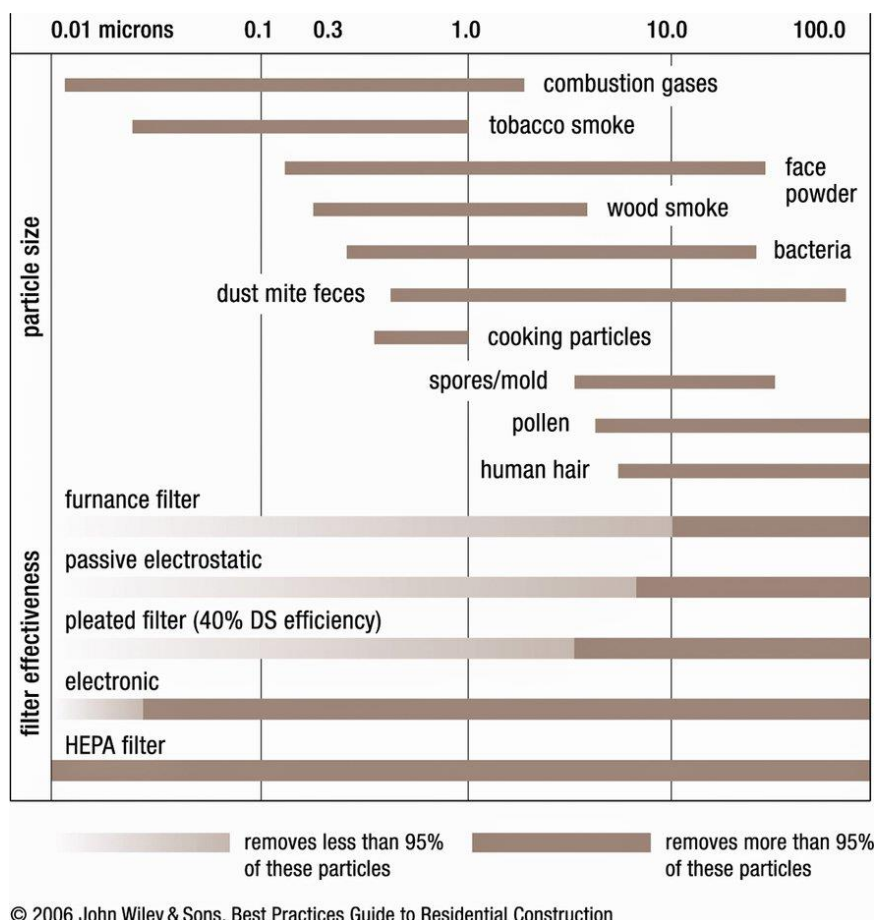
Poleg tega ta projekt mladim omogoča, da se naučijo programiranja, spajkanja in konstrukcijskih spretnosti ter izboljšajo svoje znanje o meritvah onesnaženosti in kakovosti zraka.

ONESNAŽENOST ZRAKA

Onesnaženost zraka je eden izmed najbolj nevarnih okoljskih problemov. Večina svetovnega prebivalstva diha zrak, ki presega mejne vrednosti, ki jih priporoča Svetovna zdravstvena organizacija, pri čemer so najbolj prizadete države z nizkimi in srednjimi dohodki. Znano je, da je onesnaženje zraka pomemben vir obolevnosti in umrljivosti ter prispeva kot dejavnik tveganja za številne bolezni, vključno z boleznimi srca, kroničnimi obstruktivnimi pljučnimi boleznimi in akutnimi okužbami dihal. Ocenjuje se, da onesnaženost zraka v zaprtih prostorih in okolice skupaj povzroči približno 8 milijonov prezgodnjih smrti na svetu letno. [3] [4]

Onesnaževanje zraka povzročajo vsi kemični, fizikalni ali biološki dejavniki, ki spreminjajo lastnosti zraka. Glavni viri onesnaževanja zraka so domače kurilne naprave, industrijski obrati in motorna vozila. Glavna onesnaževala so trdni delci (PM), ogljikov monoksid (CO), dušikov dioksid (NO_2), žveplov dioksid (SO_2) in ozon (O_3).

Trdni delci (PM) so pogost kazalnik onesnaženosti zraka in prizadenejo več ljudi kot katero koli drugo onesnaževalo. Sestavljajo ga predvsem sulfati, nitrati, amonijak, natrijev klorid, črni ogljik, mineralni prah in voda, kompleksna mešanica trdnih in tekočih delcev, suspendiranih v zraku. Običajno se razvršča v različne kategorije PM_x , kjer "x" določa največji premer delcev v μm . Najpogostejši kategoriji sta PM_{10} in $PM_{2.5}$. Delci PM_{10} najpogosteje vplivajo na oči in grlo, delci $PM_{2.5}$ pa so še nevarnejši, saj lahko skozi pljuča potujejo v krvni sistem. Ko so na voljo občutljivejša merilna orodja, se delci običajno razdelijo v dodatne kategorije, kar omogoča boljšo analizo delcev. Manjši kot so, globlje v dihala in krvni sistem lahko prodrejo, kar povzroča vedno večje tveganje. Kronična izpostavljenost delcem prispeva k boleznim srca in ožilja ter dihal in pljučnemu raku. [4] [5]



Slika 1: Razpon velikosti običajnih virov onesnaženja [6]

LJUBITELJSKA ZNANOST

Ljubiteljska znanost (angl. citizen science) je praksa sodelovanja javnosti v znanstvenih raziskavah za povečanje znanstvenega znanja, ki se v zadnjih letih vse bolj uveljavlja. Z ljubiteljsko znanostjo ljudje sodelujejo in prispevajo k programom spremljanja in zbiranja podatkov. Ker delo običajno opravljajo neplačani prostovoljci, ki delajo na lokalno pomembnih projektih, omogoča bolj ekonomsko ugodno izdelavo velikih zbirk podatkov.

Civilne pobude, ki sodelujejo v projektih ljubiteljske znanosti, lahko pridobljene podatke predložijo kot dokaze oblikovalcem predpisov in s tem dvignejo javno razpravo iz čustvene na znanstveno raven.

CILJI PROJEKTA

KAKŠEN JE NAŠ GLAVNI NAMEN

Oblikovati želimo odprto platformo merilnih postaj za kakovost zraka, ki bo raziskovalcem omogočala izmenjavo podatkov o kakovosti zraka in njihovo raziskovanje. Sama platforma ne postavlja nobenih omejitev glede specifične uporabljene merilne naprave, kar omogoča uporabo s širokim naborom senzorjev in jo dela bolj dostopno. Možna je na primer povezava z običajno stacionarno merilno napravo ali cenejšimi in lažjimi prenosnimi napravami, ki jih ljudje lahko vzamejo s seboj sami, in s tem omogoči širši zajem podatkov. S pomočjo strokovnjakov z Univerze v Novi Gorici in Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) bomo naše podatke primerjali s profesionalnimi merilnimi postajami ter ocenili njihovo natančnost in zanesljivost.

Upamo, da bomo z odprto platformo za izmenjavo podatkov o kakovosti zraka raziskovalcem omogočili, da preverijo, ali je katera koli rešitev za kakovost zraka resnično učinkovita, in se tako osredotočili le na delujoče rešitve ter izboljšali kakovost zraka na lokalni ravni ter zaščitili in izboljšali zdravje ljudi.

Da bi lahko ljudje brez težav sodelovali pri projektu, želimo zagotoviti referenčno izvedbo merilne postaje, tako kot končni izdelek, ki ga lahko ljudje kupijo, kot tudi kot projekt "naredi sam". Postaja bo zbiralala podatke o trenutni lokaciji in kakovosti zraka; na našo platformo jih bo pošiljala prek modula Wi-Fi ali, kjer Wi-Fi ni na voljo, prek drugih načinov brezžične komunikacije. Naša različica za nakup bo omogočila, da bodo v tem projektu državljske znanosti sodelovali tudi ljudje z malo znanja o tej temi, različica "naredi sam" pa bo lahko izboljšala razvoj finih motoričnih spretnosti ter znanje o programiranju in konstruiranju.

