УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ФАКУЛТЕТ ЗАШТИТЕ НА РАДУ У НИШУ

Аца В. Божилов

РАЗВОЈ СИСТЕМА ПРОАКТИВНОГ МОНИТОРИНГА СУСПЕНДОВАНИХ ЧЕСТИЦА У УНУТРАШЊЕМ ВАЗДУХУ ЈАВНИХ ОБЈЕКАТА

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2026.

UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF OCCUPATIONAL SAFETY

Aca V. Božilov

DEVELOPMENT OF A PROACTIVE MONITORING SYSTEM FOR PARTICULATE MATTER IN THE INDOOR AIR OF PUBLIC BUILDINGS

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2026.

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	др Ненад Живковић, ред. проф. у пензији Универзитет у Нишу, Факултет заштите на раду у Нишу
Наслов докторске дисертације:	Развој система проактивног мониторинга суспендованих честица у унутрашњем ваздуху јавних објеката
Резиме:	Мониторинг квалитета ваздуха представља основ за процену изложености људи загађујућим супстанцама и управљање ризицима по здравље. Иако се квалитет ваздуха најчешће разматра у контексту спољашњег загађења, чињеница да људи највећи део времена проводе у затвореним просторима указује на значај квалитета унутрашњег ваздуха као важног фактора укупне изложености, посебно у јавним објектима, у којима фреквенција корисника, режими вентилације и активности могу условити динамичне промене загађујућих супстанци. Постојећи системи мониторинга нису довољно ефикасни, јер се заснивају на повременим мерењима или скупим референтним системима, што ограничава континуитет праћења, просторну покривеност и правовремено препознавање епизода загађења. *У дисертацији су спроведена истраживања усмерена ка развоју методологије и система проактивног мониторинга суспендованих честица у унутрашњем ваздуху јавних објеката*. Фокус је на суспендованим честицама фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$, јер представљају значајан индикатор квалитета ваздуха, имају изражену динамику у затвореним просторима и повезане су са здравственим ризиком. Развијен је *PM-MoN* систем, заснован на *low-cost* сензорима, микроконтролерској платформи, *IoT* архитектури, *cloud* инфраструктури, *web* интерфејсу и моделу индекса квалитета унутрашњег ваздуха (*IAQI*). Истраживање је обухватило анализу литературе, развој хардверско-софтверске платформе, лабораторијска и теренска испитивања, колокациона мерења са референтним и еквивалентним инструментима, статистичку обраду података и примену калибрационих и корекционих модела. Резултати су потврдили поузданост *PM-MoN* система у праћењу промена концентрација суспендованих честица, идентификацији епизода повећаног загађења и обезбеђивању основе за процену изложености корисника. Потврђено је да релативна влажност и температура утичу на одзив *low-cost PM* сензора, због чега су корекциони модели неопходни за поузданију интерпретацију добијених вредности. Развијени *IAQI* модел омогућава категоризацију квалитета унутрашњег ваздуха и доношење корективних мера. Закључено је да интеграција *low-cost* сензора, калибрационих и корекционих модела, *IAQI* приступа и *IoT* технологија представља научно оправдан и практично применљив приступ проактивном мониторингу квалитета унутрашњег ваздуха у јавним објектима.

Научна област:	Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
Научна дисциплина:	Управљање квалитетом радне и животне средине
Кључне речи:	Квалитет унутрашњег ваздуха; суспендоване честице; PM_{10}; $PM_{2.5}$; low-cost сензори; PM-MoN; проактивни мониторинг; IAQI; IoT; јавни објекти.
УДК:	502.3:613.155]:72.012.8(043.3)
CERIF класификација:	T270 Технологија заштите животне средине, контрола загађивања
Тип лиценце Креативне заједнице:	Одабрани тип лиценце: **CC BY-NC-ND**

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Nenad Živković, PhD, Full Professor (Retired) University of Niš, Faculty of Occupational Safety
Title of Doctoral Dissertation:	Development of a Proactive Monitoring System for Particulate Matter in the Indoor Air of Public Buildings
Abstract:	Air quality monitoring is the basis for assessing human exposure to pollutants and managing health risks. Although air quality is most frequently considered within the context of ambient (outdoor) pollution, the fact that people spend most of their time indoors underscores the importance of indoor air quality as a vital factor in total exposure. This is particularly true for public buildings, where occupancy patterns, ventilation regimes, and activities can cause dynamic fluctuations in pollutant levels. Existing monitoring systems are not sufficiently efficient, as they rely on periodic measurements or expensive reference systems, which limits monitoring continuity, spatial coverage, and timely detection of pollution episodes. *This dissertation presents research aimed at developing a methodology and a system for proactive monitoring of particulate matter in the indoor air of public buildings.* The focus is on the PM_{10} and $PM_{2.5}$ fractions of particulate matter, as they are significant indicators of air quality, exhibit pronounced dynamics in indoor environments, and are linked to health risks. The *PM-MoN* system was developed on the basis of low-cost sensors, a microcontroller platform, IoT architecture, cloud infrastructure, a web interface, and an Indoor Air Quality Index (IAQI) model. The research encompassed a literature review, the development of the hardware-software platform, laboratory and field testing, co-location measurements using reference and equivalent instruments, statistical data processing, and the application of calibration and correction models. The results confirmed the reliability of the *PM-MoN* system in tracking changes in particulate matter concentrations, identifying elevated pollution episodes, and providing a basis for assessing occupant exposure. It was verified that relative humidity and temperature influence the response of low-cost PM sensors, which makes correction models necessary for a more reliable interpretation of the obtained values. The developed IAQI model enables the categorization of indoor air quality and the implementation of corrective measures. It is concluded that the integration of low-cost sensors, calibration and correction models, the IAQI approach, and IoT technologies represents a scientifically justified and practically applicable approach to the proactive monitoring of indoor air quality in public buildings.

Scientific Field:	Environmental and Occupational Safety Engineering
Scientific Discipline:	Occupational and Environmental Quality Management
Key Words:	Indoor air quality; particulate matter; PM_{10}; $PM_{2.5}$; low-cost sensors; PM-MoN; proactive monitoring; IAQI; IoT; public buildings.
UDC:	502.3:613.155]:72.012.8(043.3)
CERIF Classification:	T 270 Environmental technology, pollution control
Creative Commons License Type:	Selected License Type: **CC BY-NC-ND**

Захвалност аутора

Најискренију захвалност дугујем свом ментору, проф. др Ненаду Живковићу, професору у пензији, на указаном поверењу, несебичној подршци, стручним саветима и драгоценом вођењу током израде ове дисертације. Његов допринос мом академском и професионалном развоју био је од непроцењивог значаја.

Посебну захвалност изражавам др Виши Тасићу, вишем научном сараднику Института за рударство и металургију Бор, на великој помоћи, стручним саветима и подршци током свих фаза истраживања, посебно у реализацији мерења, анализи резултата и припреми научних радова.

Искрено захваљујем и осталим члановима комисије – проф. др Амелији Ђорђевић, проф. др Срђану Глишовићу и проф. др Леониду Стоименову – на сугестијама, подршци и доприносу унапређењу ове дисертације.

Велику захвалност упућујем и проф. др Душици Пешић и мр Милени Станковић на подршци, охрабрењу и подстицају да истрајем на путу израде докторске дисертације.

Хвала мојим колегама на сарадњи и колегијалности, а пријатељима на разумевању и ослонцу током свих ових година.

Најдубљу захвалност дугујем својој породици на безусловној љубави и подршци, а посебно својој животној сапутници Катарини, на стрпљењу, разумевању и снази коју ми је пружала током овог захтевног периода.

Ову докторску дисертацију посвећујем Ани. Иако тек ишчекујемо њен долазак на свет, помисао на њу била ми је извор снаге и мотивације у завршној фази овог рада.

Аца В. Божилов

Садржај

СПИСАК ТАБЕЛА I
СПИСАК СЛИКА II
КОРИШЋЕНЕ СКРАЋЕНИЦЕ V
1. УВОД И ИСТРАЖИВАЧКИ ОКВИР 1
1.1. Уводна разматрања 1
1.2. Предмет истраживања 3
1.3. Идентификација истраживачког проблема 4
1.4. Циљеви научног истраживања 6
1.5. Хипотезе истраживања 7
1.6. Очекивани резултати и допринос истраживања 9
1.7. Примењене научне методе 11
1.8. Структура докторске дисертације 12
1.9. Објављене научне публикације у области докторске дисертације 13
1.10. Литература за поглавље 1 16
2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ 17
2.1. Квалитет унутрашњег ваздуха (*IAQ*) 17
2.2. Суспендоване честице PM_{10} и $PM_{2.5}$ и здравствени ефекти 19
2.3. Мониторинг квалитета ваздуха у затвореним просторима 21
2.4. *Low-cost* сензори и системи мониторинга квалитета ваздуха 23
2.5. Индекси квалитета ваздуха (*AQI* и *IAQI*) 26
2.6. *IoT* системи и информационо-комуникационе технологије 28
2.7. Критички преглед литературе и идентификација истраживачког јаза 31
2.8. Литература за поглавље 2 33
3. РАЗВОЈ СИСТЕМА ПРОАКТИВНОГ МОНИТОРИНГА КВАЛИТЕТА УНУТРАШЊЕГ ВАЗДУХА 39
3.1. Сензорске мреже, *IoT* приступ и концепт развоја система 39
3.2. *Low-cost* сензори: избор, перформансе и ограничења 42
3.3. Калибрација и валидација сензорског система 46
3.4. Развој и имплементација система *PM-MoN* 50
3.4.1. Хардверска компонента система 53
3.4.2. Софтверска компонента система 63
3.4.2.1. *PM-MoN* мрежни чвор заснован на *Arduino Mega* микроконтролеру 64
3.4.2.2. *NodeMCU ESP8266/ESP32* мрежни чвор 66
3.4.2.3. *Raspberry Pi* мрежни чвор 67
3.5. Прикупљање, обрада и интеграција података 69

3.6. Комуникација и пренос података ... 73
3.7. Визуализација и кориснички интерфејс ... 75
3.8. Имплементација система у реалним условима ... 82
3.9. Критичка анализа система ... 85
3.10. Литература за поглавље 3 ... 88
4. ВАЛИДАЦИЈА СИСТЕМА, *IAQI* И ПРОЦЕНА ИЗЛОЖЕНОСТИ ... 93
4.1. Експериментални дизајн и методологија валидације ... 93
4.2. Калибрација, валидација и процена перформанси система ... 94
4.2.1. Локације и кампање мерења ... 94
4.2.2. Референтна опрема и услови колокације ... 96
4.2.3. Статистички показатељи перформанси ... 99
4.2.4. Корекциони фактори ... 101
4.2.5. Резултати валидације у Бору ... 103
4.2.6. Резултати валидације у Нишу ... 105
4.2.7. Упоредна анализа и оцена применљивости *PM-MoN* система ... 107
4.3. Утицај температуре и релативне влажности на резултате мерења ... 111
4.4. Примена машинског учења за корекцију сензорских мерења ... 115
4.5. Развој и имплементација *IAQI* модела ... 122
4.6. Процена изложености корисника ... 128
4.7. Проактивно интегрисано управљање квалитетом унутрашњег ваздуха ... 131
4.8. Литература за поглавље 4 ... 132
5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕПОРУКЕ ... 136
5.1. Сумарни приказ резултата ... 136
5.2. Потврда научних хипотеза ... 139
5.3. Научни допринос истраживања ... 141
5.4. Практични допринос и примена резултата ... 143
5.5. Ограничења система и препоруке за будућа истраживања ... 146
БИОГРАФИЈА АУТОРА ... 149
ИЗЈАВЕ АУТОРА ... 150

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 3.1.	*Упоредни приказ карактеристика одабраних low-cost PM сензора*	44
Табела 4.1.	*Корекциони фактори*	103
Табела 4.2.	*Основна статистика резултата кампање мерења у Бору (масене концентрације PM, SD, CV, тачност, MBE, RMSE и IMV)*	104
Табела 4.3.	*Основна статистика резултата кампање мерења у Нишу (масене концентрације PM, SD, CV, тачност, MBE, RMSE и IMV)*	106
Табела 4.4.	*Вредности коефицијента детерминације (R^2)*	108
Табела 4.5.	*Прецизност PM монитора*	110
Табела 4.6.	*Критеријуми за категоризацију индекса квалитета унутрашњег ваздуха (IAQI)*	125

СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1.	*Шематски приказ постојећих система мониторинга квалитета ваздуха и њиховог развоја од централизованих референтних станица ка дистрибуираним сензорским и IoT системима*	22
Слика 2.2.	*Шематски приказ принципа рада оптичког сензора за мерење концентрација суспендованих честица*	24
Слика 2.3.	*Шематски приказ утицаја релативне влажности на очитавања оптичких сензора за мерење суспендованих честица*	25
Слика 2.4.	*Шематски приказ основне архитектуре IoT система за мониторинг квалитета ваздуха*	29
Слика 3.1.	*Концептуални приказ сензорске мреже и IoT система мониторинга квалитета ваздуха*	39
Слика 3.2.	*Шематски приказ IoT система типа „Климерко“*	40
Слика 3.3.	*Концепт интеграције PM-MoN у IoT систем*	41
Слика 3.4.	*Чвор PM-MoN мреже*	42
Слика 3.5.	*Принцип рада оптичког сензора за детекцију суспендованих честица*	43
Слика 3.6.	*Утицај релативне влажности на одзив low-cost PM сензора*	45
Слика 3.7.	*Приказ поступка калибрације и валидације PM сензора*	49
Слика 3.8.	*Концептуални модел развоја система проактивног мониторинга суспендованих честица*	51
Слика 3.9.	*Основна варијанта PM-MoN уређаја*	53
Слика 3.10.	*Layout двостране PCB плоче уређаја*	54
Слика 3.11.	*Arduino Mega микроконтролерска платформа*	54
Слика 3.12.	*PM сензор SDS011*	55
Слика 3.13.	*DHT22 сензор*	55
Слика 3.14.	*RTC модул DS3231*	56
Слика 3.15.	*NodeMCU ESP8266 модул*	57
Слика 3.16.	*GPRS/GSM модул SIM900*	57
Слика 3.17.	*MicroSD модул*	58
Слика 3.18.	*Дисплеј модул LCD2004*	58

Слика 3.19. *Мембранска тастатура са 16 тастера* 58
Слика 3.20. *Модул BMP180* 59
Слика 3.21. *CO_2 модул SenseAir S8* 59
Слика 3.22. *VOC сензор MS1100* 60
Слика 3.23. *Блок шема повезивања модула PM-MoN платформе (пуна конфигурација)* 60
Слика 3.24. *Модул за повезивање MCU ESP8266 Wi-Fi и CO_2 модула SenseAir S8 на PM-MoN* 61
Слика 3.25. *Блок шема повезивања модула PM-MoN чвора на бази NodeMCU платформе* 61
Слика 3.26. *Реализовани PM-MoN мрежни чвор на бази NodeMCU платформе* 62
Слика 3.27. *Блок шема повезивања модула PM-MoN чвора на бази Raspberry Pi платформе* 62
Слика 3.28. *Реализовани PM-MoN мрежни чвор на бази Raspberry Pi платформе* 63
Слика 3.29. *Архитектура софтверског система PM-MoN* 64
Слика 3.30. *Дијаграм тока обраде података у систему PM-MoN* 69
Слика 3.31. *Ток обраде података: аквизиција – филтрирање – валидација – агрегација – интеграција* 72
Слика 3.32. *Архитектура комуникације и преноса података у систему PM-MoN* 74
Слика 3.33. *Логички модел визуализације података у PM-MoN систему: локални приказ, web интерфејс и удаљени приступ* 76
Слика 3.34. *Пример структуре web интерфејса за приказ резултата мерења са више сензорских чворова* 77
Слика 3.35. *Пример графичког приказа концентрација PM_{10} у web интерфејсу* 78
Слика 3.36. *Пример real-time приказа концентрација полутаната и IAQI категорија у web интерфејсу* 79
Слика 3.37. *Концепт извоза и преузимања података из web интерфејса за даљу анализу* 80
Слика 3.38. *Пример SMS комуникације између корисника и мрежног чвора* 81

Слика 3.39. *Предлог корисничког dashboard-а за јавне објекте са приказом тренутног стања, трендова и препорука* 82
Слика 3.40. *PM-MoN чворови на репрезентативним мерним местима* 83
Слика 4.1. *Локације на којима је вршена калибрација PM-MoN система* 95
Слика 4.2. *Колокација уређаја у лабораторији ИРМ Бор* 96
Слика 4.3. *Колокација уређаја у лабораторији ФЗНР Ниш* 97
Слика 4.4. *Колокација уређаја на локацији ГП Бор* 97
Слика 4.5. *Колокација уређаја на локацији ИЗЈЗ Ниш* 98
Слика 4.6. *Whatman QM-A (47 mm) филтери пре и након експонирања* 99
Слика 4.7. *Средње сатне концентрације PM у амбијенталном ваздуху измерене на локацији АМС ГП Бор у негрејној сезони: а) PM_{10}, б) $PM_{2.5}$* 105
Слика 4.8. *Средње сатне вредности концентрација PM у унутрашњем ваздуху измерене у лабораторији ФЗНР у Нишу током грејне сезоне: а) PM_{10}, б) $PM_{2.5}$* 107
Слика 4.9. *Дијаграми расејања средњих сатних концентрација PM у спољашњем ваздуху на локацији ГП Бор током грејне сезоне: а) PM_{10}; б) $PM_{2.5}$* 112
Слика 4.10. *Дијаграми расејања средњих сатних концентрација PM у унутрашњем ваздуху на локацији ФЗНР Ниш током грејне сезоне: а) PM_{10}; б) $PM_{2.5}$* 113
Слика 4.11. *Упоредни приказ корекције мерења low-cost PM сензора применом линеарних и ансамбл модела: а) ULR, MLR и RF модели за PM_{10} и $PM_{2.5}$; б) ULR, MLR и XGBoost модели за $PM_{2.5}$* 118
Слика 4.12. *Зависност IAQI вредности од концентрације суспендованих честица са приказом категорија квалитета ваздуха* 126

КОРИШЋЕНЕ СКРАЋЕНИЦЕ

Скраћеница	Значење
adjR²	*прилагођени коефицијент детерминације*
AH	*апсолутна влажност ваздуха*
AMC	*аутоматска мерна станица*
ANN	*вештачке неуронске мреже*
AP	*прецизност уређаја истог типа*
AQI	*индекс квалитета ваздуха*
CV	*коефицијент варијације*
DQO	*циљ квалитета података*
ELV	*граничне вредности изложености*
EPA	*Агенција за заштиту животне средине Сједињених Америчких Држава*
F	*корекциони фактор*
HVAC	*грејање, вентилација и климатизација*
IAQ	*квалитет унутрашњег ваздуха*
IAQI	*индекс квалитета унутрашњег ваздуха*
IMV	*међумониторска варијабилност*
IoT	*интернет ствари*
MAE	*средња апсолутна грешка*
MBE	*средња грешка пристрасности*
MLR	*мултиваријантна линеарна регресија*
NDIR	*недисперзивни инфрацрвени сензорски принцип*
NRMSE	*нормализовани корен средње квадратне грешке*
P1/P2/P3	*ознаке три тестирана PM-MoN уређаја*
PM	*суспендоване честице*
PM_{10}	*суспендоване честице аеродинамичког пречника ≤ 10 μm*
$PM_{2.5}$	*суспендоване честице аеродинамичког пречника ≤ 2,5 μm*
PM-MoN	*развијени систем/мрежни чвор за мониторинг суспендованих честица*
R^2	*коефицијент детерминације*
RF	*модел/алгоритам машинског учења*
RH	*релативна влажност ваздуха*
RMSE	*корен средње квадратне грешке*

Скраћеница	Значење
SBS	*синдром болесне зграде*
SD	*стандардна девијација*
SEPA	*Агенција за заштиту животне средине Републике Србије*
ULR	*универијантна линеарна регресија*
VOC	*испарљива органска једињења*
XGBoost	*модел/алгоритам машинског учења*
ГП Бор	*градски парк у Бору, мерна локација*
ГС	*грејна сезона*
ИЗЈЗ Ниш	*Институт за јавно здравље у Нишу, мерна локација*
ИРМ Бор	*Институт за рударство и металургију у Бору, мерна локација*
НС	*негрејна сезона*
СЗО	*Светска здравствена организација*
ФЗНР Ниш	*Факултет заштите на раду у Нишу, мерна локација*

1. УВОД И ИСТРАЖИВАЧКИ ОКВИР

1.1. Уводна разматрања

Квалитет унутрашњег ваздуха (енгл. *indoor air quality – IAQ*) представља један од кључних фактора здравља људи, квалитета живота и радне ефикасности у савременим урбаним друштвима. С обзиром на то да становништво урбаних средина проводи између 80 % и 90 % времена у затвореним просторима, унутрашње окружење постаје доминантан сегмент укупне изложености аерозагађењу [1]–[3]. У том смислу, квалитет ваздуха у затвореним просторима не представља искључиво питање комфора, већ значајан јавно-здравствени, технички и регулаторни изазов.

