

UDK: 614.71:681.325(045)=163.41

DOI: 10.5937/bakar2501055T

NAUČNI RAD

Oblast: Inženjerstvo zaštite životne sredine

Primljen: 25.03.2025.

Prerađen: 01.04.2025.

Prihvaćen: 15.04.2025.

**PRIMENA XGBOOST ALGORITMA ZA KALIBRACIJU
PRENOSNOG PAQMON 1.0 PM MONITORA U
USLOVIMA SPOLJAŠNJE SREDINE**

**XGBOOST-BASED CALIBRATION OF THE PORTABLE
PAQMON 1.0 PM MONITOR IN OUTDOOR CONDITIONS**

Dušan B. Topalović^{1a}, Ivana D. Smičiklas^{1b}, Mirjana B. Radenković^{1c},
Srboľjub Stanković^{1d}, Ivana Ź. Pepić^{1e,2}, Aca Božilov^{3a}, Milan Protić^{3b}

¹Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Institut za nuklearne
nauke „Vinča“ Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju,
Univerzitet u Beogradu, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11351 Beograd, Srbija

²Departman za fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu,
Trg Dositeja Obradovića 4, 21000 Novi Sad, Srbija

³Fakultet zaštite na radu, Univerzitet u Nišu, Čarnojevića 10a, 18000 Niš, Srbija

^{1a} E-mail: dusan.topalovic@vin.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5976-963X>

^{1b} E-mail: ivanat@vin.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7384-7312>

^{1c} E-mail: mirar@vin.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1055-4862>

^{1d} E-mail: srbas@vin.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6952-5604>

^{1e, 2} E-mail: ivana.pepic@vin.bg.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-0336-7660>

^{3a} E-mail: aca.bozilov@znrfak.ni.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7032-4789>

^{3b} E-mail: milan.protic@znrfak.ni.ac.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4957-7882>

Izvod

U ovom radu su ispitane mogućnosti primene XG kalibracione procedure za PAQMON 1.0 prenosnu platformu u terenskim uslovima. Iako je PAQMON 1.0 portabilna platforma u kojoj je moguća integracija dodatnih senzorskih modula, za potrebe ovog istraživanja je korišćena verzija koja je prilagođena za monitoring masenih koncentracija respirabilnih čestica, kao i meteoroloških parametara. Merenja su sprovedena u Boru, tokom grejnog (GP) i negrejnog (NGP) perioda, kako bi se uzele u obzir sezonske razlike u klimatskim uslovima i kvalitetu vazduha, pri čemu platforma nije pokazala značajniji drift signala i stabilno je funkcionisala bez kvarova. Korelacija $PM_{2.5}$ koncentracija sa referentnim Grimm EDM180 monitorom tokom GP iznosila je $R = 0.65$ ($p \leq 0.001$) i $R = 0.40$ ($p \leq 0.001$) tokom NGP. Primena XGBoost (XG) modela je u značajnoj meri poboljšala tačnost $PM_{2.5}$ merenja u poređenju sa linearnim regresionim modelima. Dobijene vrednosti $adjR^2$ bile su 0.68 za GP i 0.44 za NGP, dok su NRMSE vrednosti varirale od 0.43 do 0.83. Iako su performanse XG modela bile nešto slabije tokom NGP, kalibracija ovom metodom omogućila je PAQMON 1.0 platformi da dostigne DQO od 50% tokom obe kampanje merenja. Rezultati potvrđuju praktičnu primenljivost XG kalibracije za unapređenje preciznosti jeftinih senzorskih sistema prilikom monitoringa kvaliteta vazduha.

Ključne reči: XGBoost, kalibracija, monitoring

Abstract

This study examines the applicability of the XG calibration procedure for the PAQMON 1.0 portable platform in field conditions. Although PAQMON 1.0 is designed to accommodate additional sensor modules, this study utilized a version adapted explicitly for monitoring respirable particulate matter concentrations and meteorological parameters. Measurements were conducted in Bor, Serbia, during both the heating (GP) and non-heating (NGP) periods to account for seasonal climate and air quality variations. The platform demonstrated stable performance without significant signal drift or hardware failures. The correlation between $PM_{2.5}$ concentrations and the reference Grimm EDM180 monitor was $R = 0.65$ ($p \leq 0.001$) during GP and $R = 0.40$ ($p \leq 0.001$) during NGP. The application of the XGBoost (XG) model significantly improved the accuracy of $PM_{2.5}$ measurements compared to linear regression models. The adjusted R^2 values were 0.68 for GP and 0.44 for NGP, while NRMSE values ranged from 0.43 to 0.83. Although the XG model exhibited slightly lower performance during NGP, its calibration enabled the PAQMON 1.0 platform to achieve a Data Quality Objective (DQO) of 50% in both measurement campaigns. These findings confirm the practical applicability of XG calibration for enhancing the accuracy of low-cost sensor systems in air quality monitoring.