KATERE PROBLEME OBRAVNAVAMO

Onesnaženost zraka je eden ključnih dejavnikov, ki vplivajo na javno zdravje in podnebne spremembe, vendar jo je zaradi drage profesionalne merilne opreme težko meriti v velikem obsegu. Z našo platformo lahko vsakdo meri in izmenjuje meritve v javno zbirko podatkov, kar ljubiteljem in raziskovalcem omogoča, da zberejo veliko količino podatkov in jih zlahka analizirajo. Ker je naša platforma odprtokodna, jo lahko raziskovalci ne le nadzorujejo in uporabljajo, temveč jo tudi prilagodijo svojim potrebam. Uporabnikov ne omejuje na določeno merilno postajo in senzorje (čeprav je naša predizdelana različica na voljo kot referenca), kar jim omogoča, da glede na svoje potrebe dodajo svoje senzorje, izmerijo zanesljivejše podatke ali zmanjšajo stroške in namestijo več postaj. Storitev je zasnovana tako, da deluje s cenovno dostopnimi mikrokontrolerji, kot so Arduino Uno, ESP8266 in podobni, kar vsakomur omogoča, da prispeva k znanosti za zelo majhen strošek. Sistem je brezplačen in enostaven za uporabo

tako za začetnike kot izkušene programerje. Zagotavljamo veliko število načinov za dostop do podatkov, zato je treba porabiti manj časa za katalogizacijo.

Obstoječe profesionalne merilne naprave lahko zagotovijo zanesljivejše podatke kot naši senzorji, vendar le, če upoštevamo podatke iz ene same merilne naprave. Vendar pa njihove naprave običajno zagotavljajo le podatke o površini in nimajo popolne pokritosti območja. Za primerjavo, naši merilni podatki omogočajo posameznikom, da zgradijo in postavijo merilne sisteme na svojih domovih ali drugih mestih, izberejo lokacijo glede na svoje potrebe ali po potrebi namestijo več postaj. To je še posebej pomembno pri meritvah PM, saj se lahko te drastično razlikujejo že na kratkih razdaljah. Z napredovanjem projekta bo nameščenih vedno več postaj, s čimer se bosta povečala gostota in pokritost. Z večjo gostoto lahko naša platforma zagotavlja zanesljivejše in uporabnejše podatke kot obstoječe rešitve.

Merilne postaje je mogoče namestiti na javnih mestih in ustanovah, kot so šole, knjižnice in avtobusne postaje, kar nam omogoča zbiranje velike količine podatkov o kakovosti zraka. V projektu lahko sodelujejo tudi javne ustanove, kot so knjižnice, in ozaveščajo o težavah s kakovostjo zraka in njihovem vplivu na naše zdravje. Raziskovalcem in osebam, odgovornim za reševanje problema onesnaženosti zraka, lahko omogoči uporabo velikih javnih zbirk podatkov, da preverijo, ali so njihove rešitve učinkovite, in ustrezno ukrepajo. Izdelek ljudem omogoča tudi boljše poznavanje svojega okolja, jih spodbuja k sodelovanju pri reševanju problema kakovosti zraka v lokalnih skupnostih in jih izobražuje o problemu onesnaženosti zraka.

Poleg tega odprtost naše platforme s podporo za postaje po meri spodbuja ljudi, da oblikujejo svoje izdelke, se učijo o pomembnih temah ter izboljšujejo svoje spretnosti programiranja, spajkanja, konstruiranja in fine motorike. Naš projekt omogoča šolam in drugim izobraževalnim ustanovam, da si aktivno prizadevajo za izboljšanje teh spretnosti.

OBSTOJEČE ALTERNATIVE

Na trgu je že veliko potrošniških vremenskih postaj, ki merijo osnovne parametre zraka, vendar jih večina ne more zbirati naprednih meritev kakovosti zraka, kot so delci PM, NO_x in ozon; težava je tudi povezava z internetom. Obstajajo tudi nekatere komercialne rešitve, ki so precej drage in uporabljajo lastniške sisteme zbiranja podatkov, kar raziskovalcem otežuje uporabo podatkov.

Trenutne alternative za merjenje kakovosti zraka vključujejo:

- [WAQI \(https://waqi.info/\)](https://waqi.info/)/[AQICN \(https://aqicn.org/\)](https://aqicn.org/): Uporablja samo podatke iz uradnih virov in zagotavlja zanesljivejše podatke, vendar z bolj omejenim obsegom. Ni odprt vir.
- [PurpleAir \(https://www2.purpleair.com/\)](https://www2.purpleair.com/): Ponuja lastne profesionalne senzorje, ki so za navadne ljudi zelo dragi. Ne zagotavlja popolnih javnih podatkov, platforma ni odprtokodna.

- [EnviroMonitor \(https://enviromonitor.github.io/\)](https://enviromonitor.github.io/): Odprtokodni projekt za merjenje in zbiranje podatkov, ki pa še ni začel delovati. Podpira samo eno vrsto mikrokrmilnika (ESP).

Druge storitve so namenjene le podjetjem ali nejavni uporabi ali pa se z njimi meritve zraka ne opravljajo primarno. V nasprotju z večino obstoječih alternativ na trgu je naš projekt v celoti odprtokoden in razširljiv, tako da se lahko vsakdo poveže in izmenjuje podatke. Uporablja se lahko s cenovno dostopnimi mikrokrmilniki, pri čemer ni potreben dostop do drage merilne opreme. Zaradi zelo odprte narave projekta lahko ljudje prilagodijo svoje merilne postaje tako, da vključijo senzorje, ki jih potrebujejo, zato ni omejen le na določene značilnosti kakovosti zraka ali celo na kakovost zraka na splošno. Ker projekt omogoča tudi uporabo merilne postaje po meri "naredi sam", daje pobudo ljudem in lokalnim skupnostim, da spoznajo merjenje kakovosti zraka in pri njem sodelujejo ter izboljšajo svoje programerske in motorične spretnosti.

Naš projekt je edinstven tudi zato, ker spodbuja posameznike, da namestijo merilne naprave, kjer želijo. Z napredovanjem projekta bo vedno več ljudi nameščalo svoje naprave, zato se bo gostota povečala. V primerjavi z obstoječimi rešitvami na trgu, ki zagotavljajo le zelo malo postaj na območju ali pa dostop do podatkov omogočajo le določenim strankam, naša platforma zagotavlja tako odprt dostop do podatkov kot tudi natančne in goste podatke.

Senzorji kakovosti zraka, zlasti detektorji delcev PM, so že na voljo na trgu. Vendar večina senzorjev nima popolne merilne naprave in ne izmenjuje podatkov z javnostjo, kar omejuje doseg podatkov. Naša platforma v pogodbi omogoča enostavno nastavitve za povezovanje različnih senzorjev in globalno izmenjavo podatkov. Z dodajanjem vedno več senzorjev na platformo se povečuje pokritost s podatki, kar zmanjšuje težave s točnostjo, ki jih povzročajo manj natančni, a bolj dostopni senzorji v primerjavi z zelo malo dragimi profesionalnimi napravami.

KAKO DELUJE

MERILNA POSTAJA NA OSNOVI ARDUINA

Naše merilne postaje so trenutno sestavljene iz mikrokrmilnikov Arduino in ESP, na katere je mogoče priključiti senzorje temperature, vlage, PM in druge senzorje ter modul GPS za določanje lokacije postaje. Postaja zbira meritve iz senzorjev in modula GPS ter jih s pomočjo naše knjižnice pošilja v naš strežnik.

Naše uporabnike spodbujamo, da oblikujejo in zgradijo svoje merilne postaje z uporabo mikrokrmilnikov, združljivih z Arduinom, in naše razvojne knjižnice, ki bo ustrezala njihovim potrebam.

KNJIŽNICA ZA ARDUINO MIKROKRMILNIKE

Projekt zagotavlja knjižnico za mikrokrmilnike, združljive z Arduino, ki omogoča širok nabor podprtih merilnih naprav in senzorjev. Zasnovana je tako, da je lahka in razširljiva, zato lahko deluje na številnih različnih platformah.