За разлику од спољашње средине, унутрашњи простори представљају ограничене системе са смањеним капацитетом дисперзије и самопречишћавања ваздуха, што погодује акумулацији загађења. Концентрације појединих загађујућих супстанци у затвореним просторима често могу да достигну или превазиђу спољашње нивое, нарочито у условима неадекватне вентилације, присуства великог броја корисника или интензивних унутрашњих извора емисије [2]–[4]. На квалитет унутрашњег ваздуха истовремено утичу спољашње загађење, карактеристике објекта, грађевински материјали, вентилациони системи, као и активности корисника простора.

Посебан проблем представља изражена просторна и временска променљивост концентрација загађујућих супстанци у затвореним просторима. За разлику од амбијенталног окружења, где су промене често спорије и предвидљивије, у унутрашњем концентрације загађујућих супстанци могу значајно да осцилирају током кратких временских интервала услед промене броја корисника, режима вентилације, ресуспензије честица или других специфичних активности за дати простор. Овакве флуктуације могу да доведу до краткотрајних епизода високих концентрација загађујућих супстанци, које стандардни периодични мониторинг често не региструје адекватно, иако оне могу да имају значајан утицај на здравље изложених особа [4].

Здравствени значај квалитета унутрашњег ваздуха посебно је изражен када су у питању суспендоване честице, нарочито честице фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$. Ове честице представљају један од најзначајнијих индикатора аерозагађења због доказане повезаности са респираторним, кардиоваскуларним и другим хроничним обољењима [1], [5]. У затвореним просторима суспендоване честице могу да допру из спољашње средине

инфилтрацијом, али и да се генеришу у самом унутрашњем простору услед активности корисника, укључујући грејање, кување, кретање и др.

Објекти јавне намене представљају посебно значајну категорију са аспекта процене квалитета унутрашњег ваздуха. Велика фреквенција корисника, променљиви режими коришћења, различити обрасци вентилације и специфичне функционалне карактеристике ових простора стварају услове за изражену динамику промена концентрација суспендованих честица. Посебан изазов представља и различита структура корисника, јер у овим просторима често бораве и осетљиве групе, попут деце, старих лица или болесних особа. И поред тога, мониторинг квалитета ваздуха у оваквим објектима је често ограничен на спорадична мерења или потпуно изостаје, чиме се смањује могућност правовремене идентификације ризичних епизода и ефикасног управљања квалитетом ваздуха.

Традиционални приступи мониторингу квалитета ваздуха углавном се заснивају на референтним методама које обезбеђују високу тачност, али су истовремено повезане са високим трошковима, сложеним одржавањем и ограниченом просторном покривеношћу [2], [3]. Као последица, њихова примена у континуираном мониторингу великог броја затворених простора остаје практично, са становишта економичности, тешко остварива.

Развој нискобуџетних (енгл. *low-cost*) сензорских технологија, *IoT* система (енгл. *internet of things*) и информационо-комуникационих платформи пружа могућност за увођење нових приступа заснованих на проактивном мониторингу квалитета унутрашњег ваздуха. Овакви системи обезбеђују континуирано прикупљање података у реалном времену, пружају детаљнији увид у динамику загађења и олакшавају дефинисање индекса квалитета ваздуха прилагођених унутрашњем простору, што истовремено омогућава правовремено предузимање адекватних корективних мера.

У том контексту, развој система проактивног мониторинга суспендованих честица у унутрашњем ваздуху јавних објеката представља значајан истраживачки правац са израженим научним и практичним потенцијалом. Интеграцијом *low-cost* сензора, калибрационих модела и информационих технологија могуће је развити приступачне, функционалне и оперативно применљиве системе који превазилазе ограничења класичних метода мониторинга квалитета ваздуха.

Предмет ове дисертације проистиче управо из потребе за развојем методолошки заснованог, валидираног и практично применљивог система за процену и управљање квалитетом унутрашњег ваздуха у објектима јавне намене, са посебним фокусом на праћење суспендованих честица као доминантног индикатора изложености корисника и потенцијалног ризика по њихово здравље.

Упркос значајном броју истраживања у области квалитета ваздуха, интегрисани системи који омогућавају континуирани мониторинг, валидацију сензорских података и оперативно управљање квалитетом унутрашњег ваздуха у реалном времену и даље нису довољно развијени.

1.2. Предмет истраживања

Један од основних предуслова за очување здравља људи, квалитета живота и радне ефикасности јесте адекватан квалитет ваздуха, што је препознато и кроз међународне циљеве одрживог развоја усмерене ка унапређењу квалитета животне средине и здравља становништва [6]. У савременим урбаним срединама, где људи највећи део времена проводе у затвореним просторима, квалитет унутрашњег ваздуха постаје један од кључних чинилаца укупне изложености загађујућим супстанцама.

Унутрашњи простори јавних објеката представљају специфична функционална окружења у којима квалитет ваздуха зависи од сложене интеракције спољашњих извора загађења, унутрашњих емисија, грађевинских и вентилационих карактеристика објекта, као и интензитета и динамике коришћења простора. У таквим условима суспендоване честице су један од најзначајнијих показатеља загађења, с обзиром на њихово порекло, динамику концентрација и потенцијални утицај на здравље корисника простора.

Посебан истраживачки проблем произилази из чињенице да су просторно и временски ограничене епизоде повишених концентрација суспендованих честица у унутрашњем ваздуху јавних објеката још увек недовољно истражене. Постојећи приступи мониторингу често се заснивају на ограниченим кампањским мерењима или примени скупих референтних система, што значајно смањује могућност континуиране процене изложености и правовременог реаговања.

Превазилажење ових ограничења захтева развој нових методолошких приступа заснованих на континуираном, просторно дистрибуираном и ценовно приступачном мониторингу. У том смислу, примена *low-cost* сензора, савремених информационо-комуникационих технологија, *IoT* платформи и напредних метода обраде података омогућава развој проактивних система мониторинга који могу да обезбеде висок ниво оперативности уз значајно ниже трошкове у односу на традиционалне методе.

Посебан значај оваквог приступа огледа се у могућности дефинисања индекса квалитета унутрашњег ваздуха (енгл. *indoor air quality index – IAQI*), заснованог на континуираном праћењу концентрација суспендованих честица и интерпретацији података у контексту процене ризика по здравље корисника простора. На тај начин мониторинг прераста из пасивног система прикупљања података у активан алат за управљање квалитетом ваздуха и подршку при доношењу одлука.

Доступност савремених софтверских и комуникационих решења додатно омогућава интеграцију система мониторинга са корисничким интерфејсима, *web* сервисима и алатима за даљинско праћење, чиме се обезбеђује приступачност информација како управљачима објеката, тако и крајњим корисницима простора.

На основу претходно изнетих разматрања, предмет научног истраживања у овој докторској дисертацији јесте испитивање загађења унутрашњег ваздуха објеката јавне намене кроз проактивни мониторинг суспендованих честица, применом система заснованог на *low-cost* сензорима, калибрационим и корекционим моделима, *IAQI* приступу и информационо-комуникационим технологијама. Овако дефинисан предмет истраживања усмерен је ка процени могућности да се континуираним, валидираним и ценовно приступачним мониторингом унапреди процена изложености корисника простора и подржи коративно управљање квалитетом унутрашњег ваздуха у реалном времену.

1.3. Идентификација истраживачког проблема

Суспендоване честице представљају један од најзначајнијих показатеља квалитета ваздуха и доминантан фактор процене изложености аерозагађењу у затвореним просторима [1]–[3]. Њихов значај посебно је изражен у објектима јавне намене, где велика фреквенција корисника, променљиве активности, различити вентилациони режими и утицај спољашњег загађења доприносе израженој временској и просторној променљивости концентрација.

Иако је значај суспендованих честица по здравље људи широко препознат, постојећи системи процене квалитета унутрашњег ваздуха у јавним објектима и даље су доминантно засновани на ограниченим кампањским мерењима, парцијалним анализама или примени референтних инструмената чија висока цена, сложеност одржавања и ограничена доступност значајно умањују могућност њихове шире имплементације [2]–[4]. Као последица, у пракси често недостају континуирани резултати мерења

концентрација суспендованих честица са високом временском резолуцијом неопходни за адекватну процену стварне изложености корисника простора.

Кључни истраживачки проблем огледа се у недостатку методолошки стандардизованих, валидираних и оперативно применљивих система који би омогућили континуирано праћење концентрација суспендованих честица у унутрашњем ваздуху јавних објеката у реалном времену. Постојећи приступи често нису адекватни за динамичке услове затворених простора, нити обезбеђују довољан ниво просторне дистрибуције података и правовремену интерпретацију резултата.

Додатни изазов представља чињеница да примена *low-cost* сензора, упркос значајном потенцијалу за развој економичних и просторно дистрибуираних мрежа мониторинга, захтева пажљиву калибрацију, валидацију и развој одговарајућих модела корекције података како би се обезбедио потребан ниво поузданости. Без адекватне методолошке обраде, њихова примена може да буде ограничена услед одступања у тачности, утицаја микроклиматских услова и варијабилности перформанси самих сензора.

Поред техничких ограничења мониторинга, посебан проблем представља и недостатак јасно дефинисаних процедура за интерпретацију података у контексту квалитета унутрашњег ваздуха. Постојећи индекси квалитета ваздуха углавном су развијени за спољашње окружење (енгл. *air quality index – AQI)*, док су системи прилагођени процени квалитета унутрашњег ваздуха у односу на суспендоване честице и даље недовољно развијени или ограничено примењени.

На основу наведеног, истраживачки проблем ове докторске дисертације може се дефинисати као потреба за развојем интегрисаног система проактивног мониторинга суспендованих честица у унутрашњем ваздуху јавних објеката, који ће објединити континуирано мерење концентрација суспендованих честица, валидирану примену *low-cost* сензора, развој калибрационих и корекционих модела, дефинисање *IAQI* приступа за унутрашњи ваздух, информационо-комуникациону инфраструктуру за континуирани мониторинг, као и подршку корективном управљању квалитетом унутрашњег ваздуха.

Решавање наведеног проблема има вишеструки значај, јер доприноси унапређењу научних сазнања у области мониторинга квалитета унутрашњег ваздуха, развоју практично применљивих система заштите здравља корисника јавних објеката, као и стварању основе за будућу стандардизацију и регулаторно унапређење ове области. Оваквим приступом превазилазе се постојеће парцијалне методе мониторинга и обезбеђује интеграција мерења, анализе, интерпретације и управљања квалитетом ваздуха у јединствен систем.

1.4. Циљеви научног истраживања

Општи циљ истраживања ове докторске дисертације јесте развој методологије за процену квалитета унутрашњег ваздуха у односу на загађење суспендованим честицама, кроз пројектовање, валидацију и примену иновативног система проактивног мониторинга заснованог на *low-cost* сензорским технологијама, калибрационим и корекционим моделима, *IAQI* приступу и савременим информационо-комуникационим решењима, са циљем корективног управљања квалитетом унутрашњег ваздуха у објектима јавне намене у реалном времену.

Реализација овог циља подразумева интеграцију мерних, аналитичких и информационих компоненти система, чиме се омогућава континуирано праћење концентрација суспендованих честица, интерпретација података кроз *IAQI* приступ, процена изложености корисника простора и подршка при доношењу правовремених оперативних мера.

У складу са општим циљем, дефинисани су и појединачни циљеви истраживања који обухватају:

- испитивање могућности примене *low-cost* сензора за одређивање концентрација суспендованих честица у унутрашњем ваздуху у реалном времену;
- пројектовање иновативног система за мониторинг суспендованих честица у објектима јавне намене;
- лабораторијску и теренску валидацију система упоредним мерењем са референтним инструментима;
- примена калибрационих и корекционих модела за унапређење поузданости сензорских система;
- дефинисање методологије за процену квалитета унутрашњег ваздуха у односу на суспендоване честице, развој и имплементацију индекса квалитета унутрашњег ваздуха (*IAQI*);
- успостављање информационо-комуникационе инфраструктуре за даљинско праћење и управљање подацима у реалном времену;
- обезбеђење доступности података крајњим корисницима путем функционалних и приступачних алата;
- процену могућности примене развијеног система као подршке при доношењу одлука у функцији корективног управљања квалитетом унутрашњег ваздуха.

У складу са дефинисаним циљевима, истраживање је укључило избор репрезентативних објеката јавне намене за експерименталну примену система, анализу карактеристика унутрашњег окружења релевантних за динамику концентрација суспендованих честица, избор и процену перформанси сензорских технологија, развој протокола за прикупљање, обраду, валидацију и интеграцију података, као и развој модела за корекцију података у односу на референтне методе. Такође, истраживање је обухватило имплементацију система у реалним условима, анализу просторне и временске дистрибуције концентрација суспендованих честица, као и евалуацију функционалности *IAQI* приступа.

Експериментални део истраживања реализован је у објектима јавне намене са израженим флуктуацијама броја корисника, као и у објектима са повећаним захтевима у погледу квалитета унутрашњег окружења, чиме је омогућена процена применљивости система у различитим оперативним условима.

На тај начин, постављени циљеви истраживања обухватају не само развој техничког система мониторинга, већ и успостављање научно засноване методологије која омогућава практичну примену резултата у функцији заштите здравља, унапређења управљања квалитетом унутрашњег ваздуха и потенцијалног регулаторног развоја ове области.

1.5. Хипотезе истраживања

У оквиру истраживања полази се од основне научне хипотезе да ***примена нове методологије за процену квалитета унутрашњег ваздуха у односу на суспендоване честице у објектима јавне намене, засноване на проактивном мониторингу применом low-cost сензора, калибрационих модела, IAQI приступа и информационих технологија, омогућава ефикасно коративно управљање квалитетом унутрашњег ваздуха у реалном времену***.

Основна хипотеза заснива се на претпоставци да интеграција савремених сензорских технологија, валидационих процедура, модела обраде података, информационо-комуникационих система и одговарајућих методологија интерпретације података може да превазиђе ограничења традиционалних приступа мониторингу, чиме се обезбеђује поузданија процена изложености суспендованим честицама и ствара основа за унапређење заштите здравља корисника јавних објеката.

На основу дефинисане основне хипотезе постављене су и помоћне хипотезе:

- квалитет унутрашњег ваздуха у објектима јавне намене значајно је условљен присуством суспендованих честица, као једног од доминантних показатеља аерозагађења у затвореним просторима;
- фактори унутрашње средине, нарочито релативна влажност и температура ваздуха, значајно утичу на перформансе *low-cost* сензора и захтевају примену одговарајућих калибрационих и корекционих модела;
- постоји статистички значајна и висока корелација између концентрација суспендованих честица измерених применом *low-cost* сензорских система и вредности добијених референтним или еквивалентним методама мерења;
- системи засновани на *low-cost* сензорима, уз адекватну калибрацију/корекцију и валидацију података, могу да обезбеде задовољавајући ниво тачности и поузданости за континуирано праћење концентрација суспендованих честица у реалним условима експлоатације;
- развој и имплементација индекса квалитета унутрашњег ваздуха (*IAQI*), заснованог на континуираном праћењу суспендованих честица, може значајно да унапреди интерпретацију података, процену нивоа изложености и информисање корисника о потенцијалним здравственим ризицима;
- континуирани мониторинг у реалном времену омогућава ефикаснију идентификацију краткотрајних епизода повећаних концентрација суспендованих честица него периодична мерења;
- интеграција *low-cost* сензора, *IoT* архитектуре, *cloud* инфраструктуре и *web* интерфејса омогућава развој функционалног система за даљински мониторинг и визуализацију података.

Потврда постављених хипотеза омогућава научно утемељење нове методологије и потврђује оправданост развоја интегрисаног система проактивног мониторинга као функционалног алата за унапређење квалитета унутрашњег ваздуха у објектима јавне намене.

1.6. Очекивани резултати и допринос истраживања

Очекивани резултати истраживања су:

- развој научно засноване и практично применљиве методологије за процену квалитета унутрашњег ваздуха у односу на суспендоване честице у објектима јавне намене;
- развој и валидација система проактивног мониторинга заснованог на примени *low-cost* сензора, чиме се остварује континуирано, просторно дистрибуирано и ценовно приступачно праћење концентрација суспендованих честица у реалном времену;
- примена одговарајућих калибрационих и корекционих модела, којима се обезбеђује потребан ниво тачности и поузданости сензорских система у односу на референтне методе, уз истовремено очување њихове оперативне и економске предности, чиме се стварају услови за ширу практичну примену оваквих система у јавним објектима;
- развој методологије за процену и управљање квалитетом унутрашњег ваздуха кроз формирање индекса квалитета унутрашњег ваздуха (*IAQI*), прилагођеног специфичностима унутрашњег простора и концентрацијама суспендованих честица;
- развој информационо-комуникационе инфраструктуре, укључујући *web* сервисе, корисничке интерфејсе и алате за даљинско праћење, чиме се омогућава правовремена доступност података управљачима објеката, запосленима и посетиоцима;
- постављање основе за развој будуће законске регулативе којом би се дефинисале дозвољене граничне вредности *PM* у унутрашњем ваздуху јавних објеката.