Keywords: XGBoost, calibration, monitoring

1. UVOD

Zagađenje vazduha, naročito izloženost finim ($PM_{2.5}$) respirabilnim česticama, predstavlja jednu od najvećih pretnji po ljudsko zdravlje [1]. Ove čestice su povezane sa respiratornim bolestima i povećanom stopom prevmene smrtnosti [2-4]. Kako bi se umanjili štetni efekti zagađenja i u cilju zaštite javnog zdravlja, na nivou Evropske unije (EU) usvojena je Direktiva [5] koja bi trebala da doprinese smanjenju nivoa $PM_{2.5}$ i drugih zagađivača. Pouzdane metode procene izloženosti zagađenju vazduha finim česticama su ključne za adekvatno sagledavanje negativnih zdravstvenih efekata [6]. Takođe, precizna procena izloženosti od suštinskog je značaja za donosiocce odluka prilikom definisanja različitih strategija za redukciju emisija i ublažavanje posledica zagađenja [7]. Tradicionalne stanice za monitoring kvaliteta vazduha (Air Quality Monitoring Station-AQMS), koje su u Republici Srbiji pod kontrolom Agencije za zaštitu životne sredine (Serbian Environmental Protection Agency-SEPA), pružaju precizne podatke o koncentracijama $PM_{2.5}$. Međutim, zbog stacionarnog karaktera i visokih troškova održavanja, one su ograničene na mali broj lokacija i samim tim ne omogućavaju adekvatnu procenu prostorne zavisnosti zagađenja [6].

Zbog toga, paralelno sa razvojem novih tehnologija, sve više se istražuju alternativne metode za procenu koncentracija $PM_{2.5}$ [8]. Ove metode se obično zasnivaju na korišćenju malih i relativno jeftinih optičkih merača i senzora koji omogućavaju prikupljanje podataka visoke prostorne i vremenske rezolucije [9]. Većina optičkih senzora za $PM_{2.5}$ se karakterišu relativno brzim odzivom i malom potrošnjom energije [10]. Ovi senzori konvertuju svetlosni signal u električne impulse, čime se određuju broj i veličina čestica, dok se masena koncentracija izračunava algoritmom na osnovu brojčane koncentracije, gustine,

težinskog faktora, indeksa refrakcije i higroskopnosti [10]. Dosadašnja istraživanja su pokazala da mnogi spoljašnji faktori utiču na kvalitet merenja uključujući i meteorološke uslove, poput temperature (T) i relativne vlažnosti (RH) [11,12]. Takođe, zanimljivo je napomenuti da konverzija brojčane u masenu koncentraciju zavisi od godišnje sezone kada se sprovodi merenje [13]. Dakle, jedan od glavnih izazova u primeni jeftinih optičkih merača se odnosi na obezbeđivanje adekvatnog kvaliteta rezultata merenja [14]. U vezi sa tim, evropski propisi [5] zahtevaju da merna nesigurnost indikativnih merenja za $PM_{2.5}$ ne prelazi 50% (Data Quality Objective-DQO).

Razvoj naprednih metoda kalibracije i validacije ključan je za smanjenje merne nesigurnosti senzorski merenja [11]. Tradicionalno, kalibracija u laboratorijskim uslovima koristi univarijantnu linearnu regresiju (ULR), koja pretpostavlja linearnu zavisnost između senzorskih i referentnih merenja. Međutim, u složenijim uslovima spoljašnje sredine primenjuju se multivarijantna linearna regresija (MLR) [15] i višedimenzionalni modeli za opisivanje nelinearnih odnosa između prediktora i ciljnih varijabli [16]. U poslednje vreme, sve češće se koriste nelinearni modeli zasnovani na XGBoost (XG) regresiji, koji pokazuju sposobnost dobre generalizacije [17].

U ovom radu ispitane su performanse Shandong Nova SDS011 optičkog senzora za određivanje koncentracije $PM_{2.5}$, koji je integrisan u PAQMON 1.0 (kodna oznaka u radu-N21) platformu. Ova platforma je razvijena u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor, Republika Srbija, i uključuje i senzor za temperaturu i relativnu vlažnost. U okviru ove studije, tačnost senzora je testirana u terenskim uslovima tokom grejnog i negrejnog perioda merenja u Boru. Kalibracija jeftinog (Low Cost Sensor-LCS) senzora izvršena je primenom ULR, MLR i XG modela, a zatim su analizirani i upoređeni dobijeni rezultati.

2. MATERIJALI I METODE

2.1 Opis kampanja merenja

Outdoor kampanje merenja su sprovedene u Boru. Bor je industrijski centar sa razvijenom rudarskom, metalском i prerađivačkom industrijom, tako da je glavni izvor aerozagađenja rudarsko-metalurški kompleks, koji uključuje topionicu bakra [18-20]. Proces topljenja bakra dovodi do emisije različitih zagađivača vazduha, kao što su između ostalog i respirabilne čestice [18]. Dodatno, značajan doprinos emisiji respirabilnih čestica dolazi i od sagorevanja fosilnih goriva (ugalj) tokom grejne sezone. Da bi se istražio uticaj promene kompozicije i koncentracije respirabilnih čestica na rad LCS-a i performanse kalibracionih modela, sprovedene su dve kampanje merenja. Prva kampanja je obuhvatila grejni period (GP) od 30. marta 2021. god. do 8. aprila 2021. god., dok je druga kampanja obuhvatila negrejni period (NGP) od 31. maja 2021.

god. do 7. juna 2021. god. PAQMON 1.0 platforma je bila kolocirana sa Grimm EDM180 PM monitorom na automatskoj mernoj stanici Gradski park (44° 4' 33" N, 22° 5' 58" N) koja je u sastavu državne mreže monitoringa kvaliteta vazduha Republike Srbije.

