

# Mreže senzora za praćenje koncentracije suspendovanih čestica u vazduhu

Uzahir Ramadani  
*Institut za nuklearne nauke Vinča,  
 Institut od nacionalnog značaja za  
 Republiku Srbiju, Univerzitet u  
 Beogradu*  
 Beograd, Republika Srbija  
[uzahir@vin.bg.ac.rs](mailto:uzahir@vin.bg.ac.rs)  
 0000-0002-3702-0094

Ivan Lazović  
*Institut za nuklearne nauke Vinča,  
 Institut od nacionalnog značaja za  
 Republiku Srbiju, Univerzitet u  
 Beogradu*  
 Beograd, Republika Srbija  
[ivan.lazovic@vin.bg.ac.rs](mailto:ivan.lazovic@vin.bg.ac.rs)  
 0000-0002-3877-5157

Slobodan Radojević  
*Mašinski fakultet, Univerzitet u  
 Beogradu*  
 Beograd, Republika Srbija  
[sradojevic@mas.bg.ac.rs](mailto:sradojevic@mas.bg.ac.rs)  
 0000-0003-1845-4441

Marija Živković  
*Institut za nuklearne nauke Vinča,  
 Institut od nacionalnog značaja za  
 Republiku Srbiju, Univerzitet u  
 Beogradu*  
 Beograd, Republika Srbija  
[marijaz@vin.bg.ac.rs](mailto:marijaz@vin.bg.ac.rs)  
 0000-0002-3415-5145

Milena Jovašević-Stojanović  
*Institut za nuklearne nauke Vinča,  
 Institut od nacionalnog značaja za  
 Republiku Srbiju, Univerzitet u  
 Beogradu*  
 Beograd, Republika Srbija  
[mjovst@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovst@vin.bg.ac.rs)  
 0000-0003-0765-6603

Miloš Davidović  
*Institut za nuklearne nauke Vinča,  
 Institut od nacionalnog značaja za  
 Republiku Srbiju, Univerzitet u  
 Beogradu*  
 Beograd, Republika Srbija  
[davidovic@vin.bg.ac.rs](mailto:davidovic@vin.bg.ac.rs)  
 0000-0003-2438-0231

**Abstract**— Kontinuirano praćenje nivoa zagađujućih materija u vazduhu kao što su suspendovane čestice od izuzetne je važnosti kako bi se mogle preduzeti odgovarajuće mere zaštite životne sredine i zdravlja ljudi. Unapređenje sistema nadzora ovih zagađujućih materija, uz korišćenje novih tehnologija kao što su senzorske mreže i kompaktni senzori, može biti od značaja za smanjenje njihovog negativnog uticaja na životnu sredinu i ljudsko zdravlje. Primenjene u senzorskim mrežama ove tehnologije omogućavaju kontinualno prikupljanje podataka sa više senzorskih jedinica, a jedna od glavnih prednosti je ta što su senzorske jedinice dostupne po pristupačnijim cenama nabavke i održavanja u odnosu na uređaje koji se koriste u tradicionalnom monitoringu. Međutim, ovim pristupačnim senzorskim mrežama često nedostaje rigorozan sistem kvaliteta i kasnija mogućnost poređenja sa postojećim referentnim stanicama za monitoring, što otežava pouzdano izveštavanje o rezultatima njihovih merenja. U ovom istraživanju akcenat je stavljen na opis dela procedura koje su korišćene za utvrđivanje stepena metrološke sledljivosti dve novouspostavljene mreže senzora za praćenje koncentracije suspendovanih čestica, od kojih je jedna bila namenjena širem gradskom području u gradu Novom Sadu, dok je druga bila namenjena istovremenom praćenju aerozagađenja u spoljašnjoj sredini i u unutrašnjem prostoru u jednoj školskoj ustanovi u Beogradu.