Pri uporabi uradnega kompleta DIY ali vnaprej pripravljenega izdelka je knjižnica vnaprej konfigurirana za zbiranje podatkov s privzetimi senzorji (temperatura, vlažnost, PM in lokacija) in njihovo pošiljanje v uradno javno instanco podatkovnega strežnika prek omrežja Wi-Fi (privzeto) ali drugih brezžičnih komunikacijskih protokolov (če jih konfigurira uporabnik). V primerih, ko brezžična povezava ni na voljo, so podatki shranjeni lokalno na kartici microSD in jih je mogoče pozneje ročno uvoziti v storitev.

Knjižnica omogoča tudi izdelovalcem merilnih postaj po meri, da jih s pomočjo preprostega kodnega vmesnika razširijo z lastnimi senzorji in strojno opremo, kar omogoča širši nabor podatkov in koristi raziskovalcem in drugim posameznikom s posebnimi potrebami. Prav tako je mogoče nastaviti druga sredstva brezžične komunikacije, kot so mobilno omrežje ali radijski signali, da se omogoči uporaba tam, kjer Wi-Fi ni na voljo ali ni zanesljiv. Uporabniki lahko nastavijo tudi knjižnico za uporabo podatkov v svojih zasebnih instancah, vendar spodbujamo vse, da se povežejo z našo javno storitvijo, da bi jo lahko koristilo več ljudi.

KOMUNIKACIJSKI HTTP API

Plast, ki povezuje vse dele, je dobro dokumentiran in enostaven za uporabo API HTTP, ki izmenjuje podatke iz merilnih naprav v naš strežnik ter uporabniku posreduje meritve in druge informacije.

API se interno uporablja v knjižnici Arduino za pošiljanje meritev iz senzorjev in na spletnem mestu za njihov prikaz v človeku prijazni obliki, vendar ga lahko napredni uporabniki uporabljajo tudi neposredno in ga prilagodijo svojim potrebam. API je načrtno narejen brez zapletenejših serilizacijskih formatov, saj je implementacija le teh lahko tehnično zahtevna na manj zmogljivih mikrokrmilnikih. Protokol tako temelji samo na nizih, ki so enostavni za implementacijo tudi na mikroprocesorjih brez podpore za kakršne koli strukture, zapletenejše od byta. Hkrati je mogoče podatke enostavno pisati v C tokove, ki so lahko vezani na operacije povezane z shranjevanjem na diske oz. druge komunikacijske storitve.

Shema za vmesnik je naslednja:

```
f4174be6-5b5d-4094-8d38-6445636085075055240000000063FE3F23DDF3.1567f4DD66567fLAT25.4fLON13.4fEND
UUUUUUUU-UUUU-UUUU-UUUU-UUUUUUUUUUUUPPPPPPTTTTTTTTTTTTTTTTTTXXXXNNNNNNFXXXXNNNNFLATNNNNFLONNNNNFEND
```

```
U - uuid postaje
P - geslo
X - koda senzorja za 3 leter
N - vrednost senzorja
f - konec številke
LAT - zemljepisna širina
LON - zemljepisna dolžina
END - konec sporočila, možen začetek novega sporočila
T - unixov časovni žig v bazi 16
```

Slika 2: Shema za komunikacijski vmesnik

Večina vmesnika API je javno dostopna, razen klicev za ustvarjanje in upravljanje merilnih postaj, za katere je treba ustvariti brezplačen račun, in pošiljanje meritev na strežnik, za kar je treba zagotoviti žeton API za posamezno postajo, da se prepreči zloraba.

STREŽNIK

Uradni zaledni strežnik je ustvarjen v Pythonu z uporabo spletnega ogrodja FastAPI, namenjenega pisanju hitrih vmesnikov uporabniškega programa. Strežnik za razliko od starejših verzij platforme ne gosti več spletne strani, kar izboljša učinkovitost sistema. Podatki se shranjujejo na InfluxDB, časovno bazo podatkov posebej namenjeno hitremu analiziranju več milijonov podatkov na sekundo. Za shranjevanje drugih podatkov (podatki o postajah in uporabniki ter zadnje informacije o postajah) se uporablja MongoDB, noSQL baza, ki omogoča shranjevanje raznolikih podatkov v eno tabelo in hitro iskanje po njih. Strežnik je lahek in ga je mogoče gostiti tudi na tako poceni opremi, kot je Raspberry Pi, z uporabo katerega koli spletnega strežnika, združljivega s ASGI. Hkrati pa so vsa ta orodja prilagojena tudi za velike industrijske podatkovne centre, kar pomeni da je mogoče Airnominal širiti tudi horizontalno (na več strežnikov hkrati) ne le vertikalno (na močnejši strežnik).

SPLETNA STRAN

Naše spletno mesto je napisano v jeziku TypeScript z uporabo ogrodja Vue. Uporaba ogrodja Vue omogoča boljšo modularnost, saj zagotavlja podporo za razvoj komponent za večkratno uporabo kot elementov HTML po meri.

Na spletnem mestu so na voljo navodila za nastavitve lastnih merilnih naprav in njihovo registracijo v strežnik. Uporabnik se v spletno stran vpiše s svojim GitHub računom prek varnega protokola OAuth2. Vpisani uporabniki lahko registrirajo in spreminjajo svojo postajo, navodila za dodajanje postaje so bolj podrobno razložena ob samem vpisu. Po registraciji dobijo konfiguracijo postaje, ki jo je treba ročno konfigurirati na postaji.

Ob registraciji naprava pridobi zagotovljen žeton API, ki je specifičen za postajo, in jo konfigurirali na postaji. Načrtuje se tudi zagotovitev enostavnega programa za konfiguracijo, ki bo uporabnikom z manj tehničnega znanja omogočal samodejno konfiguracijo postaj (nastavitve omrežja Wi-Fi, dodajanje ključa postaje itd.). Prek nadzorne plošče lahko uporabnik tudi ročno uvozi podatke, ki so bili shranjeni na kartici microSD, če omrežje med izvajanjem meritev ni bilo na voljo.

Podatki so javni in ne zahtevajo registracije uporabnika. Za njihov prikaz se uporablja sistem Grafana. Uporabniki si lahko ogledajo zemljevid vseh trenutno aktivnih postaj ali izberejo določeno postajo in si ogledajo vse pretekle podatke. Na strani za posamezno postajo so prikazane tudi trenutne meritve, pretekli podatki s pomočjo razumljivih grafov ter trenutne in lokacije na zemljevidu. Na voljo je tudi izbor in primerjava več postaj in njihovih podatkov.

Raziskovalci, ki morajo analizirati veliko količino podatkov, lahko neposredno dostopajo do InfluxDB baze preko žetona, ki ga pridobijo na spletni strani. Baza omogoča tudi omejitev podatkov na določeno datumsko območje, postajo ali vrsto meritev, tako da jim ni treba

skrbeti za filtriranje podatkov in se lahko osredotočijo na svoje raziskave. Ta funkcionalnost je lahko zelo uporabna za raziskovalce ali druge posameznike ali organizacije, ki morajo lokalno izvajati naprednejše analize.

Hkrati je sistem kompatibilen tudi z nekaterimi orodji za analizo podatkov, kot je na primer Google Colab, v pripravi pa je tudi Python knjižnica za enostaven programski dostop do podatkov.

IZVORNA KODA

Projekt je odprtokoden in na voljo na GitHubu: <https://github.com/Airnominal>

Uradna instanca je dostopna na: <https://zrak.gimvic.org/>

KAKO SE UPORABLJA

REGISTRACIJA POSTAJ

Na registracijski strani lahko uporabniki vnesejo podrobnosti o postaji (kot sta ime in opis) ter določijo, katere senzorje postaja zagotavlja. Po oddaji obrazca dobijo konfiguracijo postaje s ključem API, ki ga je treba konfigurirati na postaji.