2.2 Razvoj i evaluacija modela

Korišćene su dve vrste kalibracionih modela koji se zasnivaju na linearnoj (ULR, MLR) i XG regresiji. ULR predstavlja statističku metodu modelovanja linearnog odnosa između zavisne (targetne) varijable i nezavisne (prediktorske) varijable:

$$z_i = w_0 + w_1 x_i + \varepsilon_i, \quad i = \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

gde je n -broj statističkih jedinica, z_i je zavisna varijabla, x_i je nezavisna varijabla, w_0 (intercept) i w_1 (slope) su regresioni koeficijenti, dok je ε_i neopservirana slučajna varijabla (greška modela) koja unosi šum između z i x . Ukoliko je potrebno modelovati linearnu zavisnost između jedne targetne varijable i više prediktorskih varijabli, tada se umesto ULR koristi MLR statistička metoda koja se može predstaviti sledećom jednačinom:

$$z_i = w_0 + w_1 x_{i,1} + \dots + w_k x_{i,k} + \varepsilon_i = \mathbf{x}_i^T \mathbf{w} + \varepsilon_i, \quad i = \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

gde je k broj prediktorskih varijabli, a $\mathbf{x}_i^T \mathbf{w}$ predstavlja unutrašnji proizvod vektora $\mathbf{x}_i^T$ i $\mathbf{w}$.

Sa druge strane, XG je skalabilan algoritam ansambla zasnovan na stablima odlučivanja koji koristi gradijentno pojačanje [17]. Ovo je iterativni model koji počinje početnom predikcijom, koja se često podešava na nulu. Nakon toga, svako novo stablo se dodaje kako bi se smanjile greške. Matematički, model se može predstaviti kao:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), \quad (3)$$

gde je $\hat{y}_i$ konačna predviđena vrednost za i -ti uzorak, K je broj stabala u ansamblu, a $f_k(x_i)$ predstavlja predikciju k -tog stabla za i -ti uzorak. Objektna funkcija XG algoritma sastoji se iz dva dela: funkcije gubitka i regularizacionog člana. Funkcija gubitka meri koliko dobro model odgovara podacima, dok regularizacioni član pojednostavljuje kompleksna stabla. Opšti oblik funkcije gubitka je:

$$\text{obj}(\theta) = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k), \quad (4)$$

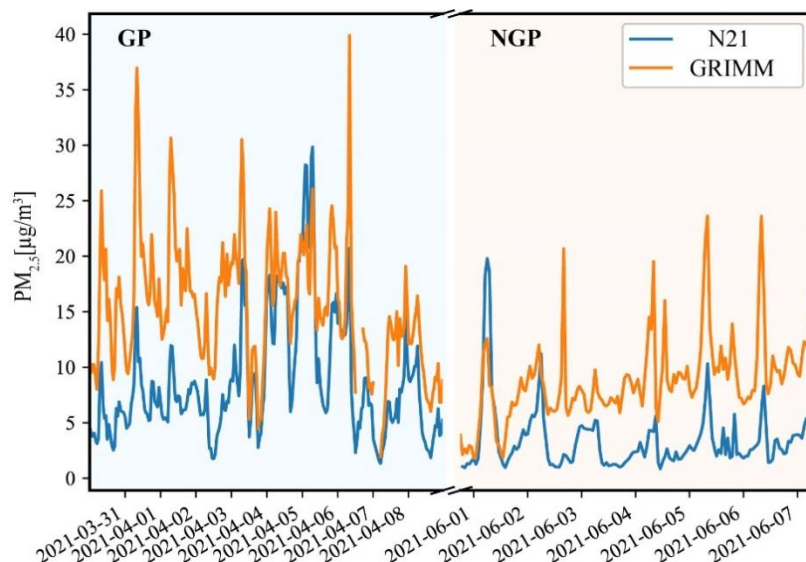
gde je $l(y_i, \hat{y}_i)$ funkcija gubitka koja računa razliku između stvarne i predviđene vrednosti, dok je

$\Omega(f_k)$ regularizacioni član koji sprečava prekomerno prilagođavanje modela složenim stablima. Za ULR i MLR ne postoje hiperparametri koji bi se podešavali tokom validacije. Sa druge strane, za XG model je izvršeno

podešavanje hiperparametra pomoću grid procedure koja evaluira sve moguće kombinacije unapred definisanih vrednosti hiperparametara. Za evaluaciju rezultata modela korišćena su dva standardna statistička testa: 1) indeks slaganja $\text{adj}R^2$ i 2) srednja kvadratna greška (NRMSE) koja je normalizovana interkvartilnim opsegom referentnih merenja.