**Ključne reči**—kvalitet vazduha, suspendovane čestice, metrološka sledljivost, senzorske mreže, mreže mešovitog kvaliteta (mixed quality networks)

## I. UVOD

Zagađujuće materije prisutne u vazduhu, kao što su čestice prašine, azotni oksidi, sumpor-dioksid, benzopireni i druge, mogu imati ozbiljne posledice po zdravlje ljudi i ekosistem u celini [1]. Poznato je da ove zagađujuće materije mogu izazvati

respiratorne probleme kao što su astma, bronhitis i druga oboljenja pluća [2]. Takođe, mogu doprineti povećanju rizika od kardiovaskularnih bolesti, kao i neuroloških problema [3]. Pored toga, mogu imati i štetan uticaj na životinjski i biljni svet, remeteći ekosistemske ravnoteže i time ugrožavajući biodiverzitet [4]. Do skoro, monitoring kvaliteta vazduha u Evropi i u Srbiji se zasnivao u bitnoj meri na praćenju usaglašenosti kroz prikupljanje podataka sa referentnih stanica za monitoring (sa standardnom propisanom preciznošću i tačnošću, u mrežama koje primenjuju kompleksne mere kontrole kvaliteta [5,6]). Iako je ovakav vid tradicionalnog monitoringa pouzdan, manjkavost dolazi u vidu male prostorne pokrivenosti koja je posledica troškova nabavke i održavanja ovakvih referentnih stanica. U Srbiji postoji 75 referentnih mernih stanica, od kojih se 37 nalazi u Beogradu, sa javno dostupnim preliminarnim, neverifikovanim podacima [7].

Dopunski uvid u stanje aerozagađenja nam mogu pružiti jeftini senzori za merenje kvaliteta vazduha koji ukoliko su upotrebljeni u senzorskoj mreži sa puno čvorova obezbeđuju podatke sa povećanom prostornom rezolucijom, ali za razliku od referentnih uređaja obezbeđuju podatke nižeg nivoa tačnosti, pa stoga interpretacija i obrada podataka imaju specifične izazove u poređenju sa tradicionalnim monitoringom.

Posmatrano u širem kontekstu senzorske mreže mogu predstavljati osnovu za mnoge pravce pozitivnog i održivog razvoja, omogućiti pristupačnu i efektanu digitalnu transformaciju, sa primenama koje se kreću od striktno regulisanih oblasti pa sve do „Interneta stvari“. Sa aspekta metrologije senzorske mreže za praćenje aerozagađenja nude nove mogućnosti i tehnike, kao što su kolokacija, on-the-fly kalibracija i samokalibracija mernih instrumenata, kao i detekcija i praćenje fluktuacija i epizoda zagađenja koje su zasnovane na brzo dostupnim podacima. Međutim, da bi podaci o zagađenju vazduha česticama osim što su dostupni bili i

Ovo istraživanje obezbeđeno je od strane Programa za istraživanje i inovacije Evropske unije Horizont Evropa po ugovoru o grantu 952433, H2020 VIDIS projekat, Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije po ugovoru broj 451-03-47/2023, -01/ 200017 i Gradske uprave grada Novog Sada po osnovu projekta "Mapiranje zagađenja vazduha atmosferskim česticama u vremenu bliskom realnom u Novom Sadu korišćenjem podataka sa senzorskih mreža i statističko/fizičkog modelovanja" broj ugovora VI-501-2/2022-35B-11.

pouzdati, potrebne su dobro zasnovane metrološke procene senzorskih mreža, procena propagacije merne nesigurnosti i opšte procene performansi kao i novi pristup korišćenju informacija i podataka u vezi sa pojedinačnim sensorima i njihovim interakcijama u mreži kako bi bio uspostavljen adekvatan sistem metrologije aerozagađenja. U ovom radu će akcenat biti stavljen na čestično aerozagađenje.

## II. USPOSTAVLJANJE MREŽE I TESTIRANJE PERFORMANSI

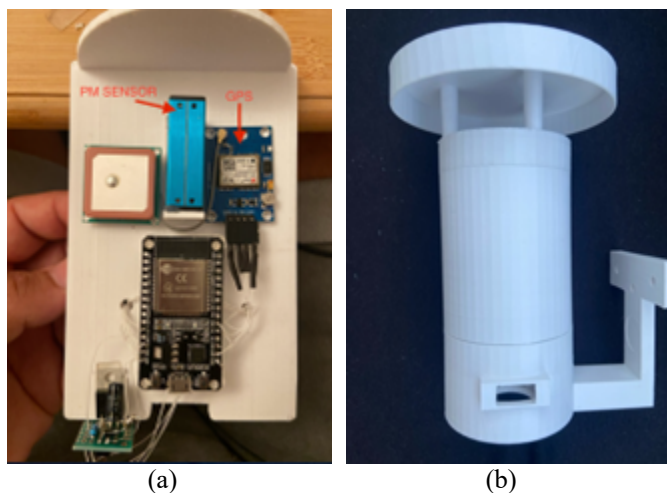
Za ovo istraživanje korišćeni su podaci sa informacione mreže senzora koju je Institut Vinča postavio na teritoriji grada Novog Sada za potreba praćenja aerozagađenja, sa krajnjim ciljem kontinuiranog kreiranja mapa aerozagađenja atmosferskim česticama u vremenu bliskom realnom. Akcenat je stavljen na utvrđivanje metrološke sledljivosti novouspostavljene mreže senzora, kao i na mapiranje aerozagađenja u vremenu bliskom realnom.