Са научног аспекта, истраживање доприноси проширењу теоријских и практичних сазнања у области мониторинга квалитета унутрашњег ваздуха, валидације *low-cost* сензорских система, развоја методологија процене изложености суспендованим честицама и имплементације *IAQI* приступа. Формирање базе података о перформансама сензора, калибрационим параметрима и карактеристикама унутрашњег аерозагађења представља додатну основу за даља истраживања и унапређење ове области.

Научни допринос дисертације огледа се у развоју методолошког оквира за валидацију и примену *low-cost* сензора у условима унутрашњег окружења, примени калибрационих и корекционих модела за унапређење поузданости сензорских података, дефинисању модела индекса квалитета унутрашњег ваздуха (*IAQI*) заснованог на концентрацијама суспендованих честица, као и у интеграцији сензорских, аналитичких и информационо-комуникационих компоненти у јединствен систем проактивног мониторинга.

Практични допринос истраживања огледа се у развоју функционалног система за континуирани мониторинг квалитета унутрашњег ваздуха објеката јавне намене, применљивог у реалним условима, који омогућава правовремену идентификацију епизода повећаних концентрација суспендованих честица, процену изложености корисника и подршку при доношењу оперативних мера у циљу унапређења квалитета ваздуха и заштите здравља. Додатни практични допринос истраживања огледа се и у могућности примене развијеног система у различитим типовима јавних објеката, унапређењу заштите здравља корисника, подршци управљању квалитетом ваздуха и стварању основе за будуће регулаторне и стандардизационе оквире у области квалитета унутрашњег ваздуха.

Резултати истраживања имају и шири друштвени значај због развоја приступачних технологија мониторинга које омогућавају повећање доступности информација о квалитету ваздуха, подизање свести о ризицима изложености суспендованим честицама, као и унапређење превентивног деловања у функцији заштите јавног здравља. Имплементација *IAQI* приступа представља важан корак ка трансформацији мониторинга из пасивног система прикупљања података у активан алат за управљање квалитетом ваздуха. Овај индекс омогућава ефикаснију интерпретацију резултата мониторинга, процену нивоа изложености и јасније информисање корисника о потенцијалним здравственим ризицима.

Укупно посматрано, резултати ове докторске дисертације превазилазе развој појединачног техничког система, јер обухватају успостављање интегрисаног научно-практичног модела за процену, мониторинг и управљање квалитетом унутрашњег ваздуха у објектима јавне намене. На тај начин развијени приступ представља искорак у односу на постојеће методе мониторинга, јер омогућава прелазак са пасивног праћења на активно и правовремено управљање квалитетом унутрашњег ваздуха.

1.7. Примењене научне методе

Током израде докторске дисертације примењен је скуп основних и општенаучних метода, укључујући методе анализе, синтезе, индукције и дедукције, као и аналитичко-дедуктивни, хипотетичко-дедуктивни и статистички приступ. Анализа садржаја релевантне стручне и научне литературе имала је значајну улогу у формирању теоријског оквира истраживања, идентификацији постојећих сазнања, као и у дефинисању истраживачког проблема и методолошког приступа.

Методе анализе и синтезе коришћене су за систематизацију и критичку евалуацију података о квалитету унутрашњег ваздуха, постојећим системима мониторинга суспендованих честица, могућностима примене *low-cost* сензорских технологија, као и о постојећим индексима квалитета ваздуха и савременим хардверско-софтверским решењима. На основу ових метода дефинисана је архитектура развијеног система, његове функционалне компоненте и приступ имплементацији.

Експериментални део истраживања обухватио је лабораторијска и теренска испитивања перформанси *low-cost* сензора за мерење концентрација суспендованих честица. У контролисаним лабораторијским условима анализиран је утицај релевантних параметара унутрашње средине, пре свега температуре и релативне влажности ваздуха, на одзив сензора. У реалним условима експлоатације спроведена су упоредна мерења са референтним инструментима, у циљу процене тачности, прецизности и поузданости система.

Мерни поступци реализовани су у складу са принципима следљивости и обезбеђења квалитета података, при чему је посебна пажња посвећена развоју и примени процедура за валидацију података, обраду резултата, калибрацију сензора и интеграцију података из више извора. У том контексту примењени су савремени приступи фузије података (енгл. *data fusion*), у циљу смањења мерне несигурности и унапређења квалитета резултата мерења.

Индуктивни приступ коришћен је за извођење општих закључака и законитости на основу експериментално добијених резултата, док је дедуктивни приступ омогућио примену дефинисаних теоријских и методолошких поставки на конкретне системе мониторинга и услове њихове примене.

Статистичка обрада података спроведена је применом дескриптивне и инференцијалне статистике, укључујући корелациону и регресиону анализу, као и одговарајуће статистичке тестове за процену значајности резултата и потврду постављених хипотеза. Обрада и анализа података реализоване су коришћењем софтверских алата *SPSS* и *Microsoft Excel*, уз примену савремених метода моделовања када је то било оправдано.

Укупан методолошки приступ заснован је на интеграцији теоријске анализе, експерименталне верификације, статистичке обраде и практичне имплементације система, чиме је омогућено поуздано и научно засновано вредновање развијеног система проактивног мониторинга суспендованих честица у унутрашњем ваздуху јавних објеката.

Посебна пажња посвећена је обезбеђивању квалитета резултата мерења, укључујући валидацију података, процену мерне несигурности и усклађеност са релевантним стандардима.

1.8. Структура докторске дисертације

Докторска дисертација организована је као логички повезана целина која обухвата теоријска, методолошка, развојна, експериментална и аналитичка поглавља, са циљем систематичног разматрања дефинисаног проблема квалитета унутрашњег ваздуха у односу на суспендоване честице и развоја система проактивног мониторинга у објектима јавне намене. Структура рада прати природан ток научног истраживања, од идентификације проблема и анализе постојећих сазнања, преко развоја оригиналног система, до његове експерименталне валидације и процене научног и практичног доприноса.

Прво поглавље представља уводни део рада, у оквиру којег су дефинисани предмет истраживања, идентификован истраживачки проблем, постављени циљеви и научне хипотезе, представљени очекивани резултати и научни допринос, као и описане примењене научне методе. Поглавље поставља концептуални и истраживачки оквир дисертације.

Друго поглавље обухвата теоријске основе и критички преглед литературе релевантне за предмет истраживања. У овом делу анализирају се квалитет унутрашњег ваздуха, суспендоване честице као доминантне загађујуће супстанце, здравствени ефекти изложености, постојећи системи мониторинга, *low-cost* сензорске технологије, *IAQI* концепти, *IoT* приступи и идентификовани истраживачки јаз који оправдава спровођење предметног истраживања.

Треће поглавље представља централни развојно-технички део дисертације и посвећено је развоју система проактивног мониторинга суспендованих честица. У овом поглављу приказују се концепт система, избор и анализа сензорских компоненти, калибрација и валидација сензора, развој мерног система, хардверска и софтверска архитектура, комуникациона инфраструктура, системи обраде података, визуализација и имплементација у реалним условима.

Четврто поглавље обухвата експерименталну валидацију развијеног система, развој и примену *IAQI* модела, анализу резултата мониторинга, процену изложености корисника простора, статистичку обраду података, укључујући и напредне методе машинског учења. Ово поглавље има кључну улогу у научној потврди функционалности и применљивости развијеног система.

Пето поглавље представља завршни део дисертације, у оквиру којег су сумирани основни резултати истраживања, извршена потврда научних хипотеза, приказан научни и практични допринос рада, дефинисане препоруке за даљи развој система, као и предложени правци будућих истраживања.

Након сваког поглавља следи литература, која обухвата све релевантне научне, стручне и техничке изворе коришћене током истраживања.

Оваква структура дисертације омогућила је систематично, научно утемељено и практично оријентисано разматрање истраживачког проблема, обезбеђујући јасну повезаност између теоријских основа, техничког развоја, експерименталне потврде и практичне примене добијених резултата.

1.9. Објављене научне публикације у области докторске дисертације

У оквиру досадашњег научноистраживачког рада објављено је више научних публикација које тематски припадају области квалитета унутрашњег ваздуха, мониторинга суспендованих честица, примене *low-cost* сензорских технологија и развоја система за процену аерозагађења. Наведени радови представљају значајну научну основу за реализацију предметне докторске дисертације, јер обухватају теоријске, експерименталне и апликативне аспекте истраживања релевантне за дефинисани предмет рада.

Објављене публикације укључују оригиналне научне радове у међународним и националним часописима, радове презентоване на домаћим и међународним научним конференцијама, као и техничка решења и иновације из области мониторинга квалитета ваздуха. Поједини резултати приказани у наведеним радовима представљају основу или делимично интегрисане сегменте истраживачког процеса развијаног кроз ову дисертацију.

Досадашњи научни допринос у области докторске дисертације огледа се кроз следеће репрезентативне публикације:

1. **A. Božilov**, V. Tasić, N. Živković, I. Lazović, M. Blagojević, N. Mišić, and D. Topalović, "Performance assessment of NOVA SDS011 low-cost PM sensor in various microenvironments," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 194, no. 9, p. 595, Sep. 2022, doi: 10.1007/s10661-022-10290-7.
2. M. M. Protić, **A. V. Božilov**, V. M. Tasić, I. M. Lazović, N. Z. Mišić, and B. A. Radović, "Evaluating the effect of a modified air purifier on air quality in an apartment in Nis, Serbia," *Thermal Science*, vol. 29, no. 6 Part A, pp. 4503–4512, 2025, doi: 10.2298/TSCI250122089P.
3. **A. V. Božilov**, V. M. Tasić, N. Z. Mišić, I. M. Lazović, D. B. Topalović, N. V. Živković, and N. S. Mirkov, "Civil air quality monitoring as an alternative and supplement to the National Air Quality Monitoring Network," *Thermal Science*, vol. 27, no. 3 Part B, pp. 2255–2263, 2023, doi: 10.2298/TSCI220303103B.
4. V. M. Tasić, **A. V. Božilov**, N. Z. Mišić, D. B. Topalović, I. S. Randjelović, N. S. Mirkov, and V. V. Kamenović, "A portable air quality monitor based on low-cost sensors," *Thermal Science*, vol. 27, no. 3 Part B, pp. 2309–2319, 2023, doi: 10.2298/TSCI220118107T.
5. M. Protić, **A. Božilov**, V. Tasić, B. Radović, N. Živković, and N. Mišić, "Comparative analysis of measurements of suspended particles in the city of Niš (Serbia) during the heating season.," in *Proceedings of the 9th International WeBIOPATR Workshop & Conference: Particulate Matter – Research and Management*, Belgrade: Vinča Institute of Nuclear Sciences – National Institute of the Republic of Serbia – University of Belgrade, 2023, pp. 150–156. [Online]. Available: https://vinar.vin.bg.ac.rs/bitstream/handle/123456789/14716/WeBIOPATR2023_Proceedings.pdf
6. V. Tasić, **A. Božilov**, I. Lazović, and N. Mirkov, "Merenje koncentracija CO_2 u unutrašnjem vazduhu objekata primenom low-cost senzora i monitora," *Bakar (Copper)*, vol. 45, no. 2, pp. 11–18, 2020, [Online]. Available: https://irmbor.co.rs/wp-content/uploads/2020/12/Bakar-2-2020-komplet.pdf
7. V. Tasić, M. Cocić, B. Radović, and **A. Božilov**, "Procena uticaja spoljašnjeg zagađenja suspendovanim česticama na kvalitet unutrašnjeg vazduha na Tehničkom fakultetu u Boru," *Bakar (Copper)*, vol. 45, no. 2, pp. 19–28, 2020, [Online]. Available: https://irmbor.co.rs/wp-content/uploads/2020/12/Bakar-2-2020-komplet.pdf

8. **A. Božilov**, N. Živković, and N. Mišić, “Air quality monitoring based on metal oxide gas sensors and Zigbee technology,” *Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection*, vol. 12, no. 3, pp. 319–328, 2015, [Online]. Available: https://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUWorkLivEnvProt/article/view/1393
9. **A. Božilov**, “Evaluation of a low-cost-sensor-based particulate matter monitor: a comparative study,” *Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection*, vol. 21, no. 3, pp. 143–153, Dec. 2024, doi: 10.22190/FUWLEP241206013B.
10. D. B. Topalović, I. D. Smičiklas, M. B. Radenković, S. Stanković, I. Ž. Pepić, **A. Božilov**, and M. Protić, “Primena XGBoost algoritma za kalibraciju prenosnog PAQMON 1.0 PM monitora u uslovima spoljašnje sredine,” *Bakar*, vol. 50, no. 1, pp. 55–56, 2025, doi: 10.5937/bakar2501055T.

Поред научних публикација, кандидат је учествовао и у развоју иновативних техничких решења из предметне области.

Мали патент:

11. I. Lazović, V. Tasić, N. Mirkov, R. Jeremijević, D. Topalović, **A. Božilov**, N. Mišić, and R. Jovanović, “Uređaj za merenje kvaliteta vazduha : mali patent br. 1716 U1,” 2021, *Zavod za intelektualnu svojinu Republike Srbije, Srbija*. [Online]. Available: https://unilib.phaidrabg.rs/detail/o:381

Техничко решење:

12. V. Tasić, R. Kovačević, T. Apostolovski-Trujić, I. Lazović, N. Mirkov, D. Topalović, **A. Božilov**, and N. Mišić, “Uređaj za merenje kvaliteta vazduha PAQMAN 2020 (Bitno poboljšano tehničko rešenje na nacionalnom nivou, M84),” 2020, *Arhiva Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor*.

Укупан број и квалитет публикованих резултата потврђује континуирану истраживачку активност кандидата у области мониторинга квалитета ваздуха, валидације сензорских система и развоја практично применљивих решења, чиме се додатно аргументује научна утемељеност и истраживачка релевантност докторске дисертације.

1.10. Литература за поглавље 1

[1] World Health Organization, “WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide,” Geneva, Switzerland, Sep. 2021. Accessed: Apr. 12, 2025. [Online]. Available: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

[2] U.S. Environmental Protection Agency, “Integrated Science Assessment for Particulate Matter, EPA/600/R-19/188,” Washington, DC, USA, Dec. 2019. Accessed: Apr. 13, 2025. [Online]. Available: https://assessments.epa.gov/risk/document/&deid=347534

[3] U.S. Environmental Protection Agency, “Supplement to the 2019 Integrated Science Assessment for Particulate Matter, EPA/635/R-22/028,” Washington, DC, USA, May 2022. Accessed: Apr. 13, 2025. [Online]. Available: https://assessments.epa.gov/risk/document/&deid=354490

[4] A. P. Jones, “Indoor air quality and health,” *Atmos. Environ.*, vol. 33, no. 28, pp. 4535–4564, Dec. 1999, doi: 10.1016/S1352-2310(99)00272-1.

[5] C. A. Pope and D. W. Dockery, “Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect,” *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 56, no. 6, pp. 709–742, Jun. 2006, doi: 10.1080/10473289.2006.10464485.

[6] United Nations General Assembly, “Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, A/RES/70/1,” New York, NY, USA, Oct. 2015. Accessed: Apr. 10, 2025. [Online]. Available: https://docs.un.org/en/A/RES/70/1

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

2.1. Квалитет унутрашњег ваздуха (*IAQ*)

Квалитет унутрашњег ваздуха (*IAQ*) представља скуп физичких, хемијских и биолошких карактеристика ваздуха у затвореним просторима које директно утичу на здравље, комфор и радну способност корисника простора [1]. У савременим научним истраживањима *IAQ* се посматра као сложен динамички систем у коме долази до међусобне интеракције извора емисије, вентилације, транспорта загађујућих супстанци, физичко-хемијских трансформација и понашања корисника [2], [3].

За разлику од спољашње средине, унутрашњи простори представљају ограничене системе са смањеним капацитетом дисперзије и самопречишћавања ваздуха, што доводи до акумулације загађујућих супстанци и изражене просторне и временске варијабилности концентрација. Ове карактеристике условљавају формирање микроокружења са различитим нивоима загађења, нарочито у просторима са променљивим режимом коришћења и недовољном вентилацијом [2].

Квалитет унутрашњег ваздуха одређује се кроз више међусобно повезаних параметара, међу којима посебан значај имају суспендоване честице фракције PM_{10} и $PM_{2.5}$, гасовите супстанце (CO_2, CO, NO_2, O_3), испарљива органска једињења (енгл. *volatile organic compounds – VOC*), микробиолошки агенси, као и микроклиматски услови, укључујући температуру и релативну влажност ваздуха [3], [4]. Поред објективно мерљивих параметара, значај имају и субјективни показатељи, као што су перцепција квалитета ваздуха и осећај комфора.

Суспендоване честице фракције PM_{10} и $PM_{2.5}$ представљају један од најзначајнијих индикатора квалитета унутрашњег ваздуха, пре свега због повезаности са здравственим ефектима. Честице мањег аеродинамичког пречника продиру дубље у плућа, где могу да изазову инфламаторне процесе, поремећаје функције плућа и кардиоваскуларне ефекте [4]. У унутрашњем ваздуху ове честице потичу из спољашње средине (инфилтрација) и из унутрашњих извора (кретање корисника, припрема хране, грејање и друге активности).

Вентилација има централну улогу у одржавању квалитета унутрашњег ваздуха, јер омогућава размену унутрашњег и спољашњег ваздуха и смањење концентрација загађујућих супстанци. Недовољна вентилација доводи до акумулације загађујућих супстанци и повећане изложености, док прекомерна вентилација може да повећа енергетске губитке и да унесе спољашње загађење у простор [4].

Савремени трендови у пројектовању објеката, посебно у домену енергетске ефикасности, доводе до смањења инфилтрације ваздуха и повећане херметичности објеката, што може негативно да утиче на квалитет унутрашњег ваздуха уколико нису обезбеђени адекватни вентилациони системи.

Климатске промене могу посредно да утичу на квалитет унутрашњег ваздуха кроз промене спољашњег загађења, температуре и режима вентилације, али се њихов утицај у затвореним просторима испољава пре свега преко интеракције са техничким карактеристикама објекта и понашањем корисника [5].

Улога корисника простора представља један од кључних фактора променљивости *IAQ*. Присуство људи утиче на концентрацију CO_2, температуру и влажност ваздуха, док активности попут кретања, чишћења и кувања могу да доведу до емисије или ресуспензије честица [6]–[8]. Због тога *IAQ* представља резултат интеракције техничких карактеристика објекта и начина његовог коришћења.

Методолошки приступи процени *IAQ* обухватају инструментална мерења, анализу временских образаца, процену изложености и развој индекса квалитета ваздуха. Краткорочна мерења омогућавају идентификацију епизода повишених концентрација, док дугорочни мониторинг омогућава анализу сезонских и функционалних образаца.