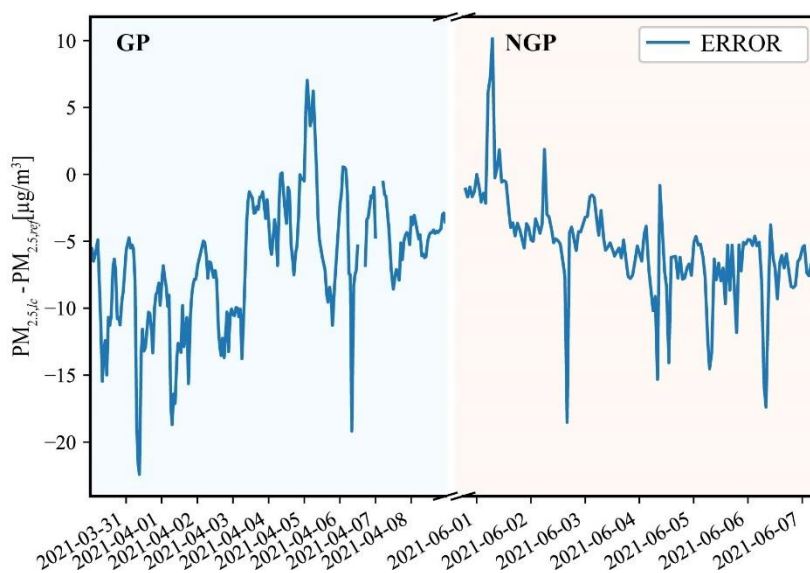
3. REZULTATI I DISKUSIJA

Slika 1 prikazuje $\text{PM}_{2.5,lc,ref}$ vremenske serije dobijene pomoću PAQMON 1.0 platforme i GRIMM EDM180 monitora. Merenja su imala 1h vremensku rezoluciju i na slici su predstavljeni rezultati za GP i NGP. Generalno, tokom kampanje merenja LCS-ovi (NOVA SDS011 i AM2302/DHT22) integrisani u PAQMON 1.0 platforme su bili stabilni, pouzdani i bez očiglednih grešaka što je u saglasnosti sa prethodnim istraživanjima. S obzirom da je procenat uzoraka sa nedostajućim vrednostima tokom oba perioda merenja bio mali, iskorišćeno je listwise uklanjanje uzoraka. Nakon toga, analizirano je da li postoje outlajeri u vremenskim serijama varijabli kvaliteta vazduha. Sa slike 1 se mogu primetiti vrednosti u podacima za $\text{PM}_{2.5,lc,ref}$ varijable koje tokom oba perioda u značajnijoj meri odstupaju od ostalih rezultata merenja. Povišene vrednosti se najverovatnije javljaju usled aktivnosti topionice bakra, ali i sagorevanja fosilnih goriva naročito u GP [18].



Sl. 1. Rezultati merenja za $\text{PM}_{2.5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] koja su sprovedena pomoću PAQMON 1.0 platforme i GRIMM EDM180 monitora tokom GP i NGP

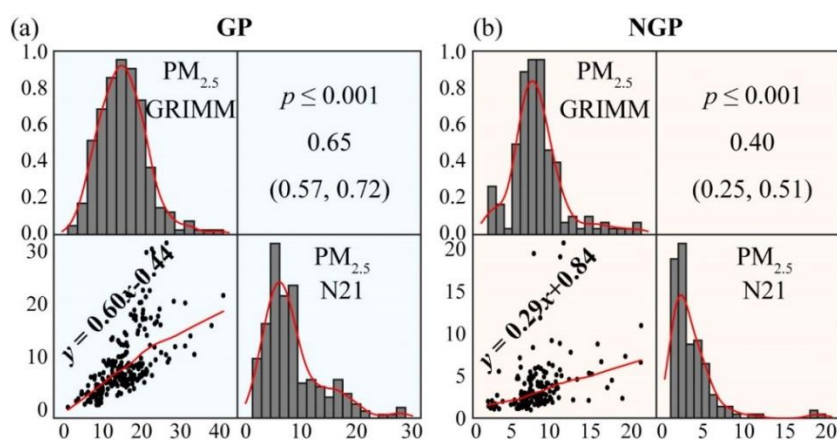
Ukoliko se uporede sa greškom merenja senzora iz PAQMON 1.0 platforme sa slike 2, jasno se uočava da su upravo u periodima incidentnih povećanja koncentracije polutanata (koncentracije za $PM_{2.5,ref}$ veće od $20 \mu g/m^3$) zabeležene i najveće greške u merenjima koje u uobičajenim situacijama ne prelaze približno $\pm 15 \mu g/m^3$ za $PM_{2.5,lc}$. Sa slike 2 se takođe može jasno videti da su tokom većeg dela kampanje merenja, i u GP i u NGP, izmerene vrednosti za $PM_{2.5,lc}$ bile niže u odnosu na $PM_{2.5,ref}$. Potcenjivanje vrednosti koncentracija se vrlo verovatno javlja zbog činjenice da ventilatori NOVA SDS011 senzora nisu imali snagu za uspostavljanje dovoljno visokog protoka vazduha unutar PAQMON 1.0 kućišta.