Register Station

Name
Gimnazija Vič

Description

Sensors
Add all sensors the station provides

Name	Quantity	
CO2	CO2 (ppm)	×
Temperature	Temperature (°C)	×
Humidity	Humidity (%)	×
		+

SUBMIT

Slika 3: Prikaz obrazca za registracijo postaje

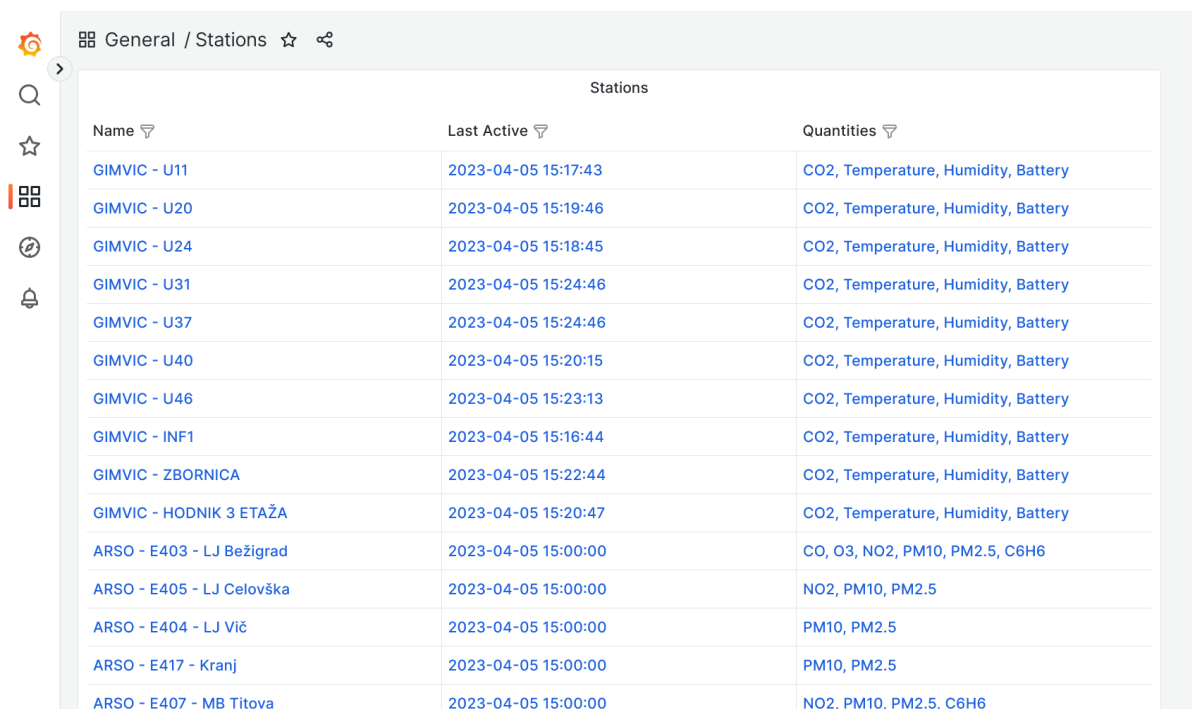
KONFIGURACIJA POSTAJ

Uporabniki lahko svoje merilne postaje, ki temeljijo na Arduino-podobnih mikrokontrolerih, konfigurirajo s pomočjo datoteke glave C++, ki vsebuje definicije za podrobnosti omrežja Wi-Fi in ključ API. S pomočjo naše Arduino knjižnice lahko uporabniki nastavijo svoje senzorje za pošiljanje meritev v storitev. Trenutno je kodo treba ročno urediti, da vključuje pravilne podatke, jo prevesti z uporabo prevajalnika, združljivega s sistemom Arduino, in naložiti na ploščo.

Ko se bo projekt razvijal, bomo zagotovili tudi enostaven za uporabo konfiguracyjski program, ki bo manj tehničnim uporabnikom omogočil samodejno izvajanje teh korakov, ter dodali navodila za nastavitve in programe za postaje, ki ne temeljijo na Arduino

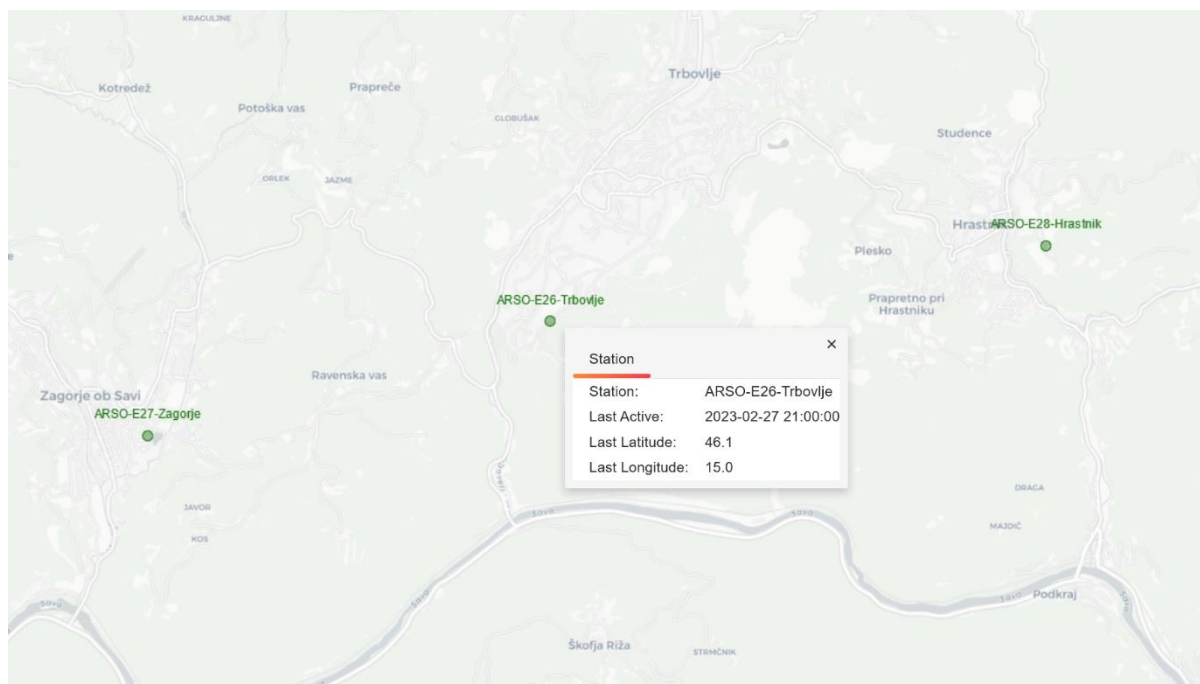
PREGLEDOVANJE POSTAJ

Uporabniki lahko na zemljevidu ali seznamu vseh registriranih postaj izberejo postaje, ki si jih želijo ogledati. Ko bo spletna stran v celoti razvita, bodo lahko postaje filtrirali glede na različne značilnosti, kot so senzorji, lokacije, zgodovina podatkov itd., in jih razvrstili v skupine.



Stations		
Name	Last Active	Quantities
GIMVIC - U11	2023-04-05 15:17:43	CO2, Temperature, Humidity, Battery
GIMVIC - U20	2023-04-05 15:19:46	CO2, Temperature, Humidity, Battery
GIMVIC - U24	2023-04-05 15:18:45	CO2, Temperature, Humidity, Battery
GIMVIC - U31	2023-04-05 15:24:46	CO2, Temperature, Humidity, Battery
GIMVIC - U37	2023-04-05 15:24:46	CO2, Temperature, Humidity, Battery
GIMVIC - U40	2023-04-05 15:20:15	CO2, Temperature, Humidity, Battery
GIMVIC - U46	2023-04-05 15:23:13	CO2, Temperature, Humidity, Battery
GIMVIC - INF1	2023-04-05 15:16:44	CO2, Temperature, Humidity, Battery
GIMVIC - ZBORNICA	2023-04-05 15:22:44	CO2, Temperature, Humidity, Battery
GIMVIC - HODNIK 3 ETAŽA	2023-04-05 15:20:47	CO2, Temperature, Humidity, Battery
ARSO - E403 - LJ Bežigrad	2023-04-05 15:00:00	CO, O3, NO2, PM10, PM2.5, C6H6
ARSO - E405 - LJ Celovška	2023-04-05 15:00:00	NO2, PM10, PM2.5
ARSO - E404 - LJ Vič	2023-04-05 15:00:00	PM10, PM2.5
ARSO - E417 - Kranj	2023-04-05 15:00:00	PM10, PM2.5
ARSO - E407 - MB Titova	2023-04-05 15:00:00	NO2, PM10, PM2.5, C6H6

