

**Îmbunătățirea tehnicilor de calibrare și calitatea datelor
pentru monitorizarea aerului din spațiul personal folosind o
platformă de dispozitive fixe și mobile**

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul de doctorat Calculatoare și Tehnologia Informației

autor ing. Marian-Emanuel IONAȘCU

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Marius George MARCU

luna 02 anul 2025

Monitorizarea calității aerului (AQI) este esențială pentru reducerea poluării atmosferice prin măsurarea și analiza poluanților din aer. Sistemele tradiționale de monitorizare, deși extrem de precise, sunt costisitoare și necesită întreținere frecventă, ceea ce le limitează implementarea la scară largă [1]. Pe de altă parte, senzorii cu cost redus oferă o alternativă scalabilă și accesibilă, permițând o acoperire spațială și temporală ridicată. Totuși, acești senzori întâmpină provocări legate de acuratețea măsurătorilor, complexitatea calibrării și sensibilitatea încrucișată ce reprezintă linii de cercetare suplimentară pentru a le spori fiabilitatea [2].

Datele în timp real privind calitatea aerului sunt esențiale pentru sănătatea publică, în special pentru grupurile vulnerabile, cum ar fi copiii, vârstnicii și persoanele cu afecțiuni respiratorii [3]. Indicii de calitate a aerului simplifică interpretarea măsurătorilor, permițând comunităților să ia decizii în cunoștință de cauză, cum ar fi reducerea activităților în aer liber în perioadele de poluare ridicată [4]. Cu toate acestea, senzorii cu cost redus prezintă limitări semnificative, inclusiv erori de măsurare, interferențe ale mediului înconjurător și sensibilitatea încrucișată la mai mulți poluanți [5]. Pentru a aborda aceste probleme sunt necesare tehnici avansate de calibrare, modele de învățare automată și noi materiale pentru a realiza senzori, cu scopul de a îmbunătăți precizia și stabilitatea acestora în timp [2].

În prezent, în Europa, monitorizarea calității aerului se bazează pe stații de referință de înaltă precizie, care, deși oferă măsurători corecte, prezintă limitări precum acoperirea spațială redusă, costurile ridicate de instalare și întreținere, precum și întârzieri în disponibilitatea datelor [1]. Senzorii cu cost redus pot completa aceste sisteme, oferind o acoperire mai extinsă și informații în timp real.

Această teză de cercetare se concentrează pe îmbunătățirea performanței senzorilor de calitate a aerului cu cost redus prin identificarea principalelor surse de eroare și dezvoltarea unor metodologii eficiente de calibrare. Studiul are la bază trei obiective principale:

- O1: Creșterea încrederii în monitorizarea personală a calității aerului - măsurarea și afișarea precisă a calității aerului în proximitatea utilizatorilor, asigurând un nivel de fiabilitate adecvat pentru evaluări de sănătate și decizii informate.
- O2: Optimizarea procesului de calibrare pentru senzorii cu cost redus - simplificarea procedurilor de calibrare pentru dispozitivele de monitorizare a calității aerului, reducând timpul și costurile asociate, menținând sau îmbunătățind precizia datelor furnizate.
- O3: Implementarea unei platforme standardizate de testare și măsurare - integrarea unei metodologii riguroase de evaluare a calității datelor, cu un nivel ridicat de acuratețe.

Pentru atingerea acestor obiective, această teză propune mai multe contribuții, aliniate fiecărui obiectiv. Contribuțiile principale sunt următoarele:

- C1: Realizarea unei analize ample asupra inițiativelor de cercetare privind monitorizarea calității aerului, calibrarea senzorilor și vizualizarea datelor.
- C2: Dezvoltarea unui proces iterativ pentru selecția senzorilor - evaluarea și validarea listei finale de senzori utilizând dispozitive reale cu cost redus.
- C3: Crearea unui dispozitiv IoT și a unui dispozitiv purtabil cu niveluri estimative/indicative ale calității datelor, echilibrând accesibilitatea cu fiabilitatea măsurătorilor pentru utilizare personală și la scară largă.
- C4: Propunerea și validarea modelelor de calibrare pentru senzorii cu cost redus, contribuind astfel la reducerea costurilor de calibrare și întreținere.
- C5: Algoritm de calibrare în timp real pentru dispozitivele nou introduse în rețea - proiectarea unui algoritm de calibrare care permite ajustarea rapidă și automată a senzorilor nou instalați, minimizând timpul de configurare și facilitând scalabilitatea.
- C6: Aplicație mobilă integrată pentru informații despre calitatea aerului - dezvoltarea unei aplicații care include Indicele de Calitate a Aerului (AQI), Indicele de Poluare Personală (BPI) pentru evaluări personalizate ale impactului asupra sănătății și un algoritm de fuziune a datelor pentru o perspectivă detaliată asupra poluării.
- C7: Proiectarea, implementarea și evaluarea a trei iterații de prototipuri IoT și a unui prototip purtabil.