У савременим системима управљања објектима, *IAQ* се све чешће интегрише у концепт паметних зграда, где се подаци са сензора користе за аутоматско управљање вентилацијом и климатизацијом. Овакви системи омогућавају прелазак са реактивног на проактивни приступ управљању квалитетом ваздуха.

Из наведеног произилази да квалитет унутрашњег ваздуха представља сложен и динамичан систем, чије разумевање захтева интеграцију мерења, анализе и управљања, са циљем смањења изложености и унапређења здравља корисника простора.

У циљу једноставније интерпретације параметара квалитета ваздуха, у савременим системима мониторинга све чешће се примењују индекси квалитета ваздуха, који омогућавају трансформацију сложених мерних података у јединствен показатељ погодан за процену ризика и доношење одлука.

2.2. Суспендоване честице PM_{10} и $PM_{2.5}$ и здравствени ефекти

Изложеност суспендованим честицама фракције PM_{10} и $PM_{2.5}$ представља један од најзначајнијих фактора ризика по здравље у савременим урбаним и индустријским срединама. Бројна епидемиолошка и токсиколошка истраживања показују да ове честице имају директан утицај на респираторни и кардиоваскуларни систем, као и на укупни морталитет [9]–[15].

Суспендоване честице представљају комплексну смешу чврстих и течних честица различитог хемијског састава, величине, порекла и морфологије, диспергованих у ваздуху. Њихова класификација најчешће се заснива на аеродинамичком пречнику, при чему се као најзначајније фракције издвајају суспендоване честице PM_{10}, односно честице аеродинамичког пречника мањег од 10 μm, и суспендоване честице $PM_{2.5}$, односно честице аеродинамичког пречника мањег од 2,5 μm [13]. Аеродинамичке карактеристике ових честица одређују њихово понашање у атмосфери, способност транспорта, депозиције у респираторном систему и потенцијалне здравствене последице.

Суспендоване честице фракције PM_{10} углавном се депонују у горњим деловима респираторног система, укључујући носну и трахеобронхијалну регију, док суспендоване честице фракције $PM_{2.5}$ због мањих димензија могу да пенетрирају дубље у плућне алвеоле, па чак и да доспеју у системску циркулацију [13]. Ова способност дубљег продирања чини фине суспендоване честице посебно значајним фактором здравственог ризика.

Хемијски састав суспендованих честица изузетно је хетероген и зависи од извора емисије. У њихов састав могу бити укључени органски и неоргански угљеник, сулфати, нитрати, амонијум-јони, тешки метали, полициклични ароматични угљоводоници, биолошки материјал и друге токсичне компоненте [5], [12], [13]. У затвореним просторима суспендоване честице могу да потичу из спољашње средине инфилтрацијом, али и из унутрашњих извора као што су грејање, кување, сагоревање, ресуспензија прашине, коришћење уређаја и активности корисника простора.

Здравствени ефекти изложености суспендованим честицама обухватају широк спектар акутних и хроничних последица. Дуготрајна изложеност повезана је са повећаним ризиком од респираторних болести, укључујући астму, хроничну опструктивну болест плућа, бронхитис и смањену плућну функцију, као и са кардиоваскуларним обољењима попут хипертензије, атеросклерозе, инфаркта миокарда и можданог удара [1], [7]. Поред тога, бројна епидемиолошка истраживања указују на повезаност суспендованих честица са метаболичким поремећајима, неуролошким ефектима и повећаним укупним морталитетом.

Механизми штетног деловања суспендованих честица заснивају се првенствено на индукцији оксидативног стреса, инфламаторних процеса, ћелијских оштећења и поремећаја имунолошког одговора. Фине и ултрафине честице могу да носе токсичне адсорбоване супстанце које додатно појачавају биолошке ефекте изложености [6]. Посебан ризик присутан је код осетљивих популационих група, укључујући децу, старије особе, особе са постојећим респираторним и кардиоваскуларним обољењима, као и особе са повећаном дневном изложеношћу у специфичним затвореним просторима.

У објектима јавне намене, као што су школе, вртићи, канцеларије, здравствене установе и други простори са великим бројем корисника, значај суспендованих честица додатно је изражен због могућности дуготрајне и поновљене изложености већег броја људи у условима променљивих концентрација. У таквим условима чак и краткотрајне епизоде повећаних концентрација могу да имају значајан кумулативни ефекат на здравље корисника [16].

Поред масене концентрације, дистрибуција величине и хемијски састав суспендованих честица такође имају значајан утицај на процену здравственог ризика [11]. Међутим, масене концентрације суспендованих честица фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$ и даље представљају основне и најшире прихваћене показатеље изложености у регулаторним и истраживачким оквирима.

Светска здравствена организација (енгл. *World Health Organization – WHO*) континуирано наглашава потребу за смањењем изложености суспендованим честицама, при чему су смернице за PM_{10} и $PM_{2.5}$ последњих година додатно пооштрене услед нових научних доказа о штетности чак и релативно ниских концентрација [1]. Ово потврђује да не постоји потпуно безбедан праг изложености суспендованим честицама, већ да сваки ниво смањења концентрација може да има позитиван ефекат на јавно здравље.

У контексту квалитета унутрашњег ваздуха, суспендоване честице представљају један од најважнијих индикатора због своје учесталости, мерљивости, регулаторног значаја и директне повезаности са здравственим ризицима. Њихово континуирано праћење, валидна процена концентрација и правовремено управљање изложеношћу представљају кључне компоненте савремених система за заштиту здравља корисника затворених простора.

2.3. Мониторинг квалитета ваздуха у затвореним просторима

Мониторинг квалитета ваздуха представља основу процене изложености загађујућим супстанцама, идентификације просторних и временских образаца аерозагађења, као и развоја стратегија заштите здравља становништва.

Традиционални системи мониторинга квалитета ваздуха доминантно се заснивају на референтним методама мерења, које обезбеђују висок ниво тачности, поузданости и регулаторне усклађености [14], [15]. За одређивање концентрација суспендованих честица фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$ најчешће се користе гравиметријске методе, дефинисане стандардима као што је *EN 12341:2023* [15]. Ове методе подразумевају сакупљање честица на филтерима током дефинисаног временског периода, након чега се маса честица одређује мерењем разлике масе филтера пре и после узорковања.

Поред гравиметријских метода, у пракси се широко користе и аутоматски монитори који раде на принципу расејања светлости или бета-апсорпције. Ови уређаји омогућавају мерења у реалном времену и представљају основу савремених мрежа за мониторинг квалитета ваздуха [17], [18]. Иако обезбеђују високу временску резолуцију, њихова тачност може да зависи од карактеристика аеросола и услова средине, што захтева периодичну калибрацију у односу на референтне методе.

Националне мреже мониторинга квалитета ваздуха заснивају се на комбинацији референтних и еквивалентних метода и омогућавају континуирано праћење концентрација загађујућих супстанци на различитим локацијама. Ови системи обезбеђују поуздане податке за регулаторне сврхе, али су ограничени у погледу просторне резолуције и флексибилности, због високих трошкова набавке и одржавања опреме.

Савремени мониторинг системи све више се ослањају на Интернет ствари (*IoT*), који омогућава повезивање сензора, бежични пренос података, *cloud* складиштење, аналитику у реалном времену и развој корисничких интерфејса [19], [20].

Интеграција сензорских мрежа са *IoT* платформама омогућава не само пасивно прикупљање података, већ и развој проактивних система који могу да подрже аутоматско управљање вентилацијом, филтрацијом и другим корективним мерама. Постојећи системи мониторинга квалитета ваздуха приказани су на слици 2.1.



Слика 2.1. *Шематски приказ постојећих система мониторинга квалитета ваздуха и њиховог развоја од централизованих референтних станица ка дистрибуираним сензорским и IoT системима*

Напредни системи мониторинга све чешће укључују и примену вештачке интелигенције, машинског учења и статистичког моделовања ради унапређења квалитета података, предикције концентрација и оптимизације перформанси система [21], [22]. Овакви приступи омогућавају прелазак са традиционалног мониторинга на интелигентне системе управљања квалитетом ваздуха.

У последњој деценији све већу примену имају системи засновани на *low-cost* сензорима, који омогућавају значајно повећање просторне и временске резолуције мерења [23]–[27]. Ове системе карактеришу мањи трошкови, једноставнија инсталација и могућност примене у различитим типовима окружења, укључујући унутрашње просторе. Међутим, у поређењу са референтним методама, њихова тачност је ограничена и захтева примену поступака калибрације и валидације [21], [22], [27].

Посебан значај low-cost система огледа се у могућности њихове примене на више мерних места, уз учесталије праћење квалитета ваздуха. Овај приступ представља допуну референтним системима, а не њихову замену, јер омогућава потпуније сагледавање просторних и временских промена квалитета ваздуха [28], [29].

Међутим, упркос значајним предностима, *low-cost* сензорски системи суочавају се са бројним изазовима, укључујући нижу тачност, потребу за калибрацијом, утицај микроклиматских параметара, *drift* сензора, ограничен животни век и варијабилност перформанси између уређаја [22], [25]. Због тога њихова успешна примена захтева развој методологија валидације, корекције података и интеграције са референтним мерењима.

Упркос брзом технолошком развоју, бројни изазови и даље остају присутни, нарочито у области стандардизације, регулаторне валидације и дефинисања методолошких оквира за практичну имплементацију *low-cost* система у јавним објектима. Управо овај истраживачки јаз представља основу за развој нових методологија које комбинују економичност, поузданост и оперативну функционалност.

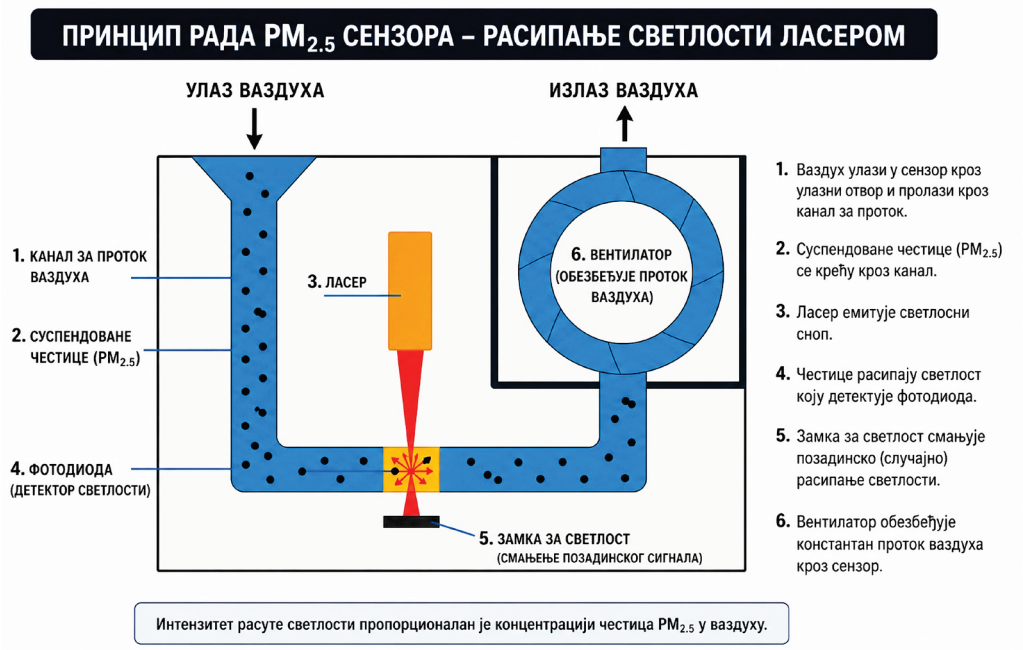
Савремени системи мониторинга квалитета ваздуха стога се развијају ка интегрисаним, вишекомпонентним и проактивним платформама које обједињују сензорске технологије, валидационе процедуре, информационе системе и алате за подршку при доношењу одлука, чиме мониторинг постаје централни елемент савременог управљања квалитетом ваздуха.

2.4. *Low-cost* сензори и системи мониторинга квалитета ваздуха

Развој *low-cost* сензорских технологија у последњој деценији значајно је променио приступ мониторингу квалитета ваздуха. За разлику од класичних референтних система, који су скупи, захтевају сложено одржавање и ограничени су на релативно мали број мерних места, *low-cost* сензори омогућавају формирање густих мрежа за мониторинг и континуирано праћење концентрација суспендованих честица у реалном времену [28], [29].

Посебан значај ових система огледа се у могућности примене у унутрашњем простору, где класични референтни системи често нису практични због своје величине, цене и сложености. Компактне димензије, мала потрошња енергије и могућност интеграције са *IoT* платформама омогућавају примену *low-cost* сензора у различитим типовима објеката, укључујући школе, канцеларије, лабораторије и стамбене просторе.

Највећи број *low-cost* сензора за мерење концентрација суспендованих честица заснива се на оптичком принципу мерења, односно на расејању светлости (енгл. *light scattering*). У овим системима честице пролазе кроз осветљени мерни простор, при чему долази до расејања светлости које региструје фотодетектор, што је шематски приказано на слици 2.2. Интензитет расејане светлости зависи од броја, величине и оптичких карактеристика честица, на основу чега се процењује концентрација суспендованих честица [30].



Слика 2.2. *Шематски приказ принципа рада оптичког сензора за мерење концентрација суспендованих честица (прилагођено према [31])*

Математичка основа овог процеса описана је Миовом теоријом расејања (енгл. *Mie scattering*), која дефинише однос између карактеристика честица и интензитета расејане светлости. Међутим, у реалним условима мерења долази до значајних одступања између оптички процењене и стварне масе суспендованих честица, будући да сигнал зависи не само од концентрације, већ и од дистрибуције величине честица, њиховог хемијског састава и индекса преламања. Ова фундаментална ограничења представљају један од главних извора несигурности у раду *low-cost* сензора [30].

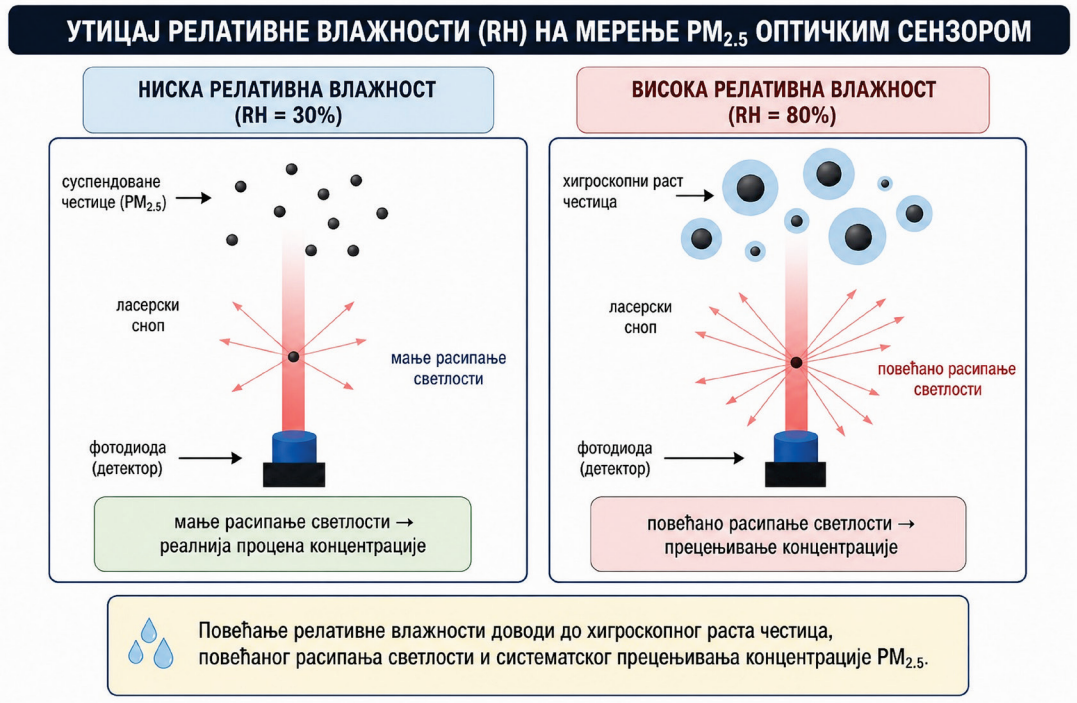
У зависности од конструкције, сензори могу да користе ласерске или *LED* изворе светлости. Ласерски сензори омогућавају већу осетљивост и бољу детекцију ситнијих честица, посебно у домену $PM_{2.5}$, због чега се најчешће користе у савременим *low-cost* системима [4]. Типичан *low-cost* сензор састоји се од извора светлости, мерне коморе, система за транспорт ваздуха, фотодетектора и електронског система за обраду сигнала.

Ваздух се кроз мерну комору најчешће транспортује минијатурним вентилатором, док електронски систем врши анализу сигнала и конверзију у масену концентрацију суспендованих честица.

Једна од најзначајнијих предности *low-cost* сензора јесте могућност мерења у реалном времену са високом временском резолуцијом. Ова карактеристика омогућава идентификацију краткотрајних промена концентрација и анализу динамике загађења, што је посебно важно у унутрашњем ваздуху.

Упркос бројним предностима, *low-cost* сензори имају и значајна ограничења. Њихове перформансе често зависе од спољашњих услова, укључујући температуру, релативну влажност, присуство интерферентних супстанци и промене у хемијском саставу аеросола [21], [22], [25]–[27], [30]. Додатни изазови укључују *drift* сензора, ограничену дугорочну стабилност, међусобну варијабилност између уређаја и потребу за честом калибрацијом [21], [22], [25]–[27].

Један од најзначајнијих фактора који утиче на тачност мерења јесте релативна влажност ваздуха. Повећање релативне влажности доводи до хигроскопског раста честица, чиме се повећава интензитет расејане светлости и долази до прецењивања концентрација. У условима високе влажности (> 70 %), овај ефекат може да буде изразито изражен и представља један од доминантних извора грешке у раду сензора [32], [33]. На слици 2.3 шематски је приказано како хигроскопски раст честица при релативној влажности од 80 % доводи до прецењивања концентрације $PM_{2.5}$ честица.



Слика 2.3. *Шематски приказ утицаја релативне влажности на очитавања оптичких сензора за мерење суспендованих честица*

Због наведених ограничења, примена *low-cost* сензора захтева калибрацију и валидацију у односу на референтне инструменте. Најчешће се користи метода колокације, при којој се сензори постављају у непосредној близини референтних система како би се омогућило поређење резултата мерења [34]–[38].

У савременим истраживањима све већу примену имају алгоритми за корекцију података, који укључују линеарну регресију, мултиваријантне моделе и методе машинског учења. Ови приступи омогућавају смањење систематских одступања и побољшање тачности мерења [39]–[41].

Интеграција *low-cost* сензора са *IoT* платформама омогућава аутоматски пренос, складиштење и визуализацију података у реалном времену [42], [43]. Овакав приступ представља основу савремених система за проактивно управљање квалитетом ваздуха, где се подаци користе не само за праћење стања, већ и за доношење корективних мера.