Slika 4: Seznam povezanih postaj in njihovih podatkov

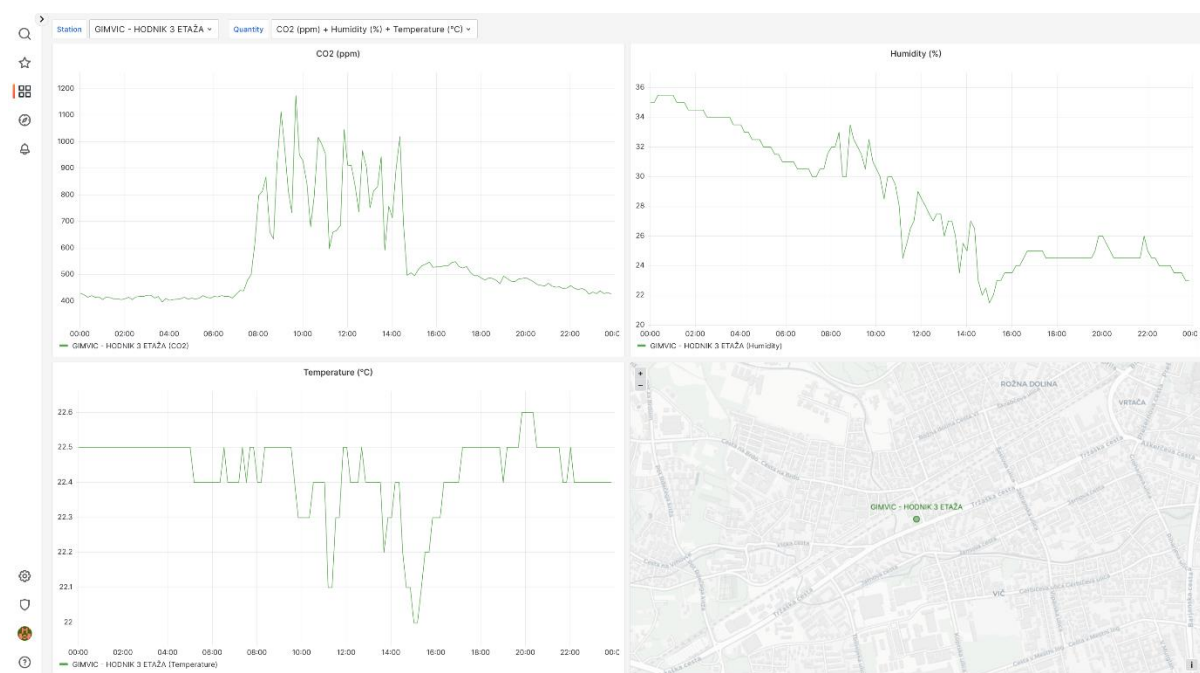


Slika 5: Prikaz postaje in njenih podatkov na zemljevidu

PREGLEDOVANJE MERITEV

Ko uporabnik izbere postajo, si lahko ogleda grafe z vsemi podprtimi meritvami ter zadnjo lokacijo postaje. V prihodnosti nameravamo dodati podporo tudi za prikaz preteklih lokacij, kar je lahko uporabno v primeru prenosnih merilnih postaj.

S pomočjo menija lahko uporabnik izbere tudi druge postaje in jih primerja med seboj ter prikaz filtrira glede na tip meritve, v meniju za čas pa lahko izbere poljubno časovno obdobje.



Slika 6: Prikaz postaje s senzorjem za CO₂, temperaturo in vlago ter njenih meritev

PROMOCIJSKI NAČRT

Obstoječe uporabnike platforme bomo spodbujali, da naš projekt priporočijo svojim prijateljem ter ga širijo v šoli in službi. Ko bo našo storitev začelo uporabljati vedno več ljudi, se bo začela oglaševati, hkrati pa se bo povečala njena raziskovalna vrednost, saj bo na platformi na voljo vedno več podatkov. Ko se bo izkazalo, da projekt deluje v manjšem obsegu, in bomo pripravljeni razširiti njegovo uporabo, se bomo začeli udeleževati seminarjev in dogodkov o onesnaženosti zraka, širiti zavest o tej temi in promovirati naš projekt.

Sodelujemo lahko z lokalnimi javnimi ustanovami, kot so šole, univerze in knjižnice, in namestimo merilne naprave, izobražujemo njihove obiskovalce o pomenu kakovosti zraka in širimo zavest o nevarnosti onesnaženosti zraka. Lokalne skupnosti in organizacije lahko spodbudimo, da začnejo uporabljati našo platformo in jih izobražujemo o onesnaženosti zraka. Povezujemo se lahko s pohodniškimi klubi in njihovimi člani, da našo prenosno merilno napravo vzamejo s seboj v gore, kar nam omogoča zbiranje podatkov s širšega območja in raziskovanje onesnaženosti zraka na bolj oddaljenih lokacijah.

Promovirali bomo tako naš komplet DIY kot tudi vnaprej pripravljene izdelke. Komplet naredi sam bo namenjen predvsem šolam in drugim izobraževalnim ustanovam, saj jim omogoča izobraževanje otrok o nevarnostih onesnaževanja zraka ter izboljšanje njihovega znanja in spretnosti, posameznikom, ki jih zanimajo programiranje, spajkanje in podobne teme, ter raziskovalnim organizacijam, ki morajo postajo prilagoditi s posebnimi senzorji in strojno opremo. Predhodno pripravljena bo namenjena drugim posameznikom, da bodo lahko preprosto sodelovali pri projektu, ne da bi jim bilo treba imeti posebna znanja, in drugim organizacijam, ki bi jih morda zanimala namestitev našega izdelka.

Lahko se povežemo z občinami in organizacijami, ki upravljajo javno infrastrukturo, in namestimo svojo opremo na javna mesta, kot so avtobusna postajališča, cestna križišča in parki. S tem bi povečali gostoto naših postaj ter raziskovalcem zagotovili boljše in zanesljivejše podatke.

Na začetku se želimo osredotočiti na vzpostavitev projekta v naši domovini, Sloveniji. Tu je več kot 250 srednjih šol, približno 90 fakultet ter več kot 30 bolnišnic in zdravstvenih domov, ki so naše potencialne stranke. V Ljubljani, glavnem in največjem mestu Slovenije, je več kot 30 javnih knjižnic, kjer bi lahko namestili naše postaje in kjer bi lahko organizirali seminarje na to temo. Poleg tega je v Ljubljani več kot 450 avtobusnih postajališč, kjer bi lahko v sodelovanju z javnim podjetjem Ljubljanski potniški promet in Javnim holdingom Ljubljana namestili merilno opremo.

Ko bo projekt dobil trdno podlago v Sloveniji, nameravamo svoje delo razširiti tudi v tujino. Ker je problem onesnaženosti zraka globalen, verjamemo, da obstaja potencial tako v bolj kot manj razvitih državah. Po podatkih Svetovne zdravstvene organizacije je še posebej problematičen v državah z nizkimi in srednjimi dohodki, predvsem v jugovzhodni Aziji in zahodni pacifiški regiji. [4] Razširitev projekta v te države bi lahko povečala ozaveščenost o onesnaženosti zraka, raziskovalcem pa omogočila preučevanje učinkov in možnih rešitev za

ponovno vzpostavitev zdrave kakovosti zraka. V razvitejših državah lahko projekt še vedno sodeluje pri različnih izobraževalnih dejavnostih in dejavnostih za širjenje ozaveščenosti, hkrati pa raziskovalcem zagotavlja širši zajem podatkov.