Problem relativno niske prostorne rezolucije podataka o čestičnom aerozagađenju na teritoriji Novog Sada je rešavan uspostavljanjem mreže senzora, i pri tome je mreža mogla da pokriva do 20 lokacija od interesa na široj teritoriji grada. U finalnoj implementaciji je korišćeno 10 lokacija, od kojih svaka ima redundantnost u pogledu broja senzora kao i senzore sa dugoročno praćenom metrološkom sledljivošću. Merene su tri frakcije aerozagađujućih čestica  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$  a procenjene koncentracije su izražene u  $\mu g/m^3$ .

Druge uspostavljene mreže se može okarakterisati kao lokalna a obuhvata kombinovano merenje unutrašnje i spoljašnje sredine. Nalazi se na teritoriji grada Beograda i obuhvata merenja u krugu škole i unutar nje (hodnici i učionice).

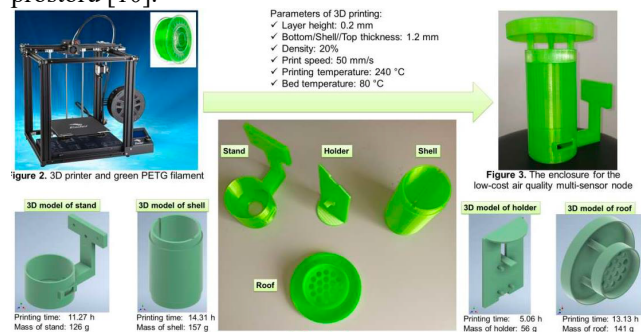
### A. Uređaj i mreže

Uređaji korišćeni u uspostavljenim mrežama za praćenje čestičnog aerozagađenja, su razvijeni u okviru VIDIS H2020 projekta. Razvijeni uređaji (VIDIS TURTLE) mere nekoliko parametara kvaliteta vazduha i to: koncentraciju suspendovanih čestica u vazduhu u 3 frakcije ( $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$ , i  $PM_{10}$ ), temperaturu, vlažnost i pritisak a postoji i mogućnost ugradnje senzora za praćenje gasovitih zagađujućih materija (npr. monoazotni oksidi  $NO_x$ , kao i  $CO$ ,  $CO_2$ ).



Sl. 1. Prikaz a) unutrašnjosti i b) spoljašnjosti uređaja VIDIS TURTLE 2023

Svi senzori su smešteni u kućište izrađeno tehnologijom 3D štampe, koje je opremljeno ventilatorom koji aktivno podstiče strujanje vazduha kroz senzore, poboljšavajući na taj način performanse uređaja. Uređaj u sebi ima ugrađen i GPS modul koji u svakom trenutku beleži svoju lokaciju, pa se VIDIS uređaj može koristiti i za mobilni monitoring, što predstavlja još jedan od pristupa praćenja kvaliteta vazduha koji za cilj imaju bolje upoznavanje prostorne raspodele [8,9]. Takođe, uz adekvatan odabir senzora (npr. praćenje koncentracije  $CO_2$  je relevantno za kvalitet vazduha u unutrašnjem prostoru), ovakav vid uređaj se može koristiti kako u spoljašnjoj sredini, tako i u unutrašnjem prostoru [10].



Sl. 2 Prvi prototip 3D štampanog kućišta VIDIS TURTLE uređaja.