Иако *low-cost* сензори не могу у потпуности да замене референтне системе у свим регулаторним применама, њихов значај као допунског, дистрибуираног и оперативног алата за процену квалитета ваздуха континуирано расте. Управо развој методолошки валидираних система заснованих на овим технологијама представља један од кључних истраживачких праваца савременог мониторинга квалитета ваздуха [29], [37], [38].

2.5. Индекси квалитета ваздуха (*AQI* и *IAQI*)

Индекси квалитета ваздуха представљају интегрисане методолошке алате развијене са циљем поједностављене интерпретације сложених података о концентрацијама различитих загађујућих супстанци и њихове трансформације у разумљиве информације о нивоу ризика по здравље становништва [44]. Њихова основна функција јесте омогућавање ефикаснијег представљања резултата мониторинга широј јавности, доносиоцима одлука и управљачима система заштите животне средине.

Најпознатији системи индекса квалитета ваздуха развијени су првенствено за спољашњи амбијентални ваздух, укључујући амерички *AQI*, европске индексе квалитета ваздуха, и друге националне моделе [44]–[46]. Ови системи углавном интегришу концентрације кључних загађујућих супстанци, као што су суспендоване честице фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$, озон (O_3), азот-диоксид (NO_2), сумпор-диоксид (SO_2) и угљен-моноксид (CO), при чему се резултати класификују кроз категорије ризика.

У оквиру *AQI* методологије индекс за појединачну загађујућу супстанцу најчешће се израчунава линеарном интерполацијом између дефинисаних концентрационих интервала, при чему се њена концентрација пресликава у одговарајућу индексну вредност према изразу:

$$I_p = \frac{I_{high} - I_{low}}{C_{high} - C_{low}}(C - C_{low}) + I_{low} \quad (2.1)$$

где су I_p индексна вредност за посматрану загађујућу супстанцу, C измерена концентрација те супстанце, C_{low} и C_{high} доња и горња граница концентрационог интервала у који припада измерена концентрација, док I_{low} и I_{high} представљају одговарајуће доње и горње границе индекса за тај интервал. Када се индекс израчуна за више загађујућих супстанци, као коначна *AQI* вредност усваја се највећа добијена вредност, а загађујућа супстанца која је условљава означава се као критична [44], [47].

Иако су спољашњи *AQI* системи широко развијени и стандардизовани, њихова директна примена на унутрашњи ваздух често није адекватна због специфичности затвореног простора, другачијих извора загађења, различитих образаца изложености и значајних микроклиматских утицаја. Унутрашње просторе карактеришу промењљиви функционални услови, ограничена запремина, изражен утицај корисника и специфичне вентилационе карактеристике, због чега стандардни *AQI* модели не одражавају у потпуности реалне ризике по здравље корисника.

Индекс квалитета унутрашњег ваздуха (*IAQI*) развијен је као концепт прилагођен специфичностима унутрашњег окружења, са циљем прецизније процене квалитета ваздуха у затвореним просторима. *IAQI* омогућава интеграцију података о концентрацијама суспендованих честица и гасовитих загађујућих супстанци, па чак и температуре, релативне влажности и других релевантних параметара у јединствен индикатор квалитета ваздуха [48]–[50].

Посебан значај *IAQI* приступа огледа се у могућности прилагођавања специфичним функционалним карактеристикама различитих типова објеката, као што су школе, канцеларије, здравствене установе или стамбени простори. Тиме *IAQI* превазилази ограничења универзалних модела и омогућава реалистичнију процену изложености и здравственог ризика.

Методолошки приступи развоју *IAQI* система разликују се у зависности од избора параметара, пондерисања појединачних загађујућих супстанци, референтних граничних вредности и математичких модела агрегације података [48]–[52]. У већини приступа суспендоване честице имају доминантну улогу због своје директне повезаности са здравственим последицама, регулаторне важности и техничке мерљивости.

Савремени *IAQI* модели све чешће се развијају у оквиру паметних система мониторинга, при чему се подаци из сензорских мрежа, добијени у реалном времену, користе за континуирано ажурирање индекса, визуализацију резултата и аутоматско генерисање препорука или упозорења [48]–[50]. Интеграција *IAQI* са информационим системима значајно повећава његову оперативну вредност.

Један од кључних изазова развоја *IAQI* система јесте недостатак универзално прихваћених стандарда, што доводи до различитих методолошких приступа и ограничене упоредивости резултата истраживања [48]–[51]. Додатно, избор параметара, пондера и референтних прагова мора да буде пажљиво прилагођен специфичним условима примене [52].

У контексту објеката јавне намене, развој *IAQI* представља значајан корак ка унапређењу система процене квалитета унутрашњег ваздуха, јер омогућава прелазак са појединачних мерења концентрација ка интегрисаном моделу процене укупног ризика и подршке корективном управљању.

За потребе савремених система проактивног мониторинга, *IAQI* не представља само комуникациони алат, већ и функционалну компоненту интелигентних система за управљање квалитетом ваздуха. Његова имплементација омогућава правовремено доношење одлука, оптимизацију вентилационих режима, унапређење заштите здравља корисника и развој практично применљивих модела управљања унутрашњим окружењем.

Развој прилагођеног *IAQI* модела за мониторинг суспендованих честица у објектима јавне намене стога представља важан истраживачки допринос и једну од кључних компоненти савремених методологија процене квалитета унутрашњег ваздуха.

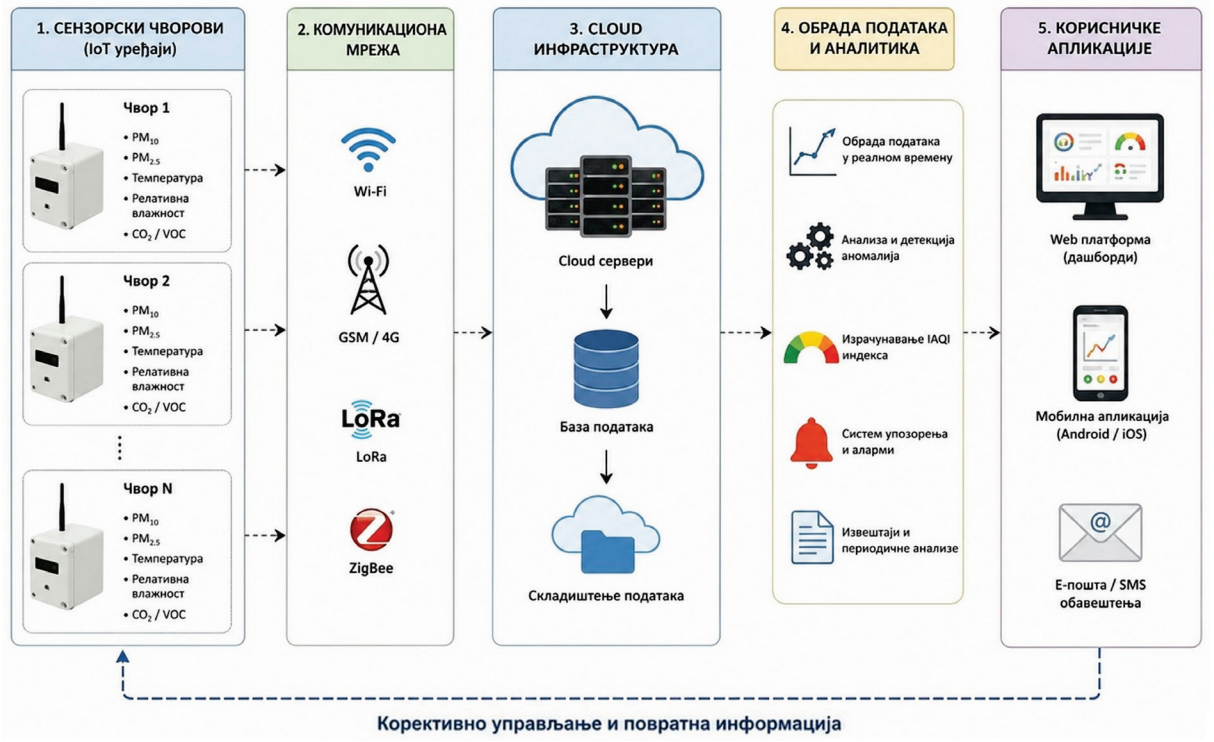
2.6. *IoT* системи и информационо-комуникационе технологије

Савремени развој информационо-комуникационих технологија значајно је унапредио системе мониторинга квалитета ваздуха, омогућавајући прелазак са изолованих мерних уређаја на интегрисане и умрежене платформе за континуирано праћење параметара у реалном времену [42], [43]. У том контексту, *IoT* концепт представља једну од кључних технолошких основа развоја савремених система за мониторинг квалитета унутрашњег ваздуха.

IoT системи заснивају се на повезивању сензора, микроконтролера, комуникационих модула, база података и корисничких интерфејса у јединствен функционални систем. Овакав приступ омогућава аутоматизовано прикупљање, пренос, складиштење, обраду и визуализацију података, чиме се значајно повећава оперативна вредност система мониторинга.

У области мониторинга квалитета ваздуха, *IoT* архитектуре најчешће обухватају сензорске чворове са *low-cost* сензорима, микроконтролерске јединице, бежичне комуникационе модуле, серверску или *cloud* инфраструктуру, и корисничке апликације и *web* интерфејсе, што је шематски приказано на слици 2.4.

Сензорски чворови представљају основне елементе система и омогућавају мерење концентрација суспендованих честица фракције PM_{10} и $PM_{2.5}$, као и других параметара квалитета ваздуха, укључујући температуру, релативну влажност, CO_2 и *VOC* параметре. Измерени подаци се путем комуникационих протокола преносе ка централном серверу или *cloud* платформи, где се врши њихова даља обрада и складиштење [20], [43].



Слика 2.4. *Шематски приказ основне архитектуре IoT система за мониторинг квалитета ваздуха*

За пренос података у *IoT* системима најчешће се користе *Wi-Fi, GSM, LoRa* и *ZigBee* комуникациони протоколи. Избор протокола зависи од захтева система, домета комуникације, потрошње енергије и доступности инфраструктуре [20], [43]. У системима мониторинга унутрашњег ваздуха најчешће се користе *Wi-Fi* и *GSM* комуникације, због једноставне интеграције и могућности континуираног преноса података.

Cloud инфраструктура омогућава централизовано складиштење и обраду великих количина података, као и удаљени приступ резултатима мерења [42]. Овакав приступ омогућава формирање историјских база података, анализу временских трендова и интеграцију различитих мерних локација у јединствен систем мониторинга.

Посебан значај *IoT* приступа огледа се у могућности континуираног праћења параметара унутрашњег ваздуха у реалном времену. За разлику од традиционалних система који се заснивају на периодичним мерењима, *IoT* системи омогућавају идентификацију краткотрајних епизода повећаних концентрација и брзу реакцију у циљу смањења изложености корисника [19], [20], [43].

Визуализација података представља важан сегмент савремених система мониторинга, јер омогућава једноставнију интерпретацију комплексних података. У ту сврху најчешће се користе графички прикази концентрација, *IAQI* индекси, системи упозорења и *web* платформе са могућношћу удаљеног приступа резултатима мерења.

У савременим системима мониторинга све већу улогу имају алгоритми за аутоматску обраду података, који омогућавају корекцију мерења, детекцију аномалија, анализу временских образаца, генерисање упозорења и подршку коративном управљању.

Ови приступи омогућавају прелазак са пасивног праћења стања на проактивне системе управљања квалитетом ваздуха.

У оквиру концепта паметних објеката, системи мониторинга квалитета ваздуха све чешће се интегришу са системима за грејање, вентилацију и климатизацију (енгл. *heating, ventilation, and air conditioning – HVAC*), чиме се омогућава аутоматско прилагођавање режима рада у складу са измереним параметрима квалитета ваздуха [20]. На овај начин системи мониторинга постају део шире инфраструктуре управљања унутрашњим окружењем.

Упркос бројним предностима, имплементација *IoT* система праћена је и одређеним ограничењима. Најзначајнији изазови односе се на поузданост преноса података, стабилност рада система, безбедност и заштиту података, дугорочну стабилност сензора и потребу за периодичном калибрацијом и одржавањем [21], [22], [27].

Поред техничких ограничења, значајан изазов представља и недостатак универзалне стандардизације *IoT* система за мониторинг квалитета ваздуха, што може да ограничи упоредивост резултата и широку примену ових система.

Из наведеног произилази да *IoT* системи и информационо-комуникационе технологије представљају кључну основу савремених система мониторинга квалитета унутрашњег ваздуха. Интеграција сензорских технологија, комуникационих система, *cloud* инфраструктуре и *IAQI* приступа омогућава развој интелигентних система способних за континуирано праћење, анализу и корективно управљање квалитетом ваздуха.

2.7. Критички преглед литературе и идентификација истраживачког јаза

Досадашња истраживања у области квалитета унутрашњег ваздуха, мониторинга суспендованих честица, примене *low-cost* сензора и развоја информационо-комуникационих система значајно су унапредила разумевање проблема аерозагађења у затвореним просторима. Бројне студије потврдиле су значај континуираног праћења концентрација суспендованих честица, потребу за повећањем просторне резолуције мониторинга и потенцијал савремених сензорских технологија као допуне традиционалним системима [28], [29], [53], [54].

Истраживања су показала да *low-cost* сензори могу да имају значајну практичну вредност, нарочито у контексту развоја густих сензорских мрежа, праћења квалитета ваздуха у микроокружењима и унапређења доступности података о квалитету ваздуха [23], [24], [28], [29], [54]. Такође, развој *IoT* платформи, *cloud* инфраструктуре и напредних алгоритама обраде података омогућио је значајан технолошки напредак ка развоју интелигентних система мониторинга [19], [20], [42], [43].

Међутим, упркос евидентном напретку, постоје бројна ограничења у досадашњим истраживањима. Један од кључних проблема огледа се у томе што је велики део истраживања доминантно усмерен на спољашњи амбијентални мониторинг, док су специфичности унутрашњег ваздуха, нарочито у објектима јавне намене, знатно мање заступљене [2]–[4], [48]. Унутрашње просторе карактеришу изражена просторна и временска хетерогеност, променљиво присуство корисника, специфични извори загађења и комплексни вентилациони услови, што захтева посебно прилагођене методолошке приступе.

Додатно ограничење представља чињеница да бројна истраживања *low-cost* сензора остају фокусирана искључиво на процену перформанси појединачних сензора, без развоја интегрисаних система који обједињују валидацију, калибрацију, информациону инфраструктуру, индексирање квалитета ваздуха и подршку управљању [23], [24], [27], [37]. У великом броју случајева истраживања су ограничена на краткорочне експерименталне студије или лабораторијске услове, без свеобухватне теренске имплементације у реалним условима јавних објеката.

Посебан истраживачки јаз присутан је у области развоја *IAQI* система прилагођених унутрашњем ваздуху. Иако постоје различити концепти индекса квалитета ваздуха, универзално прихваћени модели за процену квалитета унутрашњег ваздуха у односу на суспендоване честице и специфичне карактеристике објеката јавне намене и даље нису довољно развијени [44]–[46], [49]–[52].

Такође, у постојећој литератури релативно је ограничен број истраживања која истовремено повезују интеграцију валидираних *low-cost* сензора, *IAQI* методологију, *IoT* инфраструктуру и систем за корективно управљање квалитетом ваздуха.

Недостатак оваквих интегрисаних методолошких приступа представља један од кључних проблема савремене области мониторинга квалитета унутрашњег ваздуха.

Са регулаторног аспекта, додатни изазов представља недовољна стандардизација примене *low-cost* система у функцији процене квалитета унутрашњег ваздуха, што ограничава њихову ширу институционалну примену [14], [15].

На основу критичког прегледа литературе може се закључити да постоји потреба за развојем методолошки заснованог, валидираног и практично применљивог система проактивног мониторинга суспендованих честица у унутрашњем ваздуху објеката јавне намене, који би објединио техничке, аналитичке и управљачке компоненте у јединствен функционални оквир.

Управо идентификовани истраживачки јаз представља основу предметне докторске дисертације, чији је циљ развој интегрисаног система који превазилази ограничења постојећих истраживања кроз комбинацију *low-cost* сензорских технологија, валидационих процедура, информационо-комуникационих система и *IAQI* методологије. На тај начин, истраживање доприноси не само унапређењу техничких решења мониторинга, већ и развоју ширег научно-практичног модела за процену, управљање и заштиту здравља корисника унутрашњих простора.

У односу на постојећа истраживања, ова докторска дисертација уводи интегрисани приступ који по први пут обједињује валидацију *low-cost* сензора, развој *IAQI* модела прилагођеног унутрашњем ваздуху и имплементацију *IoT* система у реалним условима објеката јавне намене, чиме се превазилазе ограничења досадашњих парцијалних приступа.

2.8. Литература за поглавље 2

[1] World Health Organization, "WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide," Geneva, Switzerland, Sep. 2021. Accessed: Apr. 12, 2025. [Online]. Available: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

[2] C. J. Weschler, "Changes in indoor pollutants since the 1950s," *Atmos. Environ.*, vol. 43, no. 1, pp. 153–169, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.044.

[3] A. P. Jones, "Indoor air quality and health," *Atmos. Environ.*, vol. 33, no. 28, pp. 4535–4564, Dec. 1999, doi: 10.1016/S1352-2310(99)00272-1.

[4] L. Morawska *et al.*, "Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment," *Indoor Air*, vol. 23, no. 6, pp. 462–487, Dec. 2013, doi: 10.1111/ina.12044.

[5] J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2016.

[6] N. E. Klepeis *et al.*, "The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants," *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 11, no. 3, pp. 231–252, Jul. 2001, doi: 10.1038/sj.jea.7500165.

[7] W. W. Nazaroff and C. J. Weschler, "Cleaning products and air fresheners: exposure to primary and secondary air pollutants," *Atmos. Environ.*, vol. 38, no. 18, pp. 2841–2865, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.02.040.

[8] European Environment Agency, *Healthy environment, healthy lives – How the environment influences health and well-being in Europe*. Publications Office of the European Union, 2020. doi: 10.2800/53670.

[9] C. A. Pope and D. W. Dockery, "Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 56, no. 6, pp. 709–742, Jun. 2006, doi: 10.1080/10473289.2006.10464485.

[10] R. D. Brook *et al.*, “Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease,” *Circulation*, vol. 121, no. 21, pp. 2331–2378, Jun. 2010, doi: 10.1161/CIR.0b013e3181dbece1.

[11] F. J. Kelly and J. C. Fussell, “Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter,” *Atmos. Environ.*, vol. 60, pp. 504–526, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.06.039.

[12] D. E. Schraufnagel *et al.*, “Air Pollution and Noncommunicable Diseases,” *Chest*, vol. 155, no. 2, pp. 409–416, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.chest.2018.10.042.