Prin îmbunătățirea tehnicilor de calibrare, a metodologiilor de fuziune a datelor și a corecțiilor bazate pe învățare automată, acest studiu urmărește să reducă decalajul dintre sistemele tradiționale de monitorizare și cele cu cost redus. Îmbunătățirea preciziei, scalabilității și accesibilității senzorilor va facilita adoptarea pe scară largă a soluțiilor de monitorizare a calității aerului. Rezultatele obținute contribuie la descentralizarea informațiilor privind calitatea aerului, susțin inițiativele de sănătate publică și îmbunătățesc procesul decizional de mediu, oferind o bază solidă pentru viitoare inovații în domeniul la nivel global [2].

Pentru a susține activitatea prezentată în această teză, au fost publicate mai multe lucrări științifice pe parcursul perioadei de cercetare, primele trei fiind în jurnale indexate ISI.

- Petruc, S.-I.; Bogdan, R.; Ionascu, M.-E.; Nimara, S.; Marcu, M. An IoT Framework for Assessing the Correlation Between Sentiment-Analyzed Texts and Facial Emotional Expressions. *Electronics* 2025, **14**, 118. (WOS:001393618000001)
- Ionascu, M.-E.; Marcu, M.; Bogdan, R.; Darie, M. Calibration of NO, SO₂, and PM using Airify: A low-cost sensor cluster for air quality monitoring, *Atmospheric Environment*, Volume **339**, 2024, 120841. (WOS:001343585000001)

- Ionascu, M. E.; Castell, N.; Boncalo, O.; Schneider, P.; Darie, M.; Marcu, M. Calibration of CO, NO₂, and O₃ Using Airify: A Low-Cost Sensor Cluster for Air Quality Monitoring, *Sensors*, **21**(23), 7977, 2021. (WOS:000743308100001)
- Gruicin, I.; Ionascu, M. E.; Popa, M. Evaluation of air quality variability in Timișoara, Romania, *SACI 2020 - IEEE 14th Int. Symp. Appl. Comput. Intell. Informatics*, Proc., pp 179-182, 2020. (WOS:000610510000029)
- Ionascu, M. E.; Gruicin, I.; Marcu, M. Variance Analysis of Signals from Four Electrode Electrochemical Sensors, *2019 29th Telecommun. Forum, TELFOR 2019 - Proc.*, 2019. (WOS:000568618700081)
- Blagoiev, M.; Gruicin, I.; Ionascu, M. E.; Marcu, M. A Study on Correlation between Air Pollution and Traffic, *2018 26th Telecommun. Forum, TELFOR 2018 - Proc.*, pp. 2–5, 2018. (WOS:000459714200175)
- Ionascu, M. E.; Gruicin, I.; Marcu, M. Towards Wearable Air Quality Monitoring Systems - Initial Assessments on Newly Developed Sensors, *2018 26th Telecommun. Forum, TELFOR 2018 - Proc.*, pp. 1–4, 2018. (WOS:000459714200129)
- Ionascu, M. E.; Gruicin, I.; Marcu, M. Laboratory evaluation and calibration of low-cost sensors for air quality measurement, *SACI 2018 - IEEE 12th Int. Symp. Appl. Comput. Intell. Informatics*, Proc., pp. 395–400, 2018. (WOS:000448144200068)
- Gruicin, I.; Ionascu, M. E.; Popa, M. A solution for air quality monitoring and forecasting, *SACI 2018 - IEEE 12th Int. Symp. Appl. Comput. Intell. Informatics*, Proc., pp. 503–507, 2018. (WOS:000448144200087)
- Ionascu, M. E.; Marcu, M. Energy Profiling for Different Bluetooth Low Energy Designs, in *IDAACS'2017*, 2017, pp. 1032–1036. (WOS:000425870400084)

În continuare, prezentăm un rezumat al fiecărui capitol al tezei, evidențiind principalele contribuții ale acestora. Astfel, Capitolul 1 oferă o bază cuprinzătoare pentru acest studiu, subliniind importanța monitorizării calității aerului și rolul său în protejarea sănătății publice și reducerea impactului asupra mediului. Este analizată evoluția tehnologiilor de monitorizare, de la sistemele tradiționale, costisitoare și cu acoperire limitată, la senzori cu cost redus.