FINANČNI NAČRT

Glavni strošek našega projekta predstavlja gostovanje javnega primerka strežnika za zbiranje in pregledovanje podatkov. Ker je naš začetni proračun nizek in ker pričakujemo, da na začetku projekta ne bomo imeli veliko uporabnikov, ocenjujemo, da lahko vsaj eno leto še naprej brezplačno uporabljamo strežnik, ki nam ga je zagotovila šola, ter lastne strežnike. Ko bo projekt napredoval in bo vedno več uporabnikov začelo pošiljati meritve na strežnik in si ogledovati spletno stran, bomo morali nabaviti zmogljivejši strežnik ter več vlagati v zanesljivost in varnostne kopije za primer okvare strežnika.

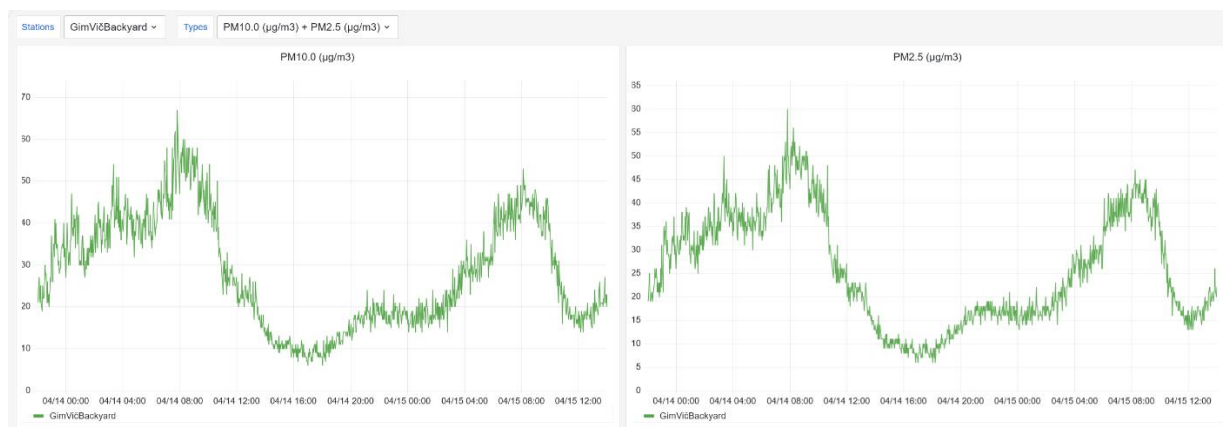
Denar bo treba porabiti tudi za oglaševanje storitve. Vsaj na začetku nameravamo oglaševati našo platformo svojim prijateljem in jih povabiti, da povabijo svoje prijatelje, kar nam omogoča zmanjšanje stroškov. Za drugo oglaševanje bo morda treba uporabiti spletne oglaševalske storitve in doseči medijsko pokritost. Upamo tudi, da se bomo lahko povezali z različnimi raziskovalnimi in izobraževalnimi ustanovami ter različnimi vladnimi in ekološkimi organizacijami, ki bi nam pomagale pri oglaševanju projekta in pokrivanju nekaterih stroškov, povezanih s projektom.

Te stroške nameravamo pokriti s prodajo kompletov DIY in vnaprej pripravljenih izdelkov naše referenčne postaje. V kompletu in izdelku bodo uporabljeni cenovno dostopni mikrokrmilniki ESP (približno 8 USD), senzorji PM (približno 10 USD), senzorji temperature in vlage (približno 4 USD) ter moduli grafičnega procesorja (približno 7 USD). Materiali za eno postajo tako stanejo približno 30 USD. Če prištejemo lastne proizvodne stroške in upoštevamo prihodke za našo storitev, bo vnaprej pripravljena postaja stala približno 45 USD, medtem ko bo različica "naredi sam" cenejša. Glede na to, da številni proizvajalci in prodajalci senzorjev ponujajo popuste za množično prodajo, so lahko dejanski stroški materiala nižji. Konkretni stroški bodo torej določeni na podlagi naših drugih stroškov in prihodkov ter razpoložljivosti in cene potrebnih senzorjev in opreme na trgu. Ko bo projekt obsežen, bomo morali optimizirati proizvodnjo. Posameznikom in organizacijam s posebnimi zahtevami lahko ponudimo tudi vnaprej pripravljene postaje po meri.

ANALIZA PODATKOV

ONESNAŽENOST ZRAKA V OKOLICI ŠOLE

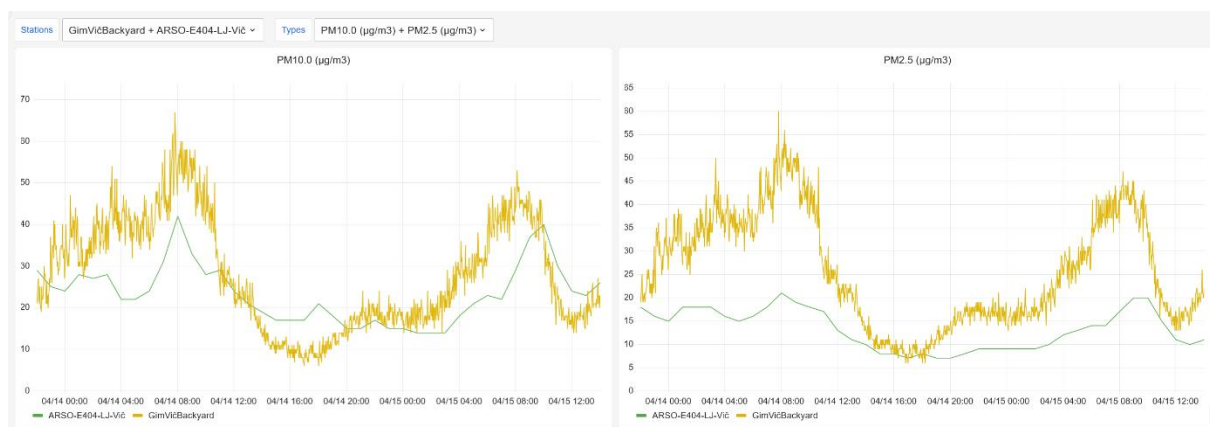
Naša šola se nahaja tik ob Tržaški cesti, eni glavnih ljubljanskih prometnic. Za prikaz delovanja in uporabe platforme smo se odločili, da bomo analizirali, kako promet vpliva na kakovost zraka v kraju, zato smo na naši šoli postavili merilno postajo, ki meri PM₁₀ in PM_{2.5} delce.



Slika 7: Meritve s šolske postaje, obrnjene na šolsko dvorišče (od 2022-04-13 do 2022-04-14)

Opažamo, da se koncentracija delcev PM_{10} in $PM_{2.5}$ prvič poveča okoli 21.00, kar je zelo verjetno posledica zaprtja bližnjega nakupovalnega središča, ponoči se pojavi nekaj skokov, zjutraj pa tudi velik skok, ki ga povzročijo ljudje, ki se vozijo na delo. Čez dan je bila koncentracija večinoma nizka.

Vzpostavili smo tudi uvoz urnih meritev, ki jih zagotavlja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO)¹, tako da je mogoče naše postaje primerjati z uradnimi in strokovnimi meritvami. Postaje ARSO se nahajajo na različnih lokacijah v Sloveniji, zato je mogoče njihove meritve neposredno primerjati z našimi.