[13] J. Tryner *et al.*, “Laboratory evaluation of low-cost PurpleAir PM monitors and in-field correction using co-located portable filter samplers,” *Atmos. Environ.*, vol. 220, p. 117067, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117067.

[14] European Environment Agency, “Air quality monitoring standards and methods,” European Environment Agency. Accessed: Feb. 17, 2026. [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards

[15] Institut za standardizaciju Srbije, *SRPS EN 12341:2023 Vazduh ambijenta – Standardna gravimetrijska metoda merenja za određivanje PM10 ili PM2,5 masene koncentracije suspendovanih čestica*. https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:104555, 2023. Accessed: Mar. 07, 2026. [Online]. Available: https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:104555

[16] L. Morawska *et al.*, “Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure,” *Environ. Int.*, vol. 108, pp. 75–83, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.envint.2017.07.025.

[17] GRIMM Aerosol Technik GmbH (DURAG GROUP), “EDM 180 Approved PM monitor for measuring particulate matter concentration in ambient air (Technical datasheet).” Accessed: Apr. 12, 2025. [Online]. Available: https://www.durag.com/mediafiles/stream/?id=2/c/8/3/2c83bde82e0e6d284fb1336082327ea28a8f0c8b_Datasheet_EDM_180_en_final.pdf

[18] J. H. Gilliam and E. S. Hall, “Reference and Equivalent Methods Used to Measure National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Criteria Air Pollutants - Volume I, EPA/600/R-16/139,” U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, Jun. 2016. Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=321491

[19] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.

[20] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, “Internet of Things for Smart Cities,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, Feb. 2014, doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328.

[21] L. A. Wallace *et al.*, “Validation of continuous particle monitors for personal, indoor, and outdoor exposures,” *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 21, no. 1, pp. 49–64, Jan. 2011, doi: 10.1038/jes.2010.15.

[22] L. Wallace, J. Bi, W. R. Ott, J. Sarnat, and Y. Liu, “Calibration of low-cost PurpleAir outdoor monitors using an improved method of calculating PM,” *Atmos. Environ.*, vol. 256, p. 118432, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118432.

[23] B. Alfano *et al.*, “A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers’ Perspectives,” *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6819, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20236819.

[24] M. Badura, P. Batog, A. Drzeniecka-Osiadacz, and P. Modzel, “Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient $PM_{2.5}$ Monitoring,” *J. Sens.*, vol. 2018, p. 5096540, Oct. 2018, doi: 10.1155/2018/5096540.

[25] H.-Y. Liu, P. Schneider, R. Haugen, and M. Vogt, “Performance Assessment of a Low-Cost PM2.5 Sensor for a near Four-Month Period in Oslo, Norway,” *Atmosphere (Basel).*, vol. 10, no. 2, p. 41, Jan. 2019, doi: 10.3390/atmos10020041.

[26] M. L. Zamora, J. Rice, and K. Koehler, “One year evaluation of three low-cost PM2.5 monitors,” *Atmos. Environ.*, vol. 235, p. 117615, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117615.

[27] J. Venkatraman Jagatha *et al.*, “Calibration Method for Particulate Matter Low-Cost Sensors Used in Ambient Air Quality Monitoring and Research,” *Sensors*, vol. 21, no. 12, p. 3960, Jun. 2021, doi: 10.3390/s21123960.

[28] P. Kumar *et al.*, “The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities,” *Environ. Int.*, vol. 75, pp. 199–205, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.envint.2014.11.019.

[29] L. Morawska *et al.*, “Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?,” *Environ. Int.*, vol. 116, pp. 286–299, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.envint.2018.04.018.

[30] M. I. Mishchenko, “Gustav Mie and the fundamental concept of electromagnetic scattering by particles: A perspective,” *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 110, no. 14–16, pp. 1210–1222, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.jqsrt.2009.02.002.

[31] D. Nedelkovski, “DIY Air Quality Monitor – PM2.5, CO2, VOC, Ozone, Temp & Hum Arduino Meter,” How To Mechatronics. Accessed: Feb. 27, 2026. [Online]. Available: https://howtomechatronics.com/projects/diy-air-quality-monitor-pm2-5-co2-voc-ozone-temp-hum-arduino-meter/

[32] W.-S. Won, R. Oh, W. Lee, S. Ku, P.-C. Su, and Y.-J. Yoon, “Hygroscopic properties of particulate matter and effects of their interactions with weather on visibility,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 16401, Aug. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-95834-6.

[33] R. Jayaratne, X. Liu, P. Thai, M. Dunbabin, and L. Morawska, “The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 11, no. 8, pp. 4883–4890, Aug. 2018, doi: 10.5194/amt-11-4883-2018.

[34] S. Sousan, K. Koehler, L. Hallett, and T. M. Peters, “Evaluation of the Alphasense optical particle counter (OPC-N2) and the Grimm portable aerosol spectrometer (PAS-1.108),” *Aerosol Science and Technology*, vol. 50, no. 12, pp. 1352–1365, Dec. 2016, doi: 10.1080/02786826.2016.1232859.

[35] L. R. Crilley *et al.*, “Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 11, no. 2, pp. 709–720, Feb. 2018, doi: 10.5194/amt-11-709-2018.

[36] K. E. Kelly *et al.*, “Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor,” *Environmental Pollution*, vol. 221, pp. 491–500, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.envpol.2016.12.039.

[37] M. R. Giordano *et al.*, “From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors,” *J. Aerosol Sci.*, vol. 158, p. 105833, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jaerosci.2021.105833.

[38] A. Božilov *et al.*, “Performance assessment of NOVA SDS011 low-cost PM sensor in various microenvironments,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 194, no. 9, p. 595, Sep. 2022, doi: 10.1007/s10661-022-10290-7.

[39] F. M. J. Bulot *et al.*, “Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 7497, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-43716-3.

[40] D. B. Topalović, V. M. Tasić, J. S. S. Petrović, J. Lj. Vlahović, M. B. Radenković, and I. D. Smičiklas, "Unveiling the potential of a novel portable air quality platform for assessment of fine and coarse particulate matter: in-field testing, calibration, and machine learning insights," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 196, no. 10, p. 888, Oct. 2024, doi: 10.1007/s10661-024-13069-0.

[41] D. B. Topalović *et al.*, "Primena XGBoost algoritma za kalibraciju prenosnog PAQMON 1.0 PM monitora u uslovima spoljašnje sredine," *Bakar*, vol. 50, no. 1, pp. 55–56, 2025, doi: 10.5937/bakar2501055T.

[42] L. Da Xu, W. He, and S. Li, "Internet of Things in Industries: A Survey," *IEEE Trans. Industr. Inform.*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, Nov. 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2300753.

[43] J. Jin, J. Gubbi, S. Marusic, and M. Palaniswami, "An Information Framework for Creating a Smart City Through Internet of Things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 2, pp. 112–121, Apr. 2014, doi: 10.1109/JIOT.2013.2296516.

[44] U.S. Environmental Protection Agency, "Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI), EPA 454/B-18-007," Research Triangle Park, NC, USA, Sep. 2018. Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: URL: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf

[45] A. González Ortiz *et al.*, "EEA's revision of the European Air Quality Index bands, ETC HE Report 2024/17," European Topic Centre on Human Health and the Environment, Jul. 2025. doi: 10.5281/zenodo.15781195.

[46] World Health Organization. Regional Office for Europe, *Air quality indexes: key considerations and roadmaps for best practices*. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 2026. Accessed: Apr. 19, 2026. [Online]. Available: https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289062701

[47] B. Wu, S. Zhao, Y. Liu, and C. Zhang, "Do meteorological variables impact air quality differently across urbanization gradients? A case study of Kaohsiung, Taiwan, China," *Heliyon*, vol. 11, no. 2, p. e41694, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e41694.

[48] W. Wei, O. Ramalho, and C. Mandin, "Indoor air quality requirements in green building certifications," *Build. Environ.*, vol. 92, pp. 10–19, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.03.035.

[49] B. W. Dionova, M. N. Mohammed, S. Al-Zubaidi, and E. Yusuf, “Environment indoor air quality assessment using fuzzy inference system,” *ICT Express*, vol. 6, no. 3, pp. 185–194, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.icte.2020.05.007.

[50] H.-H. Kim, M.-J. Kwak, K.-J. Kim, Y.-K. Gwak, J.-H. Lee, and H.-H. Yang, “Evaluation of IAQ Management Using an IoT-Based Indoor Garden,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 6, p. 1867, Mar. 2020, doi: 10.3390/ijerph17061867.

[51] L. Cony Renaud-Salis, O. Ramalho, and M. Abadie, “Towards the definition of an indoor air quality index for residential buildings based on long- and short-term exposure limit values,” *International Journal of Ventilation*, vol. 19, no. 3, pp. 189–200, Jul. 2020, doi: 10.1080/14733315.2019.1615218.

[52] W. Wei, O. Ramalho, M. Derbez, J. Ribéron, S. Kirchner, and C. Mandin, “Applicability and relevance of six indoor air quality indexes,” *Build. Environ.*, vol. 109, no. 3, pp. 42–49, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.09.008.

[53] A. C. Rai *et al.*, “End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring,” *Science of The Total Environment*, vol. 607–608, pp. 691–705, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.266.

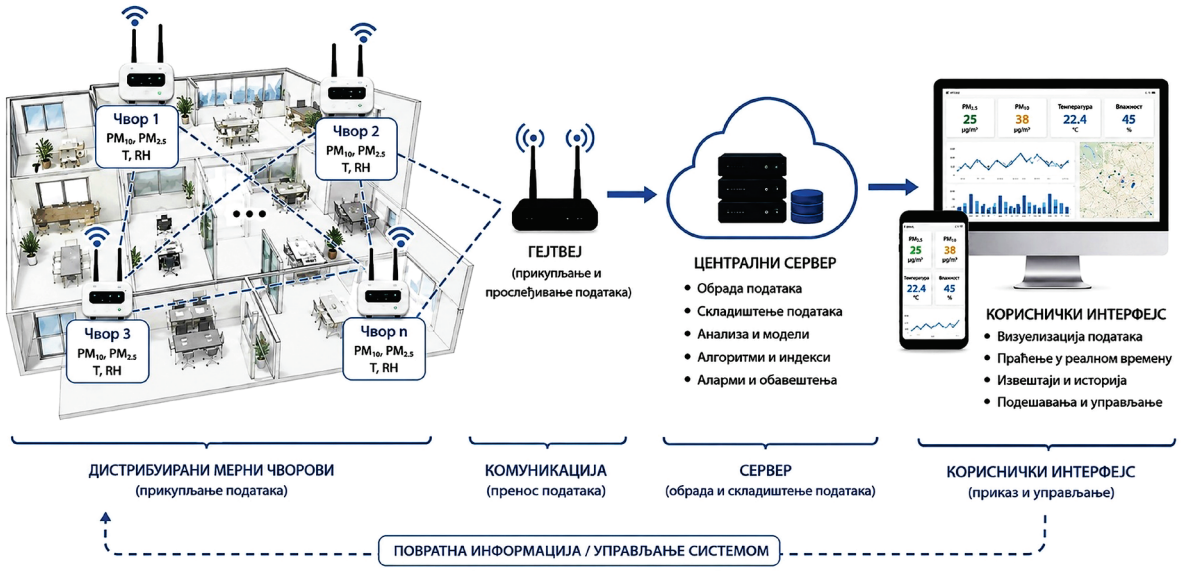
[54] N. Castell *et al.*, “Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?,” *Environ. Int.*, vol. 99, pp. 293–302, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.envint.2016.12.007.

3. РАЗВОЈ СИСТЕМА ПРОАКТИВНОГ МОНИТОРИНГА КВАЛИТЕТА УНУТРАШЊЕГ ВАЗДУХА

3.1. Сензорске мреже, *IoT* приступ и концепт развоја система

Савремени приступи мониторингу квалитета ваздуха заснивају се на интеграцији дистрибуираних сензорских система и информационо-комуникационих технологија, чиме се превазилазе ограничења традиционалних референтних мерних станица [1]. Класичне системе мониторинга, иако су високе тачности, карактеришу високи трошкови, ограничена просторна покривеност и недовољна временска резолуција, што онемогућава детаљно сагледавање просторних и временских варијација концентрација суспендованих честица [1], [2].

Развој *low-cost* сензора и напредак у области микроелектронике и бежичних комуникација довели су до појаве нове генерације мониторинг система, заснованих на густим сензорским мрежама, као што је приказано на слици 3.1. Ови системи омогућавају значајно повећање просторне резолуције мерења и детекцију локалних варијација квалитета ваздуха, које традиционални системи не могу да региструју [2], [3].



Слика 3.1. *Концептуални приказ сензорске мреже и IoT система мониторинга квалитета ваздуха*

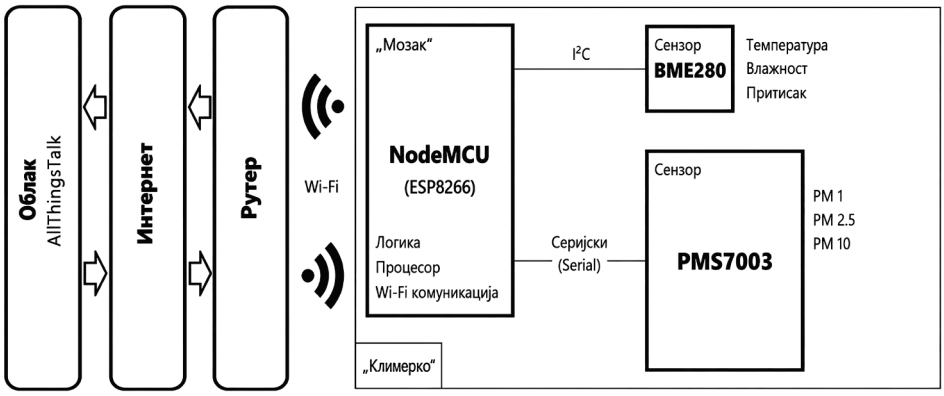
У складу са идентификованим ограничењима класичних система мониторинга и истраживачким јазом дефинисаним у поглављу 2, савремени приступи се заснивају на примени сензорских мрежа и *low-cost* технологија, које омогућавају континуирано праћење концентрација суспендованих честица у реалном времену [3], [4].

Сензорске мреже се састоје од више међусобно повезаних мерних чворова који континуирано прикупљају податке о концентрацијама полутаната и параметрима микроклиме. Посебан значај оваквих система огледа се у могућности примене у урбаним и унутрашњим микросрединама, где је изражена просторна хетерогеност концентрација полутаната и где изложеност становништва значајно варира у кратким временским интервалима [4].

Кључни технолошки оквир оваквих система представља *internet of things (IoT)*, који омогућава интеграцију сензора, комуникационих модула и серверске инфраструктуре у јединствен функционални систем [5]. У *IoT* архитектури, сваки мерни чвор делује као независна јединица која врши мерење, иницијалну обраду података и њихов пренос ка централном систему, као што је приказано на слици 3.2.

У савременим имплементацијама, прикупљени подаци се прослеђују ка *cloud* инфраструктури, где се врши њихово складиштење, анализа и визуализација. Оваква архитектура омогућава даљински приступ подацима, интеграцију више уређаја у јединствену мрежу и развој напредних аналитичких функција [5].

Концепт дистрибуираног мониторинга потврђен је и кроз практичне примене, као што је систем „*Климерко*“, који показује да *low-cost* уређаји могу да буду успешно интегрисани у мреже за индикативни мониторинг квалитета ваздуха, уз задовољавајући ниво поузданости [6].

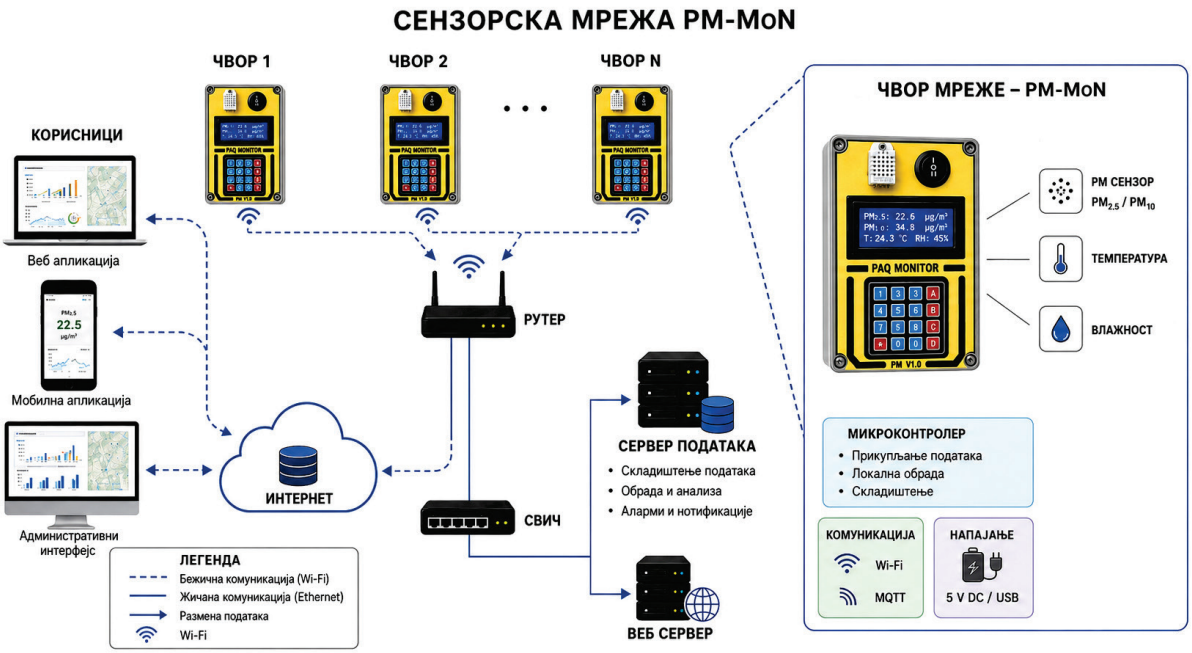


Слика 3.2. *Шематски приказ IoT система типа „Климерко“ (прилагођено према [6])*

Поред тога, бројна истраживања указују на то да резултати мерења *low-cost* сензора могу да буду високо корелирани са резултатима референтних инструмената, али да њихова тачност зависи од услова средине, као што су релативна влажност, температура и састав честица [2], [6], [7]. Ови фактори захтевају примену одговарајућих калибрационих и корекционих модела, што представља један од кључних изазова у примени ових система.

У оквиру овог истраживања, развијено је неколико типова *low-cost* уређаја, чворова сензорске мреже за мониторинг концентрација суспендованих честица, који ће у даљем тексту да буду референцирани под обједињеним називом *PM-MoN*. Ови уређаји представљају основу експерименталног и методолошког приступа у овој дисертацији.