Capitolul identifică principalele provocări și limitări asociate acestor senzori, inclusiv sensibilitatea la condițiile de mediu, fenomenul de senzitivitate încrucișată și complexitatea procesului de calibrare. Pe baza acestor constatări, sunt formulate ipotezele de cercetare pentru a aborda aceste provocări, concentrându-se pe îmbunătățirea preciziei senzorilor, creșterea fiabilității acestora și integrarea lor în rețele scalabile.

Capitolul 2 reprezintă partea principală de analiză a stadiului actual al cercetării și prezintă evoluția platformelor de monitorizare a calității aerului, concentrându-se pe provocările și progresele senzorilor cu cost redus pentru supravegherea mediului. Capitolul este împărțit în proiecte de cercetare, dar include și alte studii individuale care nu sunt integrate într-un proiect mai amplu. Printre aceste proiecte regăsim CitiSense [6], OpenSense [7], ENEA [8], AirSenseEur [9], SNAQ Heathrow [10] și proiecte din SUA [11], evidențiind strategiile lor privind calibrarea, integrarea senzorilor și abordarea interferențelor cu mediul. Analiza subliniază potențialul ridicat al senzorilor cu cost redus în decentralizarea măsurării calității aerului, evidențiind necesitatea unor protocoale standardizate și a unei colaborări interdisciplinare pentru soluții scalabile.

Capitolul 3 prezintă metodologia utilizată pentru selectarea senzorilor de calitate a aerului, integrați în dispozitive IoT și portabile. Procesul de selecție este ghidat de specificațiile utilizatorilor și de scenariile de aplicare prevăzute. Sunt analizate două cazuri de utilizare:

monitorizarea calității aerului la nivel de oraș cu dispozitive IoT fixe sau mobile și monitorizarea expunerii personale prin intermediul dispozitivelor portabile. Fiecare scenariu introduce provocări distincte care influențează alegerea senzorilor și proiectarea întregului sistem.

Pentru selecția senzorilor, s-a adoptat o abordare iterativă, începând cu o analiză detaliată a fișelor tehnice ale mai multor producători. Au fost dezvoltate mai multe dispozitive de testare, fiecare integrând diferite tipuri de senzori. O observație importantă a fost aceea că mulți senzori electrochimici prezintă caracteristici similare, în special cei cu trei și patru electrozi. Acest lucru a permis proiectarea unui circuit standardizat capabil să acomodeze senzori de la mai mulți producători. În cele din urmă, toate prototipurile IoT au fost proiectate pentru a susține senzori electrochimici cu patru electrozi. În schimb, pentru dispozitivele portabile, s-a acordat prioritate senzorilor cu o dimensiune redusă și consum mic de energie, în detrimentul acurateții.

Table 1: Specificațiile senzorilor propuși pentru dispozitive IoT și portabile. (* valabil pentru august 2022)

Tip dispozitiv	Tip senzor	Producător	Sensibilitate	Cost estimat *
IoT	CO-A4	Alphasense	220 to 410 nA/ppm	\$68
	NO-A4	Alphasense	350 to 550 nA/ppm	\$68
	NO2-A43F003I	Alphasense	-175 to -500 nA/ppm	\$68
	SO2-A4	Alphasense	320 to 500 nA/ppm	\$68
	Ox-A431	Alphasense	-200 to -650 nA/ppm	\$68
	IRC-A1	Alphasense	1 ppm	\$80
Portabil	BME680	MEMS	ppb/ °C/ %/ mBar	\$15
	10Dx-SO2-1000	Spec-Sensors	6 ± 4 nA/ppm	\$30
	10Dx-O3-1000	Spec-Sensors	6 ± 4 nA/ppm	\$30
	10Dx-NO2-1000	Spec-Sensors	6 ± 4 nA/ppm	\$30
	PMSA 003I	Plantower	1 μg/m ³	\$30
Ambele	PMSA 003I	Plantower	1 μg/m ³	\$30
	BME680	Bosch	ppb/ °C/ %/ mBar	\$10

Pentru a asigura fiabilitatea, senzorii selectați au fost integrați în platforme de testare și distribuiți în diverse condiții de mediu. Performanța senzorilor a fost evaluată prin proceduri de calibrare, comparând datele colectate cu cele ale stațiilor de referință, acolo unde a fost posibil. Metrice precum eroarea medie absolută (MAE) și coeficientul de determinare (r^2) au fost utilizate pentru a cuantifica acuratețea. Procesul a inclus mai multe iterații de dispozitive, cu îmbunătățiri succesive ale selecției senzorilor și ale proiectării sistemului. Ultima etapă a

constat în dezvoltarea prototipurilor portabile și IoT, care au fost validate în laborator și prin colocare, urmate de implementări în scenarii reale.