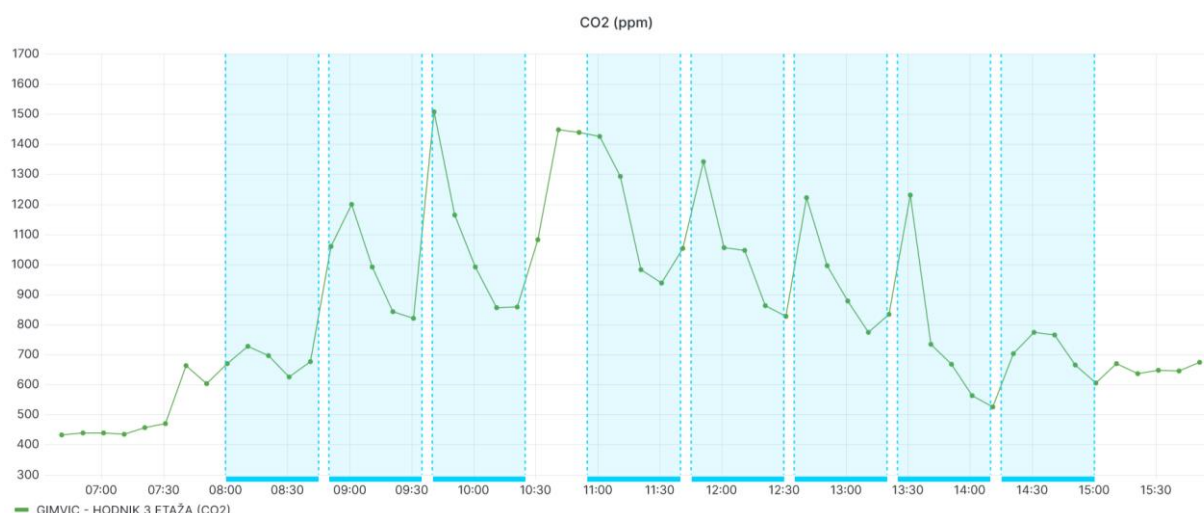
Slika 8: Primerjava med šolsko postajo in postajo ARSO na istem območju (od 2022-04-13 do 2022-04-14)

Naše meritve večinoma kažejo višje koncentracije, vendar še vedno sledijo enakim trendom kot uradna postaja. Razlog za to je, da je postaja ARSO precej bolj oddaljena od ulice (približno 1 km), medtem ko je naša postaja oddaljena le eno stavbo. Iz naših grafov je tudi razvidno, da na delce $PM_{2.5}$ veliko bolj vpliva oddaljenost od vira (ceste) kot na delce PM_{10} .

¹ Dostopno na: <https://www.arso.gov.si/zrak/kakovost%20zraka/>

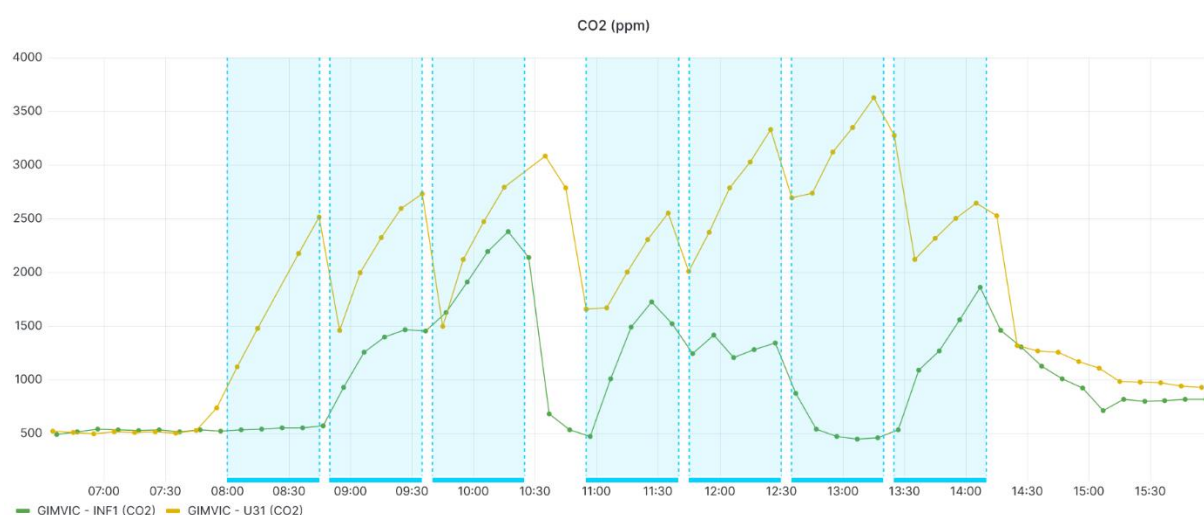
KAKOVOST ZRAKA V ŠOLSKIH PROSTORIH

Na našo platformo smo prav tako povezali obstoječe komercialne senzorje, ki so nameščeni v nekaterih šolskih prostorih, in merijo koncentracijo CO₂, temperaturo in vlago. Senzorji komunicirajo prek protokola LoRaWAN, ki je namenjen za brezžično komunikacijo na večje razdalje z majhno porabo energije, zato smo postavili tudi dodaten strežnik, ki podatke pretvarja v ustrezen format.



Slika 9: Meritve koncentracije CO₂ na šolskem hodniku (2023-04-05)

Ena izmed šolskih merilnih postaj je postavljena na hodniku in meritve pošilja na vsakih 10 minut. Na meritvah za posamezni delovni dan lahko opazimo, da koncentracija CO₂ sprva narašča pred začetkom pouka (8:00), nato pada med potekom ure (modre oznake), ko je večina dijakov v razredih, ter ponovno narašča v času odmorov. Pouk se je za večino dijakov končal s 7. uro (14:10), zato je po tem času opazna ponovna rast koncentracije.



Slika 10: Meritve koncentracije CO₂ v učilnicah (2023-04-05)

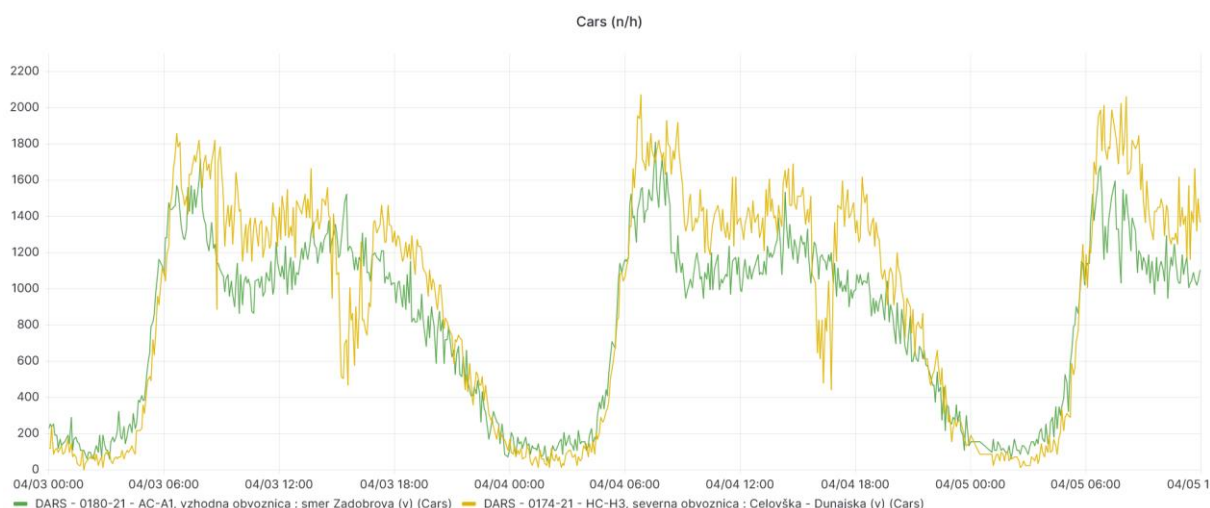
Na grafu koncentracije CO₂ v učilnicah lahko prav tako jasno vidimo, kdaj je potekal pouk in kdaj so bile učilnice prezračene. V učilnici INF1 se je pouk začel šele 2. uro (8:50), ko je viden

tudi začetek naraščanja koncentracij, ter ni potekal 6. uro (12:35–3:20), ko so bile koncentracije precej nizke. Prav tako lahko vidimo, da se je pouk v obeh učilnicah zaključil 7. uro (14:10), ko so začele koncentracije padati. Glede na padce koncentracije CO₂ lahko sklepamo tudi, da so učilnice prezračevali večinoma med odmori, razen v učilnici INF1 v odmoru med 2. in 3. uro (9:35–4:40), ko padec koncentracije ni opazen.