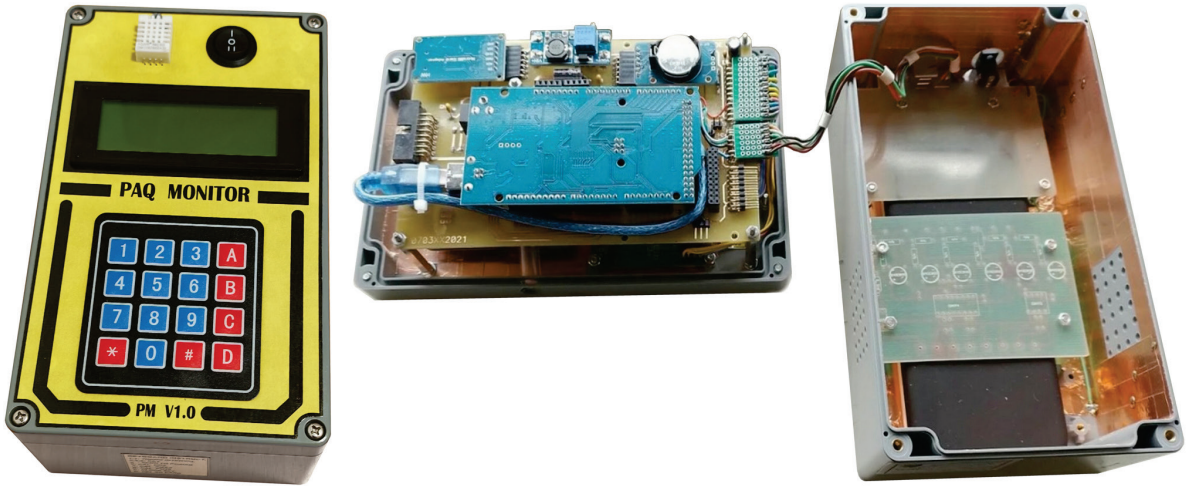
PM-MoN је пројектован као компактан, преносив и енергетски независан систем, намењен за мерење концентрација суспендованих честица фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$, као и основних параметара микроклиме, укључујући температуру и релативну влажност ваздуха. Уређај омогућава континуирано мерење у реалном времену, складиштење података и њихов пренос ка удаљеним системима за даљу анализу, чиме се обезбеђује висок ниво флексибилности и применљивости. Концепт интеграције *PM-MoN* система у *IoT* архитектуру приказан је на слици 3.3.



Слика 3.3. *Концепт интеграције PM-MoN у IoT систем*

Конструкција уређаја заснива се на модуларном приступу, при чему су све компоненте организоване у оквиру интегрисаног хардверског система. Основне функционалне целине обухватају микроконтролерску јединицу, сензорске модуле, модуле за складиштење података, комуникационе интерфејсе и кориснички интерфејс.

Посебна предност оваквог приступа огледа се у могућности проширења функционалности уређаја додавањем нових сензорских модула, чиме се омогућава мерење додатних параметара квалитета ваздуха. Чвор *PM-MoN* мреже приказан је на слици 3.4.



Слика 3.4. *Чвор PM-MoN мреже*

Поред тога, уређај *PM-MoN* је пројектован тако да омогућава рад у различитим режимима мерења, дефинисање интервала узорковања и усредњавања података, као и примену корекционих фактора у циљу побољшања тачности мерења.

На тај начин, развијени систем представља синтезу савремених технолошких приступа и практичне реализације, при чему се дистрибуирани мониторинг, *IoT* архитектура и *cloud* инфраструктура интегришу у јединствен функционални модел. Овакав приступ омогућава прелазак са класичног, пасивног мониторинга на проактивни систем управљања квалитетом ваздуха.

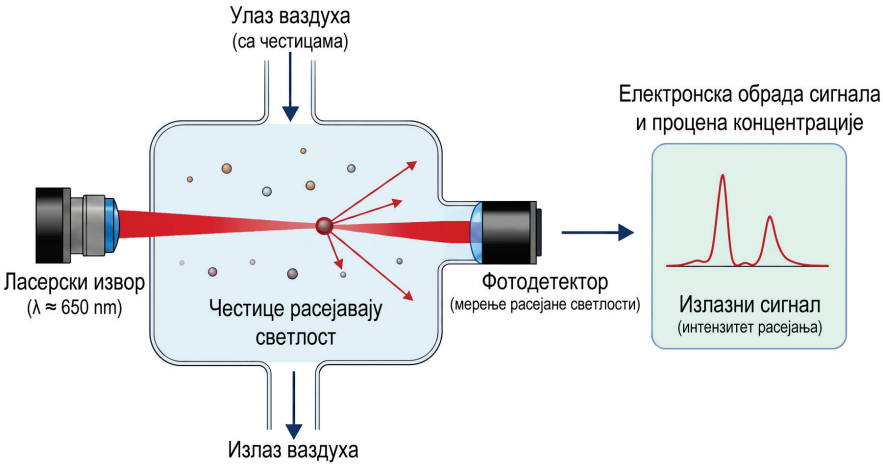
3.2. *Low-cost* сензори: избор, перформансе и ограничења

Развој система проактивног мониторинга квалитета ваздуха у великој мери зависи од правилног избора сензорских технологија које могу да обезбеде оптималан однос између трошкова, техничких перформанси, поузданости и практичне применљивости. У том контексту, *low-cost* сензори представљају кључну компоненту савремених дистрибуираних система мониторинга, јер омогућавају значајно повећање просторне

густине мерења и временске резолуције података уз вишеструко ниже трошкове у односу на традиционалне референтне системе [6], [8]. Њихова примена омогућава развој технички и економски одрживих платформи погодних за широку имплементацију у објектима јавне намене.

Low-cost сензори за мониторинг квалитета ваздуха обухватају различите технолошке платформе, укључујући оптичке сензоре за суспендоване честице, електрохемијске сензоре за гасовите полутанте, метал-оксидне полупроводничке сензоре, инфрацрвене сензоре за угљен-диоксид, као и сензоре за температуру и релативну влажност ваздуха [8]. У оквиру система усмерених на мониторинг суспендованих честица, посебан значај имају оптички сензори засновани на принципу расејања светлости, који омогућавају континуирано одређивање концентрација фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$.

Ови сензори функционишу тако што узорак ваздуха пролази кроз мерну комору осветљену ласерским снопом, при чему честице расејавају упадну светлост, док се интензитет расејане светлости региструје фотодетектором и користи за процену концентрације честица, као што је приказано на слици 3.5. Мерење се најчешће заснива на апроксимацијама Миове теорије расејања, што подразумева да резултат зависи не само од концентрације, већ и од величине, облика и оптичких својстава честица [9].



Слика 3.5. *Принцип рада оптичког сензора за детекцију суспендованих честица*

Захваљујући својој приступачности, компактним димензијама, релативно ниској потрошњи енергије и могућности интеграције са микроконтролерским платформама, сензори као што су *SDS011*, *PMS5003* и *PMS7003* постали су доминантна технолошка основа великог броја савремених система за мониторинг квалитета ваздуха [10]–[12].

Упоредни приказ карактеристика ових сензора дат је у табели 3.1. Њихова примена омогућава развој густих сензорских мрежа, мониторинг микроокружења и континуирано праћење динамике концентрација.

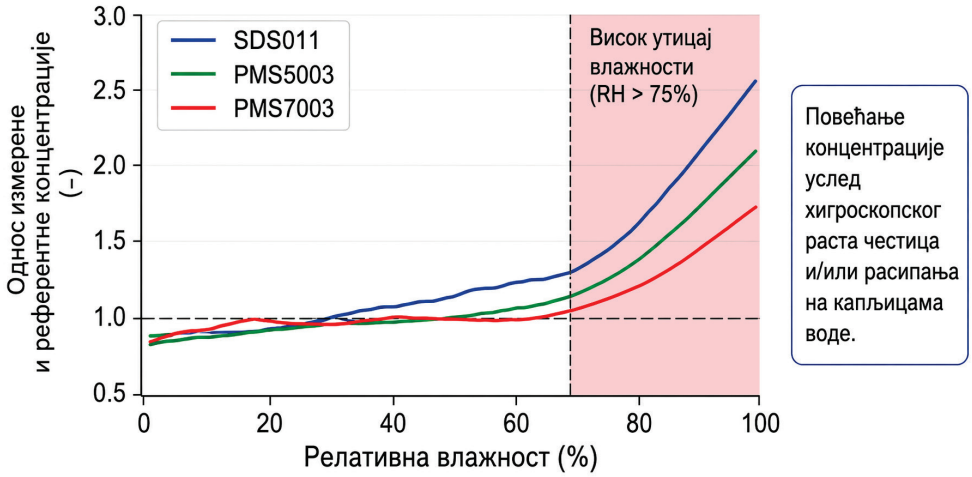
Табела 3.1. *Упоредни приказ карактеристика одабраних low-cost PM сензора [13]–[15]*

Сензор	Принцип рада	Опсег мерења (μg/m³)	Предности	Ограничења
SDS011 (Nova) [13]	Оптичко расејање светлости (ласерски извор)	***PM2.5***: 0–500 ***PM10***: 0–1000	• Ниска цена • Два канала (***PM2.5*** и ***PM10***) • Компактне димензије • Ниска потрошња енергије	• Утицај ***RH*** и температуре • Ограничена тачност за ***PM10*** • Међусензорска варијабилност
PMS5003 (Plantower) [14]	Оптичко расејање светлости (ласерски извор)	***PM2.5***: 0–500 ***PM10***: 0–500	• Висока резолуција • Брз одзив (1 s) • Дигитални излаз (***UART***) • Добра корелација са референтним методама	• Утицај ***RH*** • Потребна калибрација • Сензорски ***drift*** током времена
PMS7003 (Plantower) [15]	Оптичко расејање светлости (ласерски извор)	***PM2.5***: 0–500 ***PM10***: 0–500	• Побољшана стабилност • Дугорочнија поузданост • Нижа међусензорска варијабилност у односу на ***PMS5003***	• Утицај ***RH*** и састава аеросола • Већа цена у односу на ***SDS011***

Истраживања показују да ови сензори могу да остваре релативно висок степен корелације резултата мерења са референтним инструментима, посебно за $PM_{2.5}$ фракцију, док је за PM_{10} често уочена већа варијабилност и мања тачност услед ограничења оптичког принципа мерења [10], [11], [16]. Такође, уочено је да састав аеросола има директан утицај на тачност мерења, при чему органске и фине честице дају бољу корелацију у односу на грубље и неорганске честице.

Приликом избора одговарајућег сензора неопходно је разматрати више критеријума, укључујући опсег мерења, осетљивост, стабилност, енергетску ефикасност, међусензорску варијабилност и компатибилност са остатком система. Ова вишекритеријумска анализа представља основу за развој поузданог и методолошки оправданог мониторинг система.

Предности *low-cost* сензора огледају се у њиховој економској доступности, једноставној имплементацији, могућности *real-time* мониторинга и погодности за формирање густих мрежа мерења [5], [12]. Ове карактеристике омогућавају њихову примену у различитим типовима унутрашњих простора, где класични мониторинг системи нису практично применљиви.



Слика 3.6. *Утицај релативне влажности на одзив low-cost PM сензора*

Међутим, њихова примена праћена је значајним ограничењима. Перформансе сензора су под снажним утицајем релативне влажности, температуре и присуства аеросола са израженим хигроскопним својствима, што може да доведе до интензивнијег расејања светлости и последичног значајног прецењивања концентрација [10], [11], [16]–[18], као што је приказано на слици 3.6.

Додатно, варијације између појединачних сензора, дугорочни *drift* и потреба за редовном калибрацијом представљају кључне изазове у њиховој примени [10], [17].

Савремена истраживања показују да значајно побољшање тачности може да се постигне применом напредних калибрационих модела, укључујући мултиваријантну регресију, машинско учење и адаптивне алгоритме корекције [10], [19]. У том смислу, практична вредност *low-cost* сензора не произилази искључиво из апсолутне тачности, већ из њихове способности да обезбеде довољно поуздане податке за анализу просторних образаца, трендова и релативних промена концентрација.

У развоју система проактивног мониторинга суспендованих честица избор *low-cost* сензора представља стратешку методолошку одлуку, која подразумева баланс између техничких могућности, економских ограничења и захтева за поузданошћу података. На основу анализе литературе и практичних искустава, може да се закључи да *low-cost* сензори представљају адекватну основу за развој дистрибуираних система мониторинга, под условом да су интегрисани у оквиру пажљиво пројектованог система калибрације, валидације и обраде података.

Овакав приступ представља основу за даљи развој система *PM-MoN*, који је детаљно размотрен у наставку поглавља.

3.3. Калибрација и валидација сензорског система

Калибрација и валидација *low-cost PM* сензора представљају кључне кораке у обезбеђивању поузданости података добијених применом система мониторинга квалитета ваздуха. Иако *low-cost PM* сензори омогућавају високу просторну и временску резолуцију мерења, необрађени резултати мерења не могу аутоматски да се сматрају еквивалентним резултатима добијеним референтним или еквивалентним мерним методама [8], [10]. Разлог за то је чињеница да оптички сензори за мерење суспендованих честица не одређују масу директно, већ региструју оптички сигнал који зависи од величине, облика, хемијског састава и оптичких својстава аеросола [9], [10]. Због тога се калибрација не посматра као додатни технички корак, већ као суштински методолошки поступак којим се успоставља веза између одзива сензора и стварних концентрација суспендованих честица.

У савременој литератури калибрација се дефинише као поступак одређивања математичке зависности између вредности које региструје сензор и вредности добијених референтним системом, док валидација представља независну проверу применљивости добијеног модела [10], [18]. Ова разлика је од суштинског значаја, јер добро слагање у калибрационом периоду не гарантује поуздан рад у различитим условима.

Основни облик калибрационог модела може да се представи линеарном зависношћу [10]:

$$C_{kal} = a \cdot C_{senzor} + b \tag{3.1}$$

где су:

C_{kal} – калибрисана концентрација;

C_{senzor} – сигнал сензора;

a – коефицијент осетљивости;

b – помак (*offset*).

У условима када на одзив сензора значајно утичу параметри околине, примењује се проширени модел [10], [11]:

$$C_{kal} = a \cdot C_{senzor} + b \cdot RH + c \cdot T + d \tag{3.2}$$

где су:

RH – релативна влажност;

T – температура ваздуха.

Овакви модели омогућавају корекцију утицаја хигроскопског раста честица и промене оптичких својстава аеросола [10], [18].

Посебан значај за испитивање *PM* сензора у затвореним просторима има стандард *ASTM D8405-21* [20], којим је дефинисан поступак контролисаног тестирања у коморама, уз варијацију концентрације честица, температуре и релативне влажности ваздуха. Овакав приступ омогућава систематску процену перформанси сензора у условима који симулирају реалне унутрашње просторе, као што је приказано на слици 3.7.

Лабораторијска калибрација (енгл. *laboratory calibration*) представља први ниво процене и спроводи се у контролисаним условима, где утицај појединачних параметара може да се изолује. Она омогућава анализу линеарности, лимита детекције, поновљивости и међусензорске варијабилности [16], [18]. Истраживања показују да *low-cost* сензори често остварују висок степен линеарности у контролисаним условима, али да њихове перформансе могу да зависе од типа коришћеног аеросола [10], [18].

Ипак, лабораторијска калибрација има ограничења, јер реални аеросоли представљају сложене и временски променљиве смеше. Због тога лабораторијски модели не могу директно да се пренесу у теренске услове.

Теренска калибрација (енгл. *field calibration*) заснива се на колокацији сензора са референтним инструментом у реалним условима рада. Овај приступ омогућава формирање калибрационих модела који укључују стварну варијабилност аеросола и микроклиматских услова [18].

Једноставни корекциони фактори могу да буду практични, али често нису довољни у условима променљивих концентрација и параметара околине. Због тога се најчешће користе различити регресиони модели, као што су једноставни линеарни, вишеструки линеарни и полиномски модели [10], [21], [22]. У новијим истраживањима примењују се и методе машинског учења, којима се унапређују тачност и поузданост low-cost сензорских система у теренским условима [19], [23], [24], као и квантилно мапирање, којим се омогућава усклађивање статистичке дистрибуције сензорских и референтних података [25].

Калибрација мрежа сензора представља посебан изазов, при чему се често примењује *node-to-node* приступ, који омогућава ефикасну рекалибрацију већег броја уређаја.

За процену перформанси сензора користе се статистичке метрике као што су коефицијент детерминације, средња апсолутна грешка и средња квадратна грешка [10].

Коефицијент детерминације (R^2) представља статистичку меру која показује колики део укупне варијабилности зависне променљиве може да се објасни примењеним моделом и израчунава се као:

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(y_i - \hat{y}_i)^2}{\Sigma(y_i - \bar{y})^2} \tag{3.3}$$

где је y_i стварна вредност, $\hat{y}_i$ вредност предвиђена моделом, а $\bar{y}$ средња вредност посматраних података; бројилац представља суму квадрата грешака модела, док именилац представља укупну варијабилност података, па вредности R^2 блиске јединици указују на добру објашњавајућу способност модела, док вредности блиске нули указују на његову слабу применљивост.

Средња апсолутна грешка (*MAE*) и корен средње квадратне грешке (*RMSE*) представљају основне статистичке показатеље тачности модела и мерења, при чему се *MAE* дефинише као:

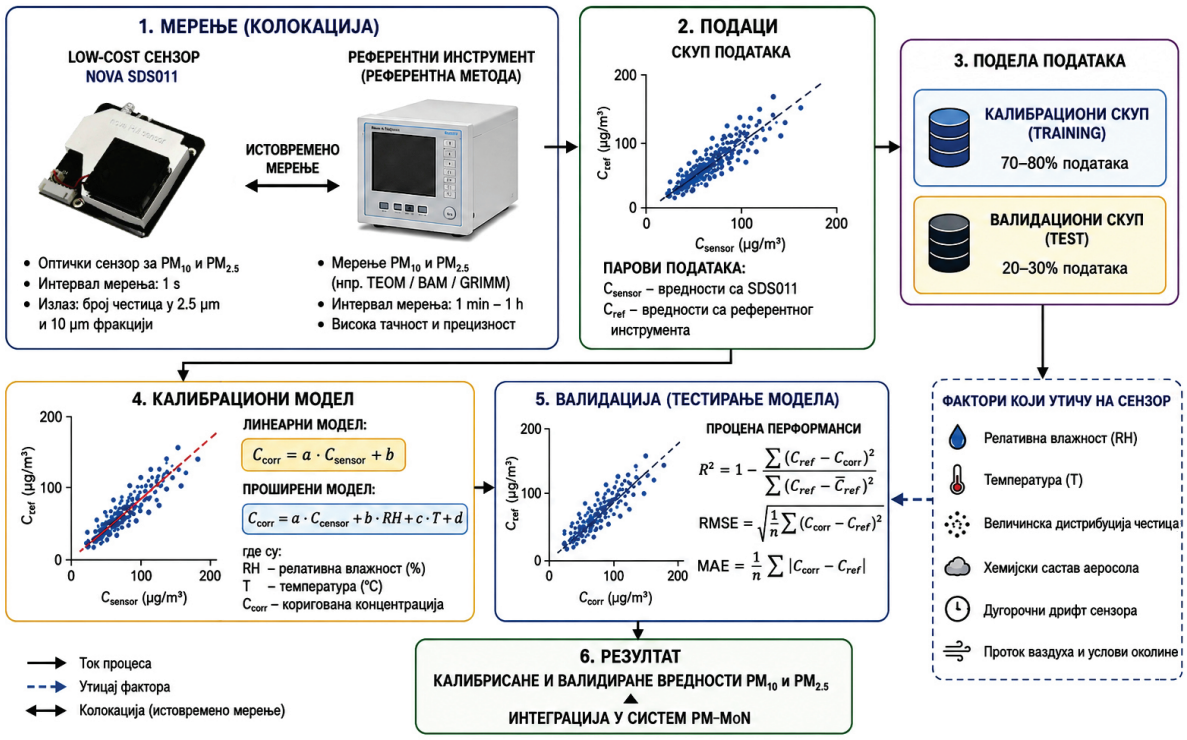
$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum |C_{senzor} - C_{ref}| \tag{3.4}$$

а *RMSE* као:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum (C_{senzor} - C_{ref})^2} \tag{3.5}$$

где је n број посматрања, C_{senzor} измерена вредност добијена сензором, а C_{ref} референтна вредност.