Tabelul 1 prezintă configurația finală a senzorilor utilizați în cele mai recente dispozitive IoT și portabile. Pe baza acestei configurații, au fost asamblate cinci dispozitive IoT și peste douăzeci de unități portabile. Aceste dispozitive servesc drept bază pentru strategiile de calibrare prezentate în capitolele următoare.

Capitolul 4 prezintă evaluarea și calibrarea unei platforme de monitorizare a aerului cu cost redus, concepută pentru a măsura o gamă largă de poluanți atmosferici, inclusiv CO, NO₂, NO, O₃, SO₂, CO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, precum și parametri de mediu precum temperatura, umiditatea relativă și presiunea atmosferică. Capitolul explorează provocările asociate calibrării platformei, dezvoltată pe baza unei analize a metodologiilor existente și a progreselor recente în monitorizarea calității aerului cu senzori cu cost redus. Cercetări anterioare [12], [13] au analizat senzorii integrați în sistemul nostru, demonstrând fezabilitatea utilizării acestora în aplicații reale. Contribuția noastră constă în dezvoltarea și validarea unor modele de calibrare bazate pe regresie liniară multivariată (MLR) și algoritmi de păduri de arbori aleatorii (RF) [11], [12], [14]–[16], asigurând că platforma respectă obiectivele de calitate a datelor (DQO).

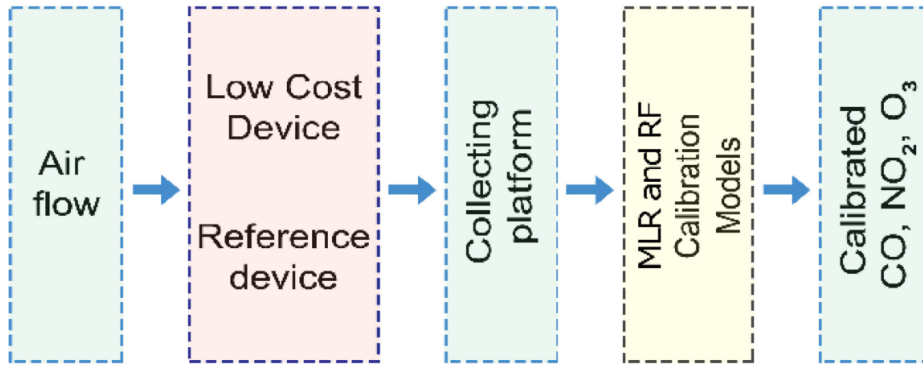


Figure 1: Principala metodologie de calibrare

Procesul de calibrare, ilustrat în Figura 1, implică colocarea dispozitivelor noastre alături de instrumente de referință într-un mediu controlat pentru colectarea de seturi de date paralele. Datele sunt stocate separat și utilizate ulterior pentru dezvoltarea și aplicarea modelelor de calibrare. Această metodologie permite generarea de modele specifice fiecărui poluant, care sunt utilizate pentru ajustarea măsurătorilor în timp real.

Evaluarea performanței s-a realizat utilizând mai multe metrice, inclusiv eroarea medie absolută (MAE), eroarea pătratică medie (MSE), rădăcina pătrată a erorii pătratice medii (RMSE), deviația medie normalizată (NMB) și eroarea medie normalizată (NME). În plus, incertitudinea măsurătorilor a fost evaluată folosind regresie ortogonală [17], iar fiabilitatea modelului a fost cuantificată prin coeficientul de determinare (r^2). Aceste metrice oferă o evaluare detaliată a acurateței calibrării, permițând comparații între diferite modele.

Rezultatele indică îmbunătățiri semnificative în tehnicile de calibrare pentru senzorii cu cost redus. Modelele propuse au depășit performanțele studiilor anterioare, obținând o îmbunătățire

de 60% a valorii r^2 pentru SO_2 , o creștere de 10% a coeficientului de determinare pentru CO și O_3 , și rezultate comparabile cu metodele din literatură pentru PM_x și NO_2 . Modelele pentru NO au avut performanțe mai slabe, din cauza concentrațiilor reduse ale poluanților în timpul testelor. Cu toate acestea, introducerea unor ecuații personalizate și a modelelor RF cu predictorii suplimentari duce la îmbunătățirea semnificativă a acurateții calibrării.

Rezultatele au confirmat că modelele de calibrare propuse respectă nivelurile estimative ale DQO pentru toți parametrii măsurați, iar modelul RF a atins acest prag mai rapid decât abordarea MLR. Deși ambele tehnici au atins un nivel indicativ de acuratețe pentru PM_x și CO, modelele RF s-au dovedit mai eficiente pentru O_3 , NO, NO_2 și SO_2 . Modelele pentru NO_2 , NO și SO_2 nu au atins nivelul indicativ în timpul validării, dar precizia lor s-a îmbunătățit la concentrații mai mari, sugerând că dispozitivul este mai potrivit pentru monitorizarea zonelor industriale unde acești poluanți au valori ridicate.