Sl. 2. Vremenska serija greške (ERROR) merenja PAQMON 1.0 platforme tokom GP i NGP

Na slici 3, podaci dobijeni pomoću PAQMON 1.0 platforme (N21) su upoređeni sa podacima sa GRIMM EDM180 monitora. Na glavnoj dijagonali slike se nalaze histogrami varijabli sa odgovarajućim Kernel Density Distribution (KDD) funkcijama. Na donjoj dijagonali matrica prikazani su scatter plot-ovi sa Locally Weighted Regression (LWR) funkcijama. NOVA SDS011 senzor je pokazao visok stepen korelacije sa referentnim/ekivalentnim monitorom, za $PM_{2.5}$. Između $PM_{2.5,lc}$ i $PM_{2.5,ref}$ varijabli, Pearson-ov koeficijent korelacije tokom GP je imao vrednost 0.65 ($p \leq 0.001$), dok je tokom NGP iznosio 0.40 ($p \leq 0.001$). Izračunate korelacije su statistički značajne što ukazuje na postojanje izražene pozitivne linearne povezanosti između merenja LCS-a i referentnog/ekvivalentnog monitora. Korelacije tokom GP su više u poređenju

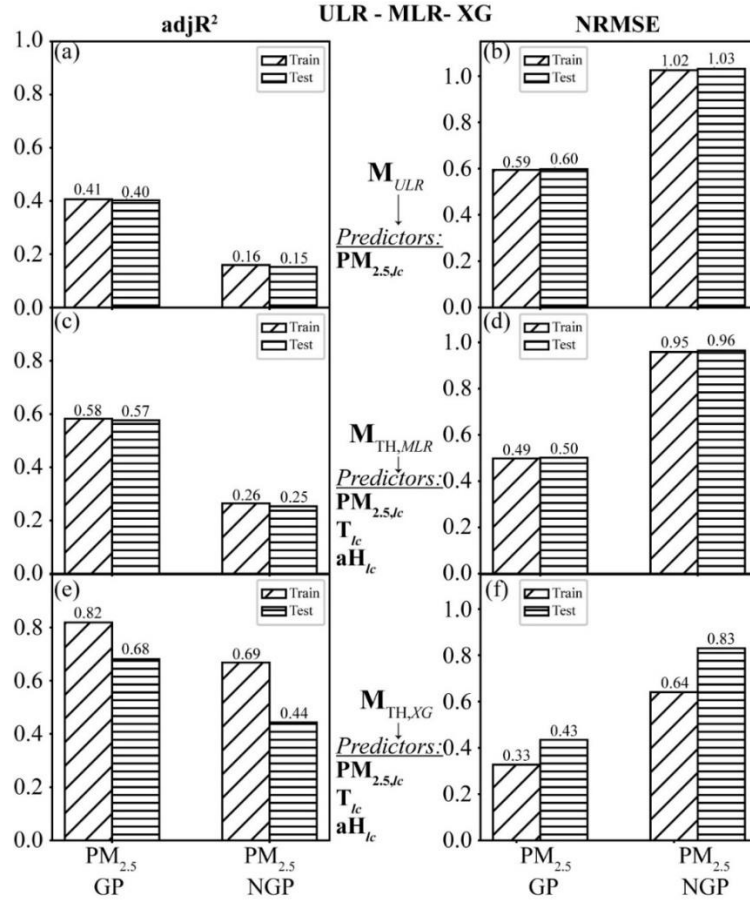
sa korelacijama tokom NGP, što ukazuje na jaču linearnu povezanost vremenskih serija tokom zime. Lošije performanse tokom leta se mogu objasniti uticajem promena meteoroloških parametara koje su izraženije tokom letnjeg perioda. Treba svakako imati u vidu da su ovi rezultati dobijeni za nekalibrisana merenja, dok će potencijalna poboljšanja nakon kalibracije biti analizirana u nastavku. Sa slike 3 se može primetiti da je slope uspostavljenih regresionih modela za $PM_{2.5}$ tokom GP i NGP bio ispod 1, što je indikacija za potcenjivanje vrednosti $PM_{2.5}$ masenih koncentracija od strane PAQMON 1.0 platforme.