### B. Mreža senzora u Novom Sadu

Serijski VIDIS TURTLE uređaji je postavljena na pažljivo odabrane lokacije u Novom Sadu (Slika 3), čiju je analizu bilo moguće izvršiti unapred korišćenjem rezultata mobilnog monitoringa [8]. Mreža uređaja obuhvata kako lokacije sa intenzivnim saobraćajem, tako i lokacije sa niskim intenzitetom saobraćaja, kao i lokacije gde je većina domaćinstava priključena na daljinski sistem grejanja i kontrastne lokacije sa velikim brojem individualnih ložišta. Na svakoj od lokacija su postavljeni i dodatni uređaji koji se mogu koristiti za transfer kalibracije. Uređaji za transfer kalibracije poseduju isti tip senzora kao i VIDIS TURTLE, ali su prethodno prošli kroz dugoročni period kalibracije na referentnoj stanici te se mogu koristiti za potrebe provere metrološke sledljivosti.



Sl. 3 a) Mapa lokacija mreže senzora u gradu Novom Sadu, b) Prikaz pojedinih lokacija

C. Mreža senzora u Vazduhoplovnoj akademiji u Beogradu

Ova mreža obuhvata 9 mernih mesta od kojih su 3 mesta u krugu škole orijentisana ka ulicama i dvorištu a 6 mernih mesta u prostorijama škole u hodnicima i učionicama, kao što je prikazano na slici 4.



Sl. 4 Lokacije senzora u Vazduhoplovnoj akademiji

III. METODOLOGIJA

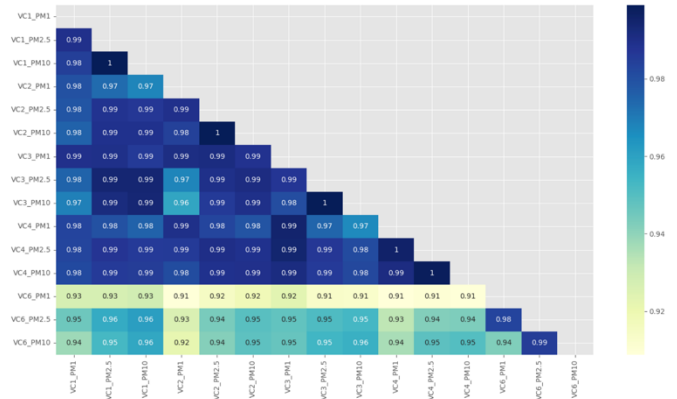
Metrološka sledljivost mreža senzora je ustanovljena kroz nekoliko komplementarnih metoda. Sprovedeno je nekoliko

procedura i kampanja merenja kako bi se stekao što bolji uvid u tačnost senzorske mreže:

- Inicijalno testiranje i kolokacija
- Kolokacija sa referentnim stanicama
- Transfer kalibracije

A. Inicijalno testiranje i kolokacija senzora

Kolokacija VIDIS TURTLE uređaja je izvršena u Institutu "Vinča" gde je potvrđena početna ispravnost svih uređaja pre



Sl. 5 Zajednička kolokacija uređaja radi provere ispravnosti

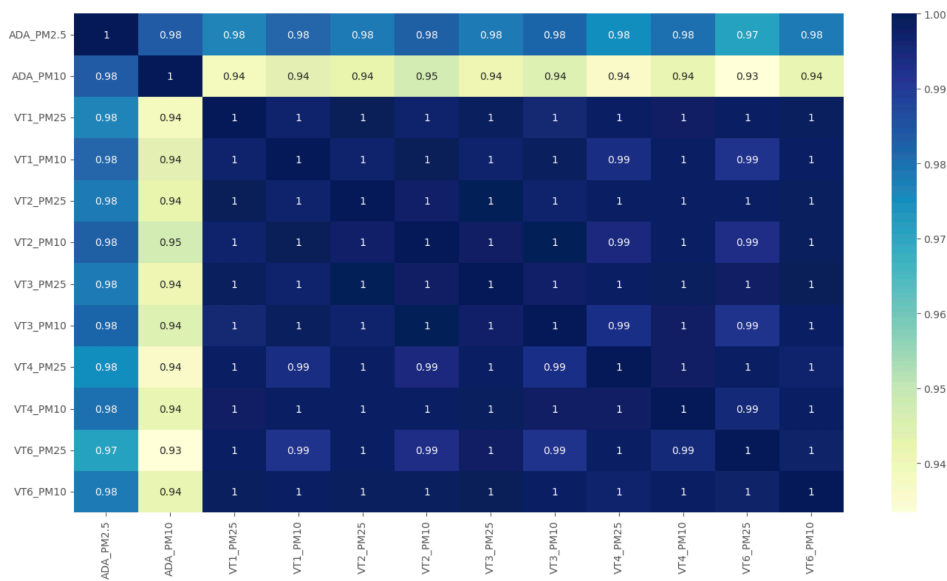
samog uspostavljanja mreže.