Pentru validarea suplimentară a rezultatelor, a fost realizat un studiu de colocare în care cinci unități au fost plasate alături de o stație de referință în Petroșani în perioada 6 ianuarie 2021 - 2 februarie 2021. Rezultatele au confirmat că platforma funcționează ca un instrument de monitorizare indicativă fiabil pentru PM și CO, în special în mediul urban. Pentru ceilalți poluanți, acuratețea este mai ridicată în regiunile industriale cu concentrații mari, unde reducerea incertitudinii îmbunătățește măsurătorile.

În Capitolul 5, evaluăm fezabilitatea transferului modelelor de calibrare către alte unități de monitorizare. Obiectivul principal este de a determina dacă este posibilă evitarea proceselor tradiționale de calibrare, menținând în același timp precizia măsurătorilor și reducând astfel timpul și costurile de calibrare ale fiecărei unități.

Pentru validarea acestei abordări, au fost realizate două campanii suplimentare de colocare în colaborare cu Institutul Norvegian de Cercetare a Aerului (NILU). Aceste campanii au inclus măsurători de laborator și de teren, desfășurate în diferite sezoane. Calibrarea în laborator prezintă provocări ridicate, deoarece necesită camere controlate și amestecuri de gaze pregătite cu precizie, ceea ce crește complexitatea și costurile. În schimb, calibrarea prin colocare oferă o alternativă mai practică și scalabilă, prin plasarea dispozitivelor cu cost redus alături de stațiile de monitorizare de referință. Aceste stații, echipate cu senzori de înaltă precizie, oferă un punct de referință pentru calibrarea dispozitivelor de măsurare cu cost redus, asigurând performanțe consistente în diverse condiții de mediu.

Recalibrarea pe seturi de date noi colectate în laborator a confirmat eficiența calibrării pentru dispozitivele propuse. Cu toate acestea, deși rezultatele au atins nivelul DQO indicativ, calibrarea în laborator nu a luat în considerare pe deplin variabilitatea mediului. Pe de altă parte, calibrarea bazată pe colocare a prezentat o precizie redusă la concentrații scăzute, tipice mediilor exterioare, evidențiind limitările calibrării de laborator în aplicații reale.

Transferabilitatea modelului joacă un rol crucial în reducerea costurilor și a efortului necesar pentru calibrarea dispozitivelor nou implementate. Deși implementarea inițială a unei rețele de măsurare necesită un număr critic de unități calibrate, transferul modelelor între dispozitive îmbunătățește scalabilitatea și eficiența operațională pe termen lung. Au fost analizate două scenarii de transfer:

- **Scenariul 1:** Transferul modelelor de calibrare antrenate într-un mediu de laborator controlat.
- **Scenariul 2:** Transferul modelelor antrenate pe date de colocare în condiții reale.

Aceste scenarii oferă un cadru cuprinzător pentru evaluarea transferabilității modelelor atât în condiții controlate, cât și reale. Scenariul 1 explorează utilizarea modelelor antrenate în laborator pentru calibrarea dispozitivelor, în timp ce scenariul 2 demonstrează eficiența utilizării modelelor antrenate prin colocare pentru îmbunătățirea preciziei în aplicații reale.

Rezultatele generale indică faptul că modelele calibrate și validate pe același dispozitiv depășesc constant performanțele modelelor transferate. Această constatare subliniază sensibilitatea modelelor de calibrare la schimbările de mediu și la particularitățile fiecărui senzor, evidențiind necesitatea recalibrării sau adaptărilor specifice pentru o implementare eficientă în rețelele de măsurare la scară largă.

În Capitolul 6, introducem un algoritm pentru calibrarea senzorilor cu cost redus utilizând o abordare bazată pe vecinătate în timp și spațiu (on-the-fly). Metodologia noastră clasifică stațiile de monitorizare pe trei niveluri:

- **Stații de referință:** Stații de monitorizare de înaltă precizie utilizate pentru calibrare.
- **Dispozitive IoT:** Unități fixe sau mobile echipate cu senzori mai preciși, desfășurate în oraș prin transportul public sau în locații staționare bine determinate.
- **Dispozitive portabile:** Unități de monitorizare a aerului purtate de utilizatori, care interacționează dinamic cu dispozitivele IoT și stațiile de referință.