Sl. 3. Pearson-ova matrica korelacija za $PM_{2.5}$ [$\mu g/m^3$] tokom (a) GP i (b) NGP. Zajedno sa Pearson-ovim korelacijama, predstavljeni su p vrednost i 95 % interval poverenja

Posle analize nekroigovanih rezultata merenja, kao drugi pokazatelj kvaliteta LCS-a može se iskoristiti performansna statistika jednostavnog modela koji se zasniva na univarijantnoj linearnoj regresiji (M_{ULR}). Treba napomenuti, da u ovom radu uspostavljeni M_{ULR} modeli nisu koristili tehnike L_1 i L_2 regularizacije. To je urađeno zbog jednostavnosti, ali i zato što regularizacija ne igra značajniju ulogu u sprečavanju overfitovanja u relativno jednostavnim regresionim modelima, sa jednim ili pak manjim brojem prediktora. Performansna statistika za M_{ULR} modele je predstavljena na slici 4 (a) i (b) i uključuje rezultate za $adjR^2$ i NRMSE između kalibrisanih vrednosti PAQMON 1.0 platformu i podataka dobijenih pomoću GRIMM EDM180 monitora tokom GP i NGP. Kvalitativno gledano, može se lako primetiti da se rezultati dobijeni korišćenjem podataka iz trening skupa skoro poklapaju sa rezultatima iz test skupa (razlike su približno oko 2%). To znači da nije došlo do pojave overfitovanja. Platforma je pokazala bolje performanse tokom GP u odnosu na NGP. Na primer, vrednosti prilagođenog koeficijenta korelacije ($adjR^2$) za $PM_{2.5,lc}$ u sezonama GP i NGP iznose 0.40 i 0.15, što znači da je tokom GP model objasnio 40% varijanse koncentracije $PM_{2.5,ref}$, dok tokom NGP

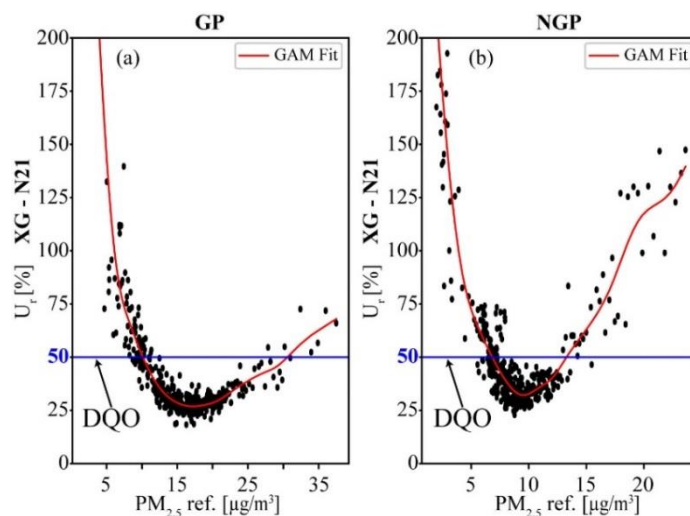
objašnjava 15%. Vrednosti NRMSE-a za $PM_{2.5,lc}$ M_{ULR} modele tokom GP i NGP iznose 60% i 103% interkvartilnog opsega referentnog $PM_{2.5,ref}$ merenja, respektivno.



Sl. 4. Stupčani grafikoni $adjR^2$ i NRMSE između referentnog monitora i jeftinog senzora kalibrisanog pomoću tri kalibraciona modela: (a), (b) M_{ULR} ; (c), (d) $M_{TH,MLR}$ i (e), (f) $M_{TH,XG}$

Kako bi dodatno poboljšali rezultate kalibracije, koristili smo složenije modele sa većim brojem prediktora koji uključuju temperature (T) i relativnu vlažnost (rH) konvertovanu u (aH) [11]. To su MLR i XG modeli. Performansna statistika za $M_{TH,MLR}$ je predstavljena na slici 4 (c) i (d). Sa slike se vidi da se za $M_{TH,MLR}$ kvalitativno može potvrditi da su vrednosti $adjR^2$ i NRMSE dobijene korišćenjem podataka iz trening skupa imale dobro poklapanje sa rezultatima dobijenim pomoću podataka iz test skupa. To znači da

je ovaj model pokazao dobru sposobnost generalizacije i da nije došlo do pojave overfitovanja. Za $\mathbf{M}_{TH,MLR}$ kalibracioni model, vrednost $adjR^2$ je veća tokom GP u odnosu na NGP. Kvantitativno gledano, vrednost $adjR^2$ za $PM_{2.5,lc}$ tokom GP i NGP iznosi 0.57 i 0.25, respektivno. Dobijeni rezultati ukazuju na to da dodatni prediktori za $PM_{2.5}$ poboljšavaju rezultate kalibracije. Vrednost objašnjene varijanse za $PM_{2.5}$ iznosi 57% i 25% tokom GP i NGP, redom. Takođe, vrednost NRMSE za $PM_{2.5,lc}$ $\mathbf{M}_{TH,MLR}$ model u GP i NGP je sada 50% i 96% interkvartilnog opsega referentnog $PM_{2.5,ref}$ merenja. Konačno, najsloženiji model koji je korišćen u ovom radu za kalibraciju senzora u PAQMON 1.0 platformi se zasniva na XG regresiji. Na slici 4 (e) i (f) su prikazane vrednosti $adjR^2$ i NRMSE za $\mathbf{M}_{TH,XG}$ model. Ukoliko se uporede rezultati za $\mathbf{M}_{TH,MLR}$ i $\mathbf{M}_{TH,XG}$ može se doći do sledećeg zaključka. Vrednost objašnjene varijanse za $PM_{2.5,lc}$ se povećava nakon kalibracije sa $\mathbf{M}_{TH,XG}$ sa 57% na 68%, i sa 25% na 44% u GP i NGP, redom. Sa druge strane, primećeno je i smanjenje vrednosti NRMSE-a nakon kalibracije pomoću $\mathbf{M}_{TH,XG}$. Vrednost za $PM_{2.5,lc}$ je unapređena sa 50% na 43%, odnosno sa 96% na 83% interkvartilnog opsega $PM_{2.5,ref}$ referentnog merenja, u GP i NGP, respektivno.