MAE представља просечну апсолутну разлику између измерених и референтних вредности и даје директну меру одступања без наглашавања великих грешака, док *RMSE* додатно наглашава већа одступања јер се грешке квадрирају, па је осетљивији на екстремне вредности и често се користи као строжи критеријум процене тачности модела.



Слика 3.7. *Приказ поступка калибрације и валидације PM сензора*

Након дефинисања калибрационих модела и статистичких параметара, неопходно је да се изврши независна процена њихове применљивости, односно валидација.

Валидација подразумева тестирање модела на независном скупу података, који није коришћен у процесу калибрације, чиме се обезбеђује реална процена перформанси [10].

У пракси се примењују различити приступи, укључујући временску поделу података, крос-валидацију и тестирање у различитим условима мерења. Ови приступи омогућавају процену робусности модела и његове способности да задржи перформансе у условима различитим од оних у којима је калибрисан [10].

Висока вредност коефицијента детерминације указује на добро праћење варијабилности, али не даје потпуну слику о величини одступања између сензорских и референтних вредности. Због тога је неопходно да се истовремено анализирају *RMSE*, *MAE* и систематско одступање.

Додатни аспект валидације односи се на преносивост модела. Калибрациони модел формиран у једном окружењу не мора да буде применљив у другом, услед разлика у саставу аеросола и микроклиматским условима [10], [18].

Дугорочна стабилност сензора представља још један критичан фактор, јер током времена може доћи до *drift*-а услед старења компоненти и контаминације мерне коморе

[10], [18]. Због тога је неопходно да се спроводи периодична рекалибрација и контрола квалитета података.

У оквиру овог истраживања, калибрација и валидација сензора *Nova SDS011*, интегрисаног у систем *PM-MoN*, реализоване су комбинацијом теренске колокације, регресионих модела и корекције утицаја релативне влажности и температуре. Овај приступ омогућава добијање података потребног квалитета за примену у систему проактивног мониторинга, укључујући израчунавање индекса квалитета ваздуха и детекцију епизода повишених концентрација *PM* [16].

На основу анализе доступних метода може да се закључи да не постоји универзални калибрациони модел, већ да избор приступа калибрацији мора да буде прилагођен условима мерења и циљевима мониторинга. Комбинација теренске калибрације, регресионих модела и континуиране валидације представља оптималан приступ за примену у системима као што је *PM-MoN*.

3.4. Развој и имплементација система *PM-MoN*

Развој система проактивног мониторинга суспендованих честица захтевао је успостављање интегрисаног методолошког приступа којим се техничке, аналитичке и оперативне компоненте обједињују у јединствену функционалну целину. У том контексту, систем *PM-MoN* развијен је као аутентична платформа намењена континуираном мониторингу квалитета ваздуха, процени изложености и подршци корективном управљању квалитетом унутрашњег и спољашњег ваздуха у реалним условима примене. Иако су поједине развојне фазе и публикације користиле различите техничке ознаке система, у оквиру ове дисертације користи се јединствен назив *PM-MoN*, као обједињени концепт развоја система.

За разлику од традиционалних система мониторинга, који се доминантно ослањају на ограничен број скупих референтних мерних станица, развој *PM-MoN* система био је усмерен ка стварању дистрибуиране, економичне и методолошки валидиране платформе која омогућава повећану просторну резолуцију, континуирано праћење и интеграцију података. Овакав приступ је у складу са савременим трендовима у развоју *low-cost* мониторинг система и *IoT* архитектура описаним у претходним поглављима [4]–[7].

Основни концепт развоја система заснивао се на потреби да се обезбеди поуздано мерење концентрација суспендованих честица, микроклиматских параметара и других

релевантних показатеља квалитета ваздуха уз минимизовање трошкова, флексибилност имплементације и могућност интеграције са савременим информационо-комуникационим технологијама. *PM-MoN* није пројектован само као уређај за мерење, већ као вишекомпонентни систем способан за аквизицију, обраду, валидацију, складиштење, визуализацију и интерпретацију података, што представља директну примену методолошког оквира дефинисаног у поглављима 3.2 и 3.3.

Развој система обухватио је избор одговарајућих *low-cost* сензора, пројектовање хардверске инфраструктуре, интеграцију микроконтролерских и комуникационих модула, развој софтверских алгоритама за обраду и корекцију података, као и имплементацију корисничких интерфејса за локални и даљински приступ резултатима мерења. Посебан акценат стављен је на модуларност система, чиме је омогућена његова прилагодљивост различитим сценаријима примене, укључујући мониторинг у образовним установама, канцеларијским просторима, другим објектима јавне намене, урбаним микроокружењима, као и персонални мониторинг.

Једна од кључних развојних карактеристика *IoT* система заснованог на *PM-MoN* мрежним чворовима јесте његова вишеслојна архитектура, која интегрише сензорски подсистем, систем аквизиције података, локално и даљинско складиштење, комуникационе модуле, *cloud* инфраструктуру и корисничке апликације, као што је приказано на слици 3.8.



Слика 3.8. *Концептуални модел развоја система проактивног мониторинга суспендованих честица*

Оваква архитектура представља проширење *IoT* концепта описаног у поглављу 3.1, при чему се локално функционисање уређаја комбинује са централизованом обрадом и анализом података.

Током развоја посебна пажња посвећена је оптимизацији техничких перформанси система кроз унапређење стабилности рада, енергетске ефикасности, поузданости комуникације и дугорочне одрживости. Будући да практична имплементација система у реалним условима захтева континуиран рад и оперативну поузданост, избор компоненти, заштита система и оптимизација софтверске логике представљали су кључне сегменте пројектовања.

Поред техничке компоненте, развој *PM-MoN* система обухватио је и значајне методолошке аспекте, укључујући лабораторијску и теренску валидацију, развој калибрационих модела, корекционе алгоритме, стандардизацију процедура и интеграцију са *IAQI* концептом. Овим приступом систем добија карактер научно заснованог мониторинга, чиме се превазилази ниво класичног техничког решења и успоставља веза са методологијом описаном у поглављу 3.3.

Итеративни развојни процес, заснован на резултатима експерименталних испитивања, валидационих студија и практичне примене, омогућио је континуирано унапређење система и његову еволуцију ка методолошки робусној платформи за мониторинг квалитета ваздуха. Кроз овакав приступ систем је постепено оптимизован у погледу техничких перформанси, тачности, функционалности и практичне променљивости.

Посебан значај развоја *PM-MoN* система огледа се у чињеници да представља оригиналан истраживачко-развојни допринос који интегрише савремене *low-cost* сензорске технологије, *IoT* приступ, валидационе процедуре, *cloud* инфраструктуру и практичну имплементацију у јединствен систем. Тиме *PM-MoN* превазилази оквир појединачног уређаја и постаје методолошка основа развоја система проактивног мониторинга суспендованих честица.

На основу развијене методологије, *PM-MoN* систем представља централну техничку и научну платформу предметне докторске дисертације, кроз коју се демонстрира могућност развоја валидираног, економичног и практично одрживог система мониторинга квалитета ваздуха у објектима јавне намене. Управо овај развојни оквир представља један од кључних научних и практичних доприноса истраживања.

3.4.1. ***Хардверска компонента система***

Хардверска компонента система *PM-MoN* (енгл. ***P****articulate* ***M****atter* ***Mo****nitoring Network* ***N****ode*) представља кључни елемент реализације проактивног мониторинга квалитета ваздуха, јер обезбеђује аквизицију примарних података о концентрацијама суспендованих честица и пратећим микроклиматским параметрима. Развој хардверске архитектуре заснивао се на принципима модуларности, поузданости, енергетске ефикасности и економичности, што је у складу са концептом *low-cost* мониторинг система дефинисаним у претходним поглављима.

Развијени уређај представља еволуцију иницијалног прототипа, који је даље унапређен и интегрисан у оквиру *PM-MoN* платформе, чиме је обезбеђена функционална и техничка оптимизација система у складу са захтевима реалне примене.

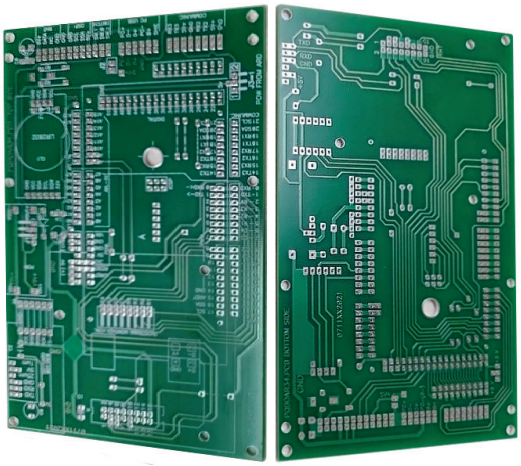
Основна варијанта уређаја *PM-MoN* је смештена у пластичну кутију димензија 200 x 120 x 75 mm. Маса уређаја износи 900 g. Спољашњи изглед уређаја приказан је на слици 3.9.

Основна функционалност уређаја обухвата мерење концентрација суспендованих честица фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$, температуре и релативне влажности ваздуха. Проширена конфигурација уређаја омогућава интеграцију додатних сензора за мерење CO_2, *VOC* и атмосферског притиска, као и *Wi-Fi* и *GPRS/GSM* комуникационе модуле.



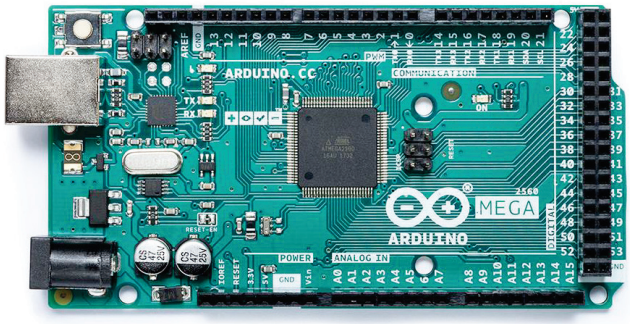
Слика 3.9. *Основна варијанта PM-MoN уређаја*

Већина компоненти уређаја смештена је на двостраној штампаној плочи (*PCB*) формата *EVROPA* (100 x 160 mm). *Layout* ове плоче приказан је на слици 3.10.



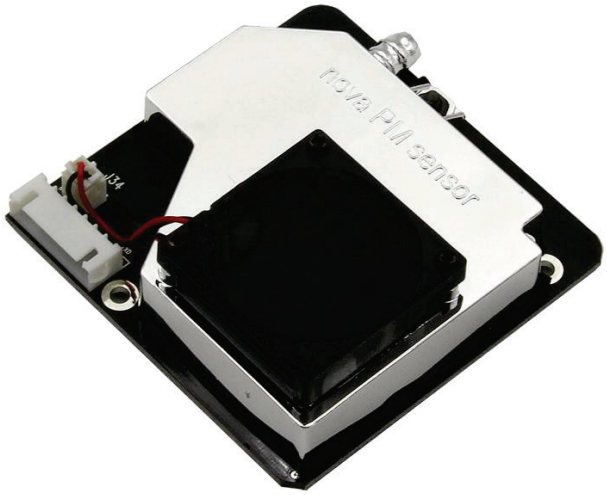
Слика 3.10. *Layout двостране PCB плоче уређаја*

Централни елемент система представља микроконтролерска јединица заснована на *Arduino Mega 2560* платформи, која омогућава повезивање већег броја сензорских и комуникационих модула, као и паралелну обраду података [26]. На микроконтролерској јединици се налази 54 дигиталних улаз/излаз прикључака (од којих 14 могу да се користе као *PWM* излази), 16 аналогних улаза, 4 *UART*-а (хардверска серијска порта), 16 MHz кристални осцилатор, *USB* прикључак, прикључак за напајање, *ICSP* конектор и дугме за ресет. Изглед *Arduino Mega* микроконтролерске платформе приказан је на слици 3.11.



Слика 3.11. *Arduino Mega микроконтролерска платформа [26]*

За мерење концентрација суспендованих честица користи се сензор *Nova SDS011* [13]. Овај сензор користи оптички метод (расејање светлости од честица које пролазе кроз детектор) за одређивање концентрације честица фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$ из опсега од 0 $\mu g/m^3$ до 1000 $\mu g/m^3$. Може да се користи за мерење масених концентрација суспендованих честица чији је пречник у границама од 0,3 μm до 10 μm. Ласерска диода уграђена у овај сензор је високог квалитета, тако да је век трајања извора светлости до 8000 сати. Изглед PM сензорског модула *NOVA SDS011* приказан је на слици 3.12.



Слика 3.12. *PM сензор SDS011 [13]*

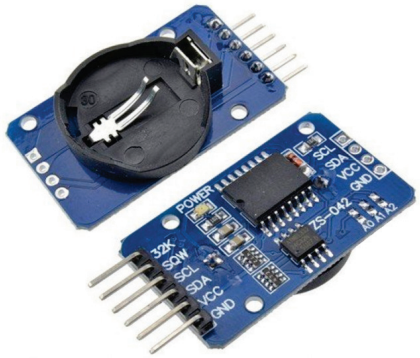
За мерење температуре и релативне влажности ваздуха примењен је *DHT22* сензор, који обезбеђује стабилна мерења и добру поузданост у широком радном опсегу [27]. Карактеристике овог модула су: напон напајања 3,3 V – 6 V DC; опсег мерења температуре од - 40 ºC до 80 ºC (+/- 0,5 ºC); опсег мерења релативне влажности ваздуха од 0 % до 100 % *RH* (+/- 2 %, односно до +/- 5 % у граничним условима мерења). Изглед *DHT22* модула приказан је на слици 3.13.



Слика 3.13. *DHT22 сензор [28]*

У циљу проширења функционалности система, предвиђена је могућност интеграције додатних сензорских модула, као што су *BMP180* за мерење атмосферског притиска [29], *NDIR* CO_2 сензори и *VOC* сензори, чиме се омогућава мултипараметарски мониторинг квалитета ваздуха.

Временска синхронизација рада уређаја обезбеђена је применом *RTC* модула *DS3231*, који обезбеђује високу тачност временских ознака [30]. Техничке карактеристике *RTC* модула су следеће: радни напон 3,3 V – 5,5 V DC; *RTC* чип *DS3231* сат високе тачности; меморијски чип *AT24C32* (32 kbit) уколико се ради о готовом модулу; батерија *Lithium Cell CR2032* од 3 V, која осигурава рад модула и током прекида главног напајања. Изглед *RTC* модула приказан је на слици 3.14.



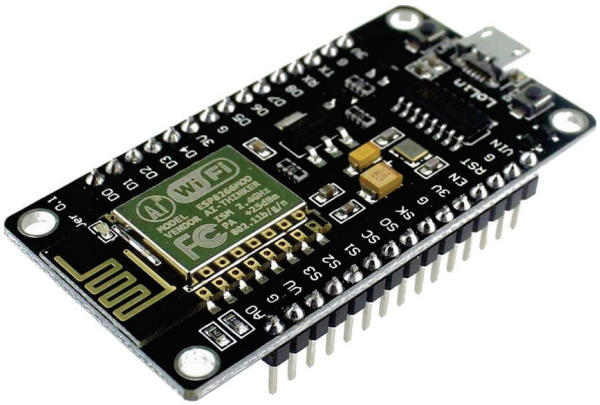
Слика 3.14. *RTC модул DS3231 [31]*

Комуникациона инфраструктура система реализована је коришћењем *Wi-Fi* модула *NodeMCU ESP8266*, који омогућује повезивање уређаја са *IoT* платформама и даљински пренос података [32]. Уз помоћ *NodeMCU Wi-Fi* модула *PM-MoN* уређај путем бежичног преноса прослеђује резултате мерења.

NodeMCU ESP8266 Wi-Fi је популарна и широко коришћена развојна плоча заснована на *ESP-12E Wi-Fi* модулу који комбинује елементе једноставног програмирања у *Arduino* развојном окружењу (*C*/*C++*) и *Wi-Fi* комуникације. Баш као и *Arduino*, *NodeMCU ESP8266* поседује *GPIO* пинове, регулатор напона, *ADC*, *Micro-USB* порт (за флешовање и серијски излаз).

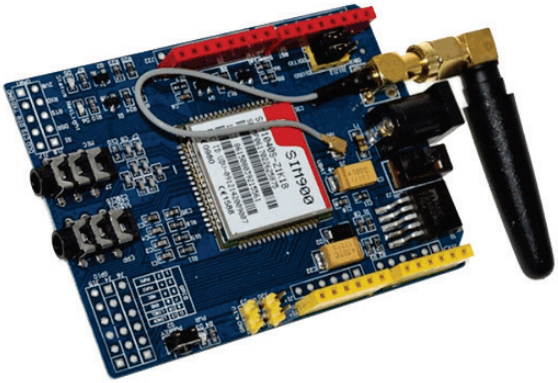
Састоји се од *Tensilica L106* 32-битне микроконтролерске јединице и *Wi-Fi* примопредајника. Пружа могућност за бежичну *Wi-Fi* комуникацију на 2,4 GHz (802.11 b/g/n, подржава *WPA/WPA2*), поседује улазно/излазне портове опште намене (13 *GPIO*), могућност I^2C комуникације, аналогно дигитални конвертор (10-bit *ADC*), серијски периферни интерфејс, *UART*, *PWM* и уграђен програматор и напонски регулатор који обезбеђују флешовање и напајање путем *Micro-USB* конектора.

Када се налази у саставу *PM-MoN* уређаја, *NodeMCU ESP8266* се напаја преко *Micro-USB* конектора (5V DC). За пренос података на *NodeMCU ESP8266* модул са *Arduino Mega* микроконтролера користи се његов серијски порт 3: *Tx* (пин 14) *AMega - Rx* (пин D6) *NodeMCU*; *Rx