Am evaluat acest algoritm la nivel urban, demonstrând potențialul său de îmbunătățire a monitorizării calității aerului la scară largă. Pentru a sprijini această abordare, am dezvoltat dispozitive portabile compacte și eficiente din punct de vedere energetic, capabile de monitorizare continuă timp de până la 16 ore fără a necesita încărcare. Aceste dispozitive reprezintă un compromis între acuratețe și consumul de energie, fiind adecvate pentru implementarea în scenarii reale și pentru integrare cu modelele de calibrare propuse.

Deoarece o unică campanie de calibrare nu este suficientă pentru a menține acuratețea măsurătorilor în timp, am propus un mecanism de autocalibrare. Acest mecanism asigură adaptarea dispozitivelor portabile la condițiile de mediu variabile, menținând în același timp acuratețea datelor. Metoda noastră de calibrare automată în timp real urmează un proces în trei pași, conceput pentru flexibilitate și adaptabilitate. Principalele contribuții ale acestui capitol includ îmbunătățirea modelelor de calibrare pentru senzorii cu cost redus și testarea unui mecanism pentru actualizări ale modelului în timp real. Prin transferul modelelor de calibrare între dispozitive, această abordare urmărește să ofere măsurători consistente ale calității aerului în diverse scenarii de implementare.

Una dintre principalele provocări ale transferului modelelor este acumularea de zgomot în timp, ceea ce impune recalibrări frecvente. Pentru a atenua această problemă, metodologia noastră aplică reguli de ierarhie a dispozitivelor.

- **Dispozitive portabile (Nivel 3)** nu sunt calibrate prin vecinătatea cu alte dispozitive portabile, chiar dacă acestea au fost recent calibrate.
- **Dispozitive IoT (Nivel 2)** sunt calibrate utilizând date de la stațiile de referință sau alte dispozitive IoT cu un factor de încredere ridicat.

Pentru a evalua această metodologie, am realizat experimente utilizând un dispozitiv portabil, echipat cu senzori electrochimici. Modelele de calibrare introduse în Capitolul 4 au fost aplicate asupra seturilor de date colectate cu acest dispozitiv, iar performanța algoritmului a fost evaluată. Rezultatele inițiale au demonstrat că abordarea noastră poate atinge un nivel estimativ al DQO, validând eficacitatea etapei de antrenare. Ulterior, am propus un algoritm de autocalibrare

bazat pe principiu vecinătății, ierarhia dispozitivelor și un factor de încredere nou introdus. A fost realizat un scenariu de testare în condiții reale pentru a evalua fezabilitatea metodei.

Rezultatele evidențiază atât potențialul, cât și provocările autocalibrării pentru senzorii de calitate a aerului cu cost redus. Modelele RF au depășit semnificativ modelele tradiționale MLR, îmbunătățind acuratețea calibrării. Pentru CO și PM_x, algoritmi de autocalibrare au demonstrat valori ridicate ale r^2 și metrici de eroare scăzute în scenarii de testare controlate. Cu toate acestea, s-a observat o degradare a performanței atunci când modelele au fost aplicate pe date noi, după cum indică scăderea valorilor r^2 și creșterea RMSE în rezultatele noilor modele. Aceste constatări sugerează că, deși autocalibrarea poate oferi o precizie rezonabilă în condiții controlate, fiabilitatea sa în medii reale rămâne influențată de variabilitatea mediului.

O evaluare concludentă a algoritmilor de autocalibrare sugerează că aceștia oferă măsurători estimative și reduc dependența de calibrarea manuală. Cu toate acestea, realizarea unor soluții fiabile și scalabile pentru monitorizarea calității aerului rămâne o provocare. Pentru poluanți precum SO₂ și O₃, unde precizia calibrării a fost constant scăzută, sunt necesare seturi de date de antrenare îmbunătățite și strategii de calibrare specifice fiecăruia. În plus, deși modelele de învățare automată îmbunătățesc performanța calibrării, abordările hibride care integrează modele de învățare automate cu modele fizice sau date contextuale (de exemplu, date meteorologice, date de trafic) ar putea crește și mai mult robustețea algoritmilor.

În Capitolul 7, explorăm patru aplicații potențiale ale platformei propuse, care integrează stații municipale de monitorizare a aerului, dispozitive IoT calibrate fixe și mobile, precum și senzori purtabili. Platforma este proiectată pentru a furniza măsurători ale calității aerului la diferite niveluri de DQO, permițând cartografierea detaliată a mediului înconjurător.