Sl. 5. Relativna proširena nesigurnost (U_r) merenja jeftinog senzora kao funkcija referentnog GRIMM EDM180 merenja. Rezultati su predstavljeni za PAQMON 1.0 platformu za: (a) GP i (b) NGP

Kada je u pitanju nesigurnost mernih rezultata, $\mathbf{M}_{TH,XG}$ modeli su se pokazali kao najbolje rešenje. To se može potvrditi na osnovu slike 5, gde je prikazana relativna proširena nesigurnost (U_r) merenja low-cost senzora kao funkcija referentnog GRIMM EDM180 merenja. Rezultati su dobijeni isključivo korišćenjem podataka iz test skupa. Radi lakše interpretacije dobijenih rezultata,

na slici je prikazan i fit generalizovanog aditivnog modela (GAM), dok se plava horizontalna linija odnosi na data quality objective (DQO) za indikativna PM merenja [5]. Sa slike se jasno može videti da je korišćenjem $M_{TH,XG}$ modela za kalibraciju, merna platforma tokom obe kampanje merenja dostigla DQO od 50%. Relativna proširena nesigurnost (U_r) za $PM_{2.5}$ je ispod 50% (presek DQO i GAM fit-a) za koncentracije približno između $10 \mu g/m^3$ i $30 \mu g/m^3$ i $7 \mu g/m^3$ i $13 \mu g/m^3$ tokom GP i NGP, respektivno.

4. ZAKLJUČAK

Ova istraživanja potvrdila su pouzdanost i stabilnost PAQMON 1.0 platforme u terenskim uslovima, uz primenu XG kalibracione procedure za poboljšanje tačnosti merenja. Uređaj je pokazao konzistentne performanse bez značajnog drifta signala tokom dve različite sezone, pri širokom spektru meteoroloških parametara. Dalja analiza je potvrdila visoku korelaciju memnih rezultata sa referentnim instrumentima, što ukazuje na validnost sistema za praćenje kvaliteta vazduha. Implementacija metoda mašinskog učenja omogućila je ispitivanje potencijala PAQMON 1.0 kao samobučavajućeg senzorskog sistema. Posebno su analizirani efekti dodatnih meteoroloških parametara kao prediktora u okviru različitih modela kalibracije. Pokazano je da primena naprednih modela, zasnovanih na XGBoost regresiji, omogućava poboljšanje tačnosti merenja u poređenju sa klasičnim linearnim modelima. Da bi se osigurala robustnost modela, sprovedena je rigorozna statistička obrada, uključujući preprocesiranje signala, augmentaciju podataka i optimizaciju hiperparametara. Rezultati istraživanja ukazuju na praktičnu primenu predložene metodologije u unapređenju performansi senzorskih sistema za monitoring kvaliteta vazduha. Efikasnost XG kalibracije potvrđena je kroz dosledne rezultate u različitim sezonskim uslovima, pri čemu je platforma dostigla odgovarajući nivo kvaliteta podataka u skladu sa standardima za ocenu kvaliteta merenja. Ovi nalazi otvaraju mogućnost za dalju optimizaciju i širu primenu adaptivnih kalibracionih strategija u sličnim sistemima senzorskih mreža.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao u sklopu istraživanja na istraživačkoj temi „Istraživanja koncentracionih profila, transfera, transformacije i novih tehnika za uklanjanje i remedijaciju perzistentnih zagađujućih supstancija u životnoj sredini“ br. 0602502 i finansijski je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučno-istraživačkog rada u 2025. godini za Institut za nuklearne nauke Vinča, Univerzitet u Beogradu, br. 451-03-136/2025-03/200017, za Fakultet zaštite na radu, Univerzitet u Nišu, br. 451-03-137/2025-03/200148 i za Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, br. 451-03-66/2025-03/200125.