Na slici 5 se može videti visok nivo korelacije između samih uređaja.

B. Kolokacija sa referentnom stanicom

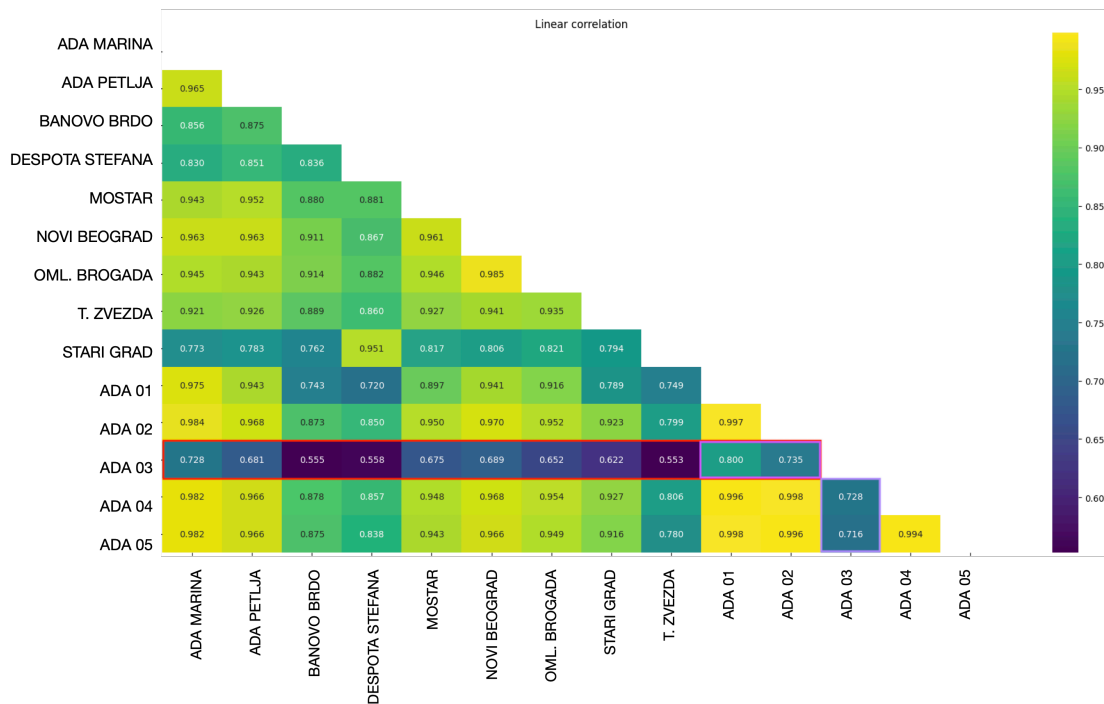
Pre samog uspostavljanja mreže senzora izvršena je kolokacija sa referentnom stanicom u cilju provere performansi uređaja.

Na slici 6a se takođe može videti da uređaji pokazuju visok nivo korelacije sa referentnom stanicom.



Sl. 6a) Kolokacija VIDIS TURTLE: VT1-VT6 sa referentnom stanicom ADA MARINA: ADA\_PM2.5 i ADA\_PM10;