- **Integrarea schemei de autocalibrare:** Modelele inițiale de calibrare sunt actualizate în timp real, pe baza vecinătății mai multor dispozitive pe o anumită perioadă, îmbunătățind precizia și adaptabilitatea senzorilor.
- **Aplicație mobilă pentru monitorizarea calității aerului:** O aplicație dedicată ce permite utilizatorilor să vizualizeze expunerea lor personală la poluarea aerului. Aceasta poate funcționa cu sau fără un dispozitiv purtabil, agregând date din multiple surse, inclusiv stații de referință publice, date meteorologice și condiții de trafic.
- **Body Pollution Index (BPI):** Un indice nou care cuantifică impactul poluării aerului asupra sănătății individului, oferind informații utile pentru reducerea expunerii.
- **Fuziunea datelor pentru estimarea calității aerului la scară mare:** Un model predictiv care utilizează date de la senzori locali pentru a extrapola tendințele calității aerului în zone urbane extinse, integrând măsurători în timp real cu seturi de date externe.

În Capitolul 8, încheiem această teză printr-un rezumat al principalelor contribuții și prin evidențierea direcțiilor posibile pentru viitoare proiecte de cercetare. Această lucrare aduce progrese semnificative în domeniul monitorizării calității aerului, prin îmbunătățirea senzorilor cu cost redus, dezvoltarea unor tehnici de calibrare avansate și propunerea unor metode inovatoare de vizualizare a datelor. Rezultatele obținute creează premisele pentru rețele fiabile și scalabile.

- *Investigarea stadiului actual al cercetării:* La baza acestui studiu a stat o analiză detaliată a inițiativelor actuale din domeniul, a tehnicilor de calibrare a senzorilor și a strategiilor de vizualizare a datelor. Prin agregarea multiplelor surse de cercetare, această lucrare contribuie la reducerea distanței dintre modelele teoretice și implementările practice ale dispozitivelor de măsurare.

- *Analiză empirică pentru selecția senzorilor:* A fost adoptată o abordare iterativă pentru selecția și evaluarea senzorilor, asigurând un echilibru între cost și acuratețea datelor. Procesul a inclus prototiparea și testarea a trei dispozitive IoT și a unui dispozitiv purtabil înainte de stabilirea finală a listei de senzori.
- *Modele de calibrare pentru dispozitive IoT:* Una dintre principalele provocări ale implementării senzorilor cu cost redus este necesitatea calibrării frecvente. Pentru a aborda această problemă, au fost dezvoltate și validate modele de calibrare dedicate acestor senzori, asigurând acuratețea datelor pe durata desfășurării măsurătorilor.
- *Reducerea timpului și costului de calibrare:* Transferul între dispozitive a modelelor de calibrare propuse reduce semnificativ costurile procesului de calibrare, facilitând implementarea pe scară largă a unei rețele de monitorizare.
- *Calibrare dinamică pentru dispozitive portabile:* A fost dezvoltat un algoritm de calibrare on-the-fly, capabil să automatizeze procesul de calibrare a senzorilor nou implementați. Acest mecanism reduce timpul de configurare și îmbunătățește scalabilitatea, permițând integrarea rapidă a senzorilor în rețelele de monitorizare.
- *Aplicații și propuneri de îmbunătățire:* A fost dezvoltată o aplicație mobilă care prezintă datele despre calitatea aerului într-un format accesibil. Această aplicație integrează mai multe funcționalități, inclusiv: Indicele Calității Aerului (AQI), Indicele de Poluare Corporală (BPI) pentru evaluări personalizate ale impactului poluării asupra sănătății și algoritmi de fuziune a datelor pentru îmbunătățirea preciziei spațiale.

În plus, au fost identificate mai multe direcții promițătoare pentru cercetare:

- *Indicele de Poluare Corporală (BPI):* Îmbunătățirea indicelui BPI ar putea include integrarea unor date fiziologice, precum variabilitatea ritmului cardiac și modelele respiratorii detectate de dispozitive portabile. În plus, corelarea valorilor BPI cu efectele asupra sănătății pe termen lung ar putea confirma utilitatea acestuia ca instrument predictiv.
- *Tehnici de fuziune a datelor:* Metodele de fuziune a datelor pot îmbunătăți precizia monitorizării calității aerului atât la nivel spațial, cât și temporal. Cercetările viitoare ar putea explora integrarea diverselor seturi de date, precum date de trafic, condițiile meteorologice și imaginile din satelit. Metode precum federated learning și modelele bazate pe grafuri ar putea fi utilizate.
- *Degradarea senzorilor în timp:* Modelele de mentenanță predictivă bazate pe algoritmi de învățare automată ar putea detecta semne timpurii ale degradării senzorilor sau ale defectării acestora. Studiile asupra impactului factorilor de mediu asupra duratei de viață a senzorilor și mecanismele automate de recalibrare ar putea îmbunătăți durabilitatea senzorilor și reduce costurile pe termen lung.
- *Calibrarea senzorilor la nivel de dispozitiv (edge computing):* Implementarea unui sistem de calibrare în timp real, utilizând edge computing, ar putea reduce dependența de modelele centralizate. Proiectele viitoare de cercetare ar putea explora dezvoltarea unor algoritmi de învățare automată eficienți, care să permită calibrarea locală pe dispozitive, arhitecturi distribuite și măsuri de securitate pentru prevenirea manipulării datelor.