LITERATURA

- [1] WHO Regional Office for Europe, Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: technical report, World Health Organization, Regional Office for Europe, 2021.
<https://www.who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2013-4101-43860-61757> (pristupljeno 10.03.2025.).
- [2] J. Lu, K. Wu, X. Ma, J. Wei, Z. Yuan, Z. Huang, W. Fan, Q. Zhong, Y. Huang, X. Wu, Short-term effects of ambient particulate matter (PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀) on influenza-like illness in Guangzhou, China. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 247 (2023) 114074.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2022.114074>
- [3] A. Aryal, A.C. Harmon, T.R. Dugas, Particulate matter air pollutants and cardiovascular disease: Strategies for intervention, *Pharmacol. Ther.*, 223 (2021) 107890. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2021.107890>
- [4] W. Kihal-Talantikite, P. Legendre, P. Le Nouveau, S. Deguen, Premature Adult Death and Equity Impact of a Reduction of NO₂, PM₁₀, and PM_{2.5} Levels in Paris—A Health Impact Assessment Study Conducted at the Census Block Level, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16 (2019) 16010038. <https://doi.org/10.3390/ijerph16010038>
- [5] Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, *Off. J. Eur. Union*, L 152, 1–44. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0050> (pristupljeno 10.03.2025.)
- [6] Y. Jiang, X. Zhu, C. Chen, Y. Ge, W. Wang, Z. Zhao, J. Cai, H. Kan, On-field test and data calibration of a low-cost sensor for fine particles exposure assessment, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 211 (2021) 111958. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111958>
- [7] J. Li, S.K. Guttikunda, G.R. Carmichael, D.G. Streets, Y.-S. Chang, V. Fung, Quantifying the human health benefits of curbing air pollution in Shanghai, *J. Environ. Manage* 70 (2004) 49–62.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2003.10.007>
- [8] Citi-Sense, Retrieved from <http://www.citi-sense.eu/> 2017. (pristupljeno u aprilu 2023.)
- [9] M. Jovašević-Stojanović, A. Bartonova, D. Topalović, I. Lazović, B. Pokrić, Z. Ristovski, On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter, *Environ. Pollut.*, 206 (2015) 696–704. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.035>
- [10] J. Venkatraman Jagatha, A. Klausnitzer, M. Chacón-Mateos, B. Laquai, E. Nieuwkoop, P. Van der Mark, U. Vogt, C. Schneider, Calibration Method for Particulate Matter Low-Cost Sensors Used in Ambient Air, *Quality Monitoring and Research. Sensors*, 21 (2021) 21123960. <https://doi.org/10.3390/s21123960>

-
- [11] D.B. Topalović, M.D. Davidović, M. Jovanović, A. Bartonova, Z. Ristovski, M. Jovašević-Stojanović, In search of an optimal in-field calibration method of low-cost gas sensors for ambient air pollutants: Comparison of linear, multilinear and artificial neural network approaches, *Atmos. Environ.*, 213 (2019) 640–658. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.028>
- [12] H. Khreis, J. Johnson, K. Jack, B. Dadashova, E.S. Park, Evaluating the Performance of Low-Cost Air Quality Monitors in Dallas, Texas. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19 (2022) 19031647. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031647>
- [13] F. Karagulian, M. Barbieri, A. Kotsev, L. Spinelle, M. Gerboles, F. Lagler, N. Redon, S. Crunaire, A. Borowiak, Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring, *Atmosphere*, 10 (2019) 10090506. <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>
- [14] X. Liu, R. Jayaratne, P. Thai, T. Kuhn, I. Zing, B. Christensen, R. Lamont, M. Dunbabin, S. Zhu, J. Gao, D. Wainwright, D. Neale, R. Kan, J. Kirkwood, L. Morawska, Low-cost sensors as an alternative for long-term air quality monitoring, *Environ. Res.*, 185 (2020) 109438. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109438>
- [15] M.L. Zamora, J. Rice, K. Koehler, One year evaluation of three low-cost PM2.5 monitors, *Atmos. Environ.*, 235 (2020) 117615. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117615>
- [16] P. Nowack, L. Konstantinovskiy, H. Gardiner, J. Cant, Machine learning calibration of low-cost NO2 and PM10 sensors: non-linear algorithms and their impact on site transferability, *Atmos. Meas. Tech.*, 14 (2021) 5637–5655. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5637-2021>
- [17] M. Si, Y. Xiong, S. Du, K. Du, Evaluation and calibration of a low-cost particle sensor in ambient conditions using machine-learning methods, *Atmos. Meas. Tech.*, 13 (2020) 1693–1707. <https://doi.org/10.5194/amt-13-1693-2020>
- [18] V. Tasić, M. Jovašević-Stojanović, S. Vardoulakis, N. Milošević, R. Kovačević, J. Petrović, Comparative assessment of a real-time particle monitor against the reference gravimetric method for PM10 and PM2.5 in indoor air, *Atmos. Environ.*, 54 (2012) 358–364. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.030>
- [19] V. Tasić, T. Apostolovski-Trujić, B. Radović, R. Kovačević, N. Ristić, T. Urošević, V. Kamenović, Merjenje kvaliteta vazduha u aglomeraciji Bor u 2022. godini u periodu rekonstrukcije topionice bakra u Boru, *Bakar*, 48 (2023) 53–62. <https://doi.org/10.5937/bakar2301053T>
- [20] T. Apostolovski-Trujić, B. Radović, R. Kovačević, N. Ristić, T. Urošević, V. Tasić, V. Kamenović, Kvalitet vazduha u gradu Boru u 2023. godini, *Bakar*, 49 (2024) 1–10. <https://doi.org/10.5937/bakar2401001A>