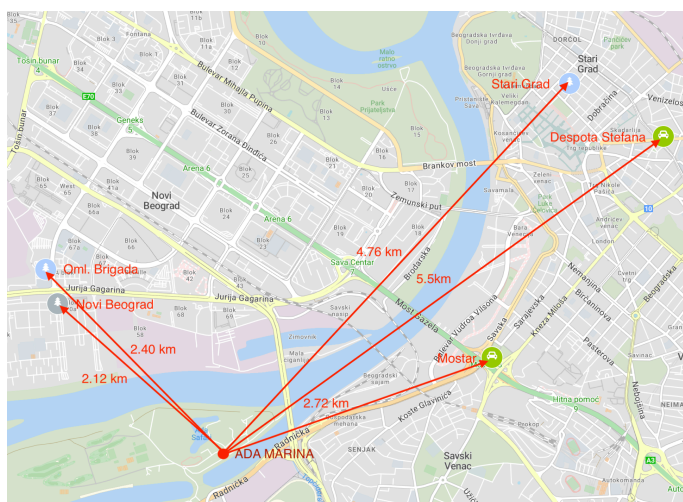




Sl. 6 b) Kolokacija VIDIS TURTLE: ADA 01 – ADA 05 sa referentnom stanicom ADA MARINA i upoređivanje sa obližnjim referentnim stanicama ADA PETLJA, BANOVO BRDO, DESPOTA STEFANA, MOSTAR, NOVI BEOGRAD, OMLADINSKIH BRIGADA, T. ZVEZDA i STARI GRAD

Osim sa referentnom stanicom sa kojom su kolocirani, ovi uređaji pokazuju visok nivo korelacije (Slika 6b) i sa referentnim stanicama koje su udaljene. Ove referentne stanice su udaljene po par kilometara od samih uređaja i različito su klasifikovane, što se može videti na slici 7.

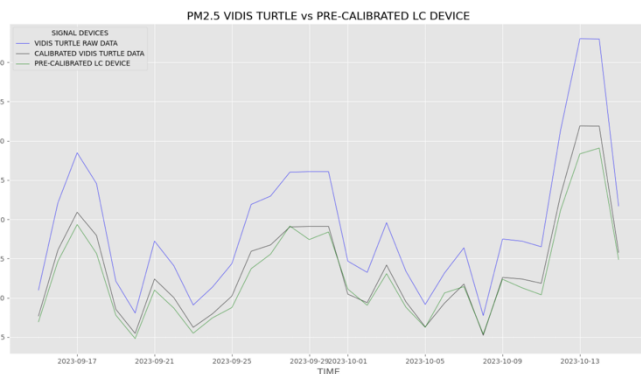
kalibraciju sa dugoročno testiranih senzora na novopostavljene senzore koristeći simultano prikupljene podatke (Slika 8) i proces šematski prikazan na Slici 9.



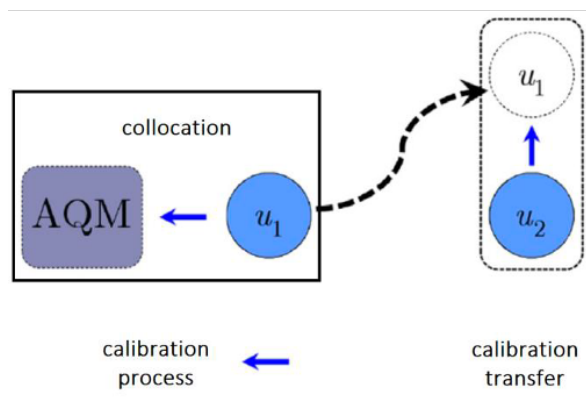
Sl. 7 Lokacije i udaljenost referentnih stanica

C. Transfer kalibracija

Senzori su nakon inicijalnog testiranja i kolokacije u Institutu "Vinča" kako bi se utvrdila njihova ispravnost, postavljeni na lokacije u Novom Sadu, zajedno sa sensorima koji su prošli dugotrajnu kampanju kalibracije sa referentnom stanicom. Na taj način, mreža poseduje ukupno više od 20 senzora, koji uzajamno obezbeđuju pravilan rad, i brz uvid u parametre kvaliteta vazduha. Takođe, moguće je izvršiti transfer



Sl. 8 Transfer kalibracija uporedni prikaz podataka - Novi Sad





Sl. 9 Šematski prikaz transfer kalibracije. Adaptirano iz [11] za slučaj transfera kalibracije koji koristi 2 čvora u mreži

wireless distributed air pollution sensor network. *Environmental Pollution*, 233, pp.900-909.