Bibliography

- [1] European Environment Agency (EEA), “Europe’s air quality status 2023,” *EEA Reports*, 2023. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023>.
- [2] B. Maag, Z. Zhou, and L. Thiele, “A survey on sensor calibration in air pollution monitoring deployments,” *IEEE INTERNET THINGS J.*, vol. 5, no. 6, pp. 4857–4870, 2018. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2853660.
- [3] W. H. O. (WHO), “Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease,” *WHO Reports*, 2022. [Online]. Available: <https://www.who.int>.
- [4] N. Castell, F. R. Dauge, P. Schneider, *et al.*, “Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?” *Environ. Int.*, vol. 99, pp. 293–302, 2017, ISSN: 18736750. DOI: 10.1016/j.envint.2016.12.007.
- [5] N. Celikkaya, M. Fullerton, and B. Fullerton, “Use of low-cost air quality monitoring devices for assessment of road transport related emissions,” *Transportation Research Procedia*, vol. 41, pp. 762–781, 2019. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.09.125.
- [6] N. Castell, M. Viana, M. C. Minguillón, C. Guerreiro, and X. Querol, “Real-world application of new sensor technologies for air quality monitoring,” *ETC/ACM Technical Paper*, vol. 16, p. 34, 2013.
- [7] D. Hasenfratz, “Enabling large-scale urban air quality monitoring with mobile sensor nodes,” Ph.D. dissertation, ETH Zurich, 2015.
- [8] S. De Vito, E. Esposito, N. Castell, P. Schneider, and A. Bartonova, “On the robustness of field calibration for smart air quality monitors,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 310, p. 127 869, 2020. DOI: 10.1016/j.snb.2020.127869.
- [9] S. Yarkin, M. Gerboles, A. Borowiak, M. Signorini, *et al.*, “Guidance on low-cost air quality sensor deployment for non-experts based on the airsenseur experience,” *Joint Research Centre (JRC), the European Commission’s science and knowledge service*, 2022.
- [10] O. A. Popoola, G. B. Stewart, M. I. Mead, and R. Jones, “Use of networks of low-cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings,” *Atmospheric Environment*, vol. 194, pp. 58–70, 2018. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.09.030.
- [11] C. Malings, R. Tanzer, A. Hauryliuk, *et al.*, “Development of a general calibration model and long-term performance evaluation of low-cost sensors for air pollutant gas monitoring,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 12, no. 2, pp. 903–920, 2019, ISSN: 18678548. DOI: 10.5194/amt-12-903-2019.

- [12] C. Borrego, A. M. Costa, J. Ginja, *et al.*, “Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The eunetair joint exercise,” *Atmospheric Environment*, vol. 147, pp. 246–263, 2016. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.09.050.
- [13] O. A. M. Popoola, G. B. Stewart, M. I. Mead, and R. L. Jones, “Development of a baseline-temperature correction methodology for electrochemical sensors and its implications for long-term stability,” *Atmospheric Environment*, vol. 147, pp. 330–343, 2016, ISSN: 1352-2310. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.10.024. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.024>.
- [14] M. Gerboles, L. Spinelle, A. Kotsev, M. Signorini, and L. Srl, “AirSensEUR : An Open-Designed Multi-Sensor Platform for Air Quality Monitoring,” *Fourth Sci. Meet. EuNetAir, Linkoping Univ.*, no. October, pp. 4–7, 2015. DOI: 10.5162/4EuNetAir2015/03.
- [15] V. van Zoest, F. B. Osei, A. Stein, and G. Hoek, “Calibration of low-cost no2 sensors in an urban air quality network,” *Atmospheric Environment*, vol. 210, pp. 66–75, 2 2019, ISSN: 18732844. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.04.048. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.04.048>.
- [16] M. H. Bergin, K. K. Johnson, M. S. Landis, *et al.*, “Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 11, no. 8, pp. 4823–4846, 2018. DOI: 10.5194/amt-11-4823-2018.
- [17] L. Spinelle, M. Gerboles, and M. Aleixandre, “Performance evaluation of amperometric sensors for the monitoring of O3 and NO2 in ambient air at ppb level,” *Procedia Eng.*, vol. 120, no. December, pp. 480–483, 2015, ISSN: 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.676.