Vse meritve s postaj so na voljo tudi na naši spletni strani (<https://zrak.gimvic.org/>). S tem smo drugim dijakom in profesorjem zagotovili dostop do podatkov o kvaliteti zraka v učilnicah in jim omogočili, da jih bodo lahko lažje primerno prezračevali.

ŠTEVCI PROMETA NA SLOVENSKIH CESTAH

Za prikaz zmožnosti naše platforme za obdelavo in prikazovanje drugih vrst podatkov smo povezali tudi podatke iz števcov prometa na nekaterih slovenskih cestah, ki jih ponuja DARS v okviru projekta Nacionalna točka dostopa (NAP)². Števci zbirajo podatke o številu vozil na uro, hitrosti vozil ter povprečnemu razmiku med vozili. Podatke zbiramo na vsakih 5 minut in jih uvažamo v našo platformo.



Slika 11: Število vozil na ljubljanski vzhodni in severni obvoznici (od 2023-04-03 do 2023-04-05)

² Dostopno na: https://nap.si/sl/datasets_details?id=73801765-285d-4fe8-950a-d8182a07d656



Slika 12: Hitrost vozil na ljubljanski vzhodni in severni obvoznici (od 2023-04-03 do 2023-04-05)

Vidimo lahko, da na obeh obvoznicah promet najbolj upade ponoči (med 00:00 in 4:00). Na grafu hitrosti lahko opazimo veliko zmanjšanje na severni obvoznici vsak dan med približno 6:00 in 9:00 ter 15:00 in 17:00, kar ustreza jutranji in popoldanski prometni konici. Zmanjšanje hitrosti je zjutraj opazno tudi na vzhodni obvoznici, vendar ni tako drastično.

PRIHODNJI RAZVOJ

Ker bo naš projekt uporabljalo vedno več ljudi, bomo morali izboljšati proizvodni proces in poiskati zanesljive dobavitelje za senzorce in druge proizvodne materiale. Prav tako bomo morali začeti izdelovati izdelek v večjem obsegu in najti zanesljivo dostavno službo, ki ga bo dostavila strankam.

Na področju programske opreme nameravamo izboljšati kakovost kode, da jo bodo lahko drugi lažje razumeli in prispevali k njej, ter izboljšati učinkovitost kode in jo dodatno optimizirati za veliko količino podatkov. V bližnji prihodnosti načrtujemo tudi izvajanje nekaterih posebnih funkcij, ki jih zaradi omejenega časa še nismo mogli izvesti, ter večjo odprtost in dobro dokumentiranost API. Po potrebi bomo optimizirali platformo, da bo omogočala večje število hkratnih povezav iz vseh merilnih postaj.

Ker bo na platformo dodanih vedno več postaj, lahko prikaz vseh postaj naenkrat postane nepregleden za raziskovalce, ki se morajo osredotočiti le na določeno območje. Da bi rešili to vprašanje, bomo na spletnem mestu uvedli boljše nadzorne mehanizme, ki bodo uporabnikom omogočali prikazovanje samo postaj, ki izpolnjujejo določena merila, ter shranjevanje in organiziranje postaj v različne projekte/skupine. Menimo, da bodo te funkcije postale zelo uporabne, ko bo na platformo priključenih več postaj. Da bi olajšali izvajanje analiz naših podatkov, lahko obstoječa odprta znanstvena in analitična orodja vključimo neposredno na naše spletno mesto ter zagotovimo integracijo z obstoječimi storitvami zbiranja in analiziranja podatkov. Prav tako nameravamo izboljšati integracijo z Grafano za prikaz postaj in meritev. Za naprednejše analize lahko zagotovimo enostavne odjemalce API v različnih programskih jezikih in drugih orodjih. Načrtujemo tudi, da se bomo povezali z raziskovalci in ugotovili,

katere specifične podatke najbolj potrebujejo in v kakšni obliki, da bi nato platformo optimizirali glede na njihove potrebe.

V sodelovanju z raziskovalnimi in izobraževalnimi ustanovami lahko razvijemo izobraževalno spletno stran, na kateri uporabnike poučimo o problemu onesnaženosti zraka. Poleg našega glavnega spletnega mesta (ki je večinoma namenjeno obstoječim uporabnikom platform, ki imajo v lasti postajo, in raziskovalcem) lahko ustvarimo spletno mesto, ki manj izkušenim ljudem in širši javnosti omogoča ogled meritev kakovosti zraka na njihovem lokalnem območju. To bo omogočilo opozarjanje ljudi v primeru preseženih koncentracij onesnaževal v zraku (nad priporočenimi smernicami Svetovne zdravstvene organizacije), njihovo izobraževanje o onesnaženosti zraka, širjenje ozaveščenosti o kakovosti zraka v povezavi z zdravstvenimi vprašanji ter promocijo naše storitve.

Da bi rešili težave zaradi prevelike obremenitve glavnih strežnikov platforme, bi lahko uvedli sistem več porazdeljenih strežnikov, vključno s strežniki, ki jih gostijo uporabniki sami, in poljavnimi strežniki, ki jih gostijo raziskovalne ustanove, ki bi redno sinhronizirali podatke z vsemi drugimi strežniki v omrežju. S takšnim sistemom bi lahko ohranili relativno obremenitev naših glavnih strežnikov, hkrati pa bi še vedno dosegli naš cilj javnih in dostopnih podatkov za vse raziskovalce.

Ko se projekt začne izvajati, ni razloga, da bi bil omejen le na meritve kakovosti zraka. Naša razširljiva zasnova API že omogoča uporabo meritev, ki niso povezane z zrakom. Med drugim že zdaj zbiramo in prikazujemo podatke iz števcev prometa na slovenskih cestah. Po potrebi lahko naše spletno mesto optimiziramo tudi za prikaz takih meritev. Povezali se bomo z drugimi raziskovalnimi ustanovami, da bi ugotovili, kje je mogoče platformo tudi uporabiti.

ZAKLJUČEK

Glavni edinstveni vidik našega projekta je, da uporabnikov ne omejuje na nobeno določeno merilno postajo in jim omogoča, da opremo popolnoma prilagodijo svojim potrebam. Za uporabnike, ki želijo le sodelovati v platformi, pa zagotavljamo tudi vnaprej pripravljen izdelek in komplet "naredi sam", pri čemer še vedno ohranjamo nizko ceno. To pomaga projektu, da pritegne uporabnike vseh vrst in omogoči lažjo rast.

Na začetku bo naš izdelek namenjen posameznikom in določenim javnim ustanovam. Z razvojem platforme bo raziskovalcem na voljo vedno več podatkov, kar bo povečalo znanstveno in tržno vrednost projekta. Pridobivanje povratnih informacij od posameznikov in raziskovalnih organizacij nam bo omogočilo nenehno izboljševanje naše platforme, da bo boljša in še bolj uporabna za različne uporabnike.

Povezali se bomo z lokalnimi skupnostmi in klubi, ki nam bodo pomagali pri promociji projekta, ter na oddaljenih lokacijah namestili merilne naprave in tako povečali pokritost s podatki.

ZAHVALE

Zahvaljujemo se naši mentorici Alenki Mozer za pomoč in podporo pri projektu, ter prof. dr. Griši Močniku za seznanitev s problemom onesnaženosti zraka.

BIBLIOGRAFIJA

- [1] World Health Organization, "WHO global air quality guidelines," 2021. [Online]. Available: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1371692/retrieve>. [Accessed 11 05 2022].
- [2] World Health Organization, "Air pollution," [Online]. Available: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>. [Accessed 11 05 2022].
- [3] World Health Organization, "Household air pollution and health," 22 09 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>. [Accessed 11 05 2022].
- [4] World Health Organization, "Ambient (outdoor) air pollution," 22 09 2021. [Online]. Available: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [Accessed 11 05 2022].
- [5] L. Lattanzio, "Particulate Matter Sensing for Air Quality Measurements," 27 12 2018. [Online]. Available: <https://www.fierceelectronics.com/components/particulate-matter-sensing-for-air-quality-measurements>. [Accessed 11 05 2022].
- [6] S. Bliss, Best Practices Guide to Residential Construction, John Wiley & Sons, 2006.