#### IV. ZAKLJUČAK

#### ABSTRACT

Uspostavljanje mreža senzora za praćenje aerozagađenja nam daje mogućnost da jednostavnije možemo doći do predstave o kvalitetu vazduha na nivou grada, naselja, škole, pa čak i na nivou prostorne rezolucije koja ide do pojedinačne prostorije u zgradi ukoliko se radi o praćenju kvaliteta vazduha u unutrašnjem prostoru. Međutim, prilikom saopštavanja rezultata merenja ovakvih mreža potrebno je jasno naznačiti da se radi o indikativnim merenjima koja su dobijena putem jeftinih senzorskih tehnologija. Ključna prednost ovakvih mreža je što mogu biti koristan dodatak tradicionalnim vidovima monitoringa, a stepen pouzdanosti proizilazi iz obilja podataka koje uspostavljena mreža može pružiti i metodama i modelima kalibracije i obrade podataka koji se mogu direktno primeniti i kasnije poboljšavati. Kroz state-of-the-art tehnike kalibracije i transfera kalibracije, čiji je kratak pregled izvršen u ovom radu, uređaj koje je razvio Institut Vinča može postići grešku merenja koja omogućava pouzdano praćenje dnevnih, mesečnih i godišnjih trendova. Ove metode omogućavaju da izmerene vrednosti budu što približnije onim vrednostima koje bi se dobile merenjima na referentnim stanicama.

Continuous monitoring of the level of pollutants in the air such as suspended particles is extremely important so that appropriate action can be taken in order to protect the environment and human health. Improving the monitoring of these pollutants, with the use of new technologies such as sensor networks and sensor miniaturization, can be important for reducing their negative impact on the environment and human health. Applied in sensor networks, these technologies enable continuous data collection from multiple sensor units, and one of the main advantages is that sensor units are available at more affordable cost compared to devices used in traditional monitoring. However, these accessible sensor networks often lack a rigorous quality control system and the subsequent possibility of comparison with existing reference monitoring stations, which makes it difficult to reliably report the results of their measurements. In this research, the emphasis was placed on the description of the procedures that were used to determine the degree of metrological traceability of the two newly established sensor networks for monitoring the concentration of suspended particles, one of which was targeting the wider urban area in the city of Novi Sad, while the other was used for the simultaneous monitoring of air pollution in indoor and outdoor environment in a school in Belgrade.

#### REFERENCE/LITERATURA

- [1] Dockery DW, Pope CA 3rd. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annu Rev Public Health*. 1994;15:107-32. doi: 10.1146/annurev.pu.15.050194.000543. PMID: 8054077.
- [2] WHO Regional Office for Europe. (2013). Health effects of particulate matter: Policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- [3] Pope, C. & Dockery, Douglas. (2005). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of Air & Waster Management Association*. 56. 709-742.
- [4] Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). *The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale*. *Nature*, 525(7569), 367–371. doi:10.1038/nature15371
- [5] Eurostat. (2020). Air quality in Europe - 2020 report. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>.
- [6] Targa, T., et al. Status report of air quality in Europe for year 2021, using validated and up-to-date data (Eionet Report–ETC/HE, 2022/3). 2023.
- [7] Agencija za zaštitu životne sredine, Objedinjeni prikaz automatskog monitoringa kvaliteta vazduha u republici Srbiji, <http://www.amskv.sepa.gov.rs/>
- [8] Просторно-временске варијације нивоа респирабилних честица у урбаној зони Новог Сада – мобилни мониторинг, моделовање и креирање мапа високе резолуције, <https://vidis-project.org/index.php/about/vidis-synergistic-projects/novi-sad-mobile-monitoring-project/>
- [9] Miloš Davidović, Milena Davidović, Sonja Dmitrašinović, Mileša Srećković, Milena Jovašević-Stojanović, "Primer kombinovanja raspodela atmosferskih aerosola po veličinama dobijenih metodom merenja električne pokretljivosti i optičkom metodom", ZBORNIK RADOVA, LXVI KONFERENCIJA ETRAN, Novi Pazar 6 - 9. juna 2022. ETRAN 2022 ISBN 978-86-7466-930-3
- [10] Tasić, V., Jovašević-Stojanović, M., Topalović, D., & Davidović, M. (2016, October). Measurement of PM2.5 Concentrations in Indoor Air Using Low-Cost Sensors and Arduino Platforms. In Proceedings of the 6 th Scientific Meeting EuNetAir (pp. 69-72).
- [11] Kizel, F., Etzion, Y., Shafran-Nathan, R., Levy, I., Fishbain, B., Bartonova, A. and Broday, D.M., 2018. Node-to-node field calibration of

#### Networks of sensors for monitoring the concentration of suspended particles in the air.

Uzahir Ramadani, Ivan Lazović, Slobodan Radojević, Marija Živković, Milena Jovašević-Stojanović, Miloš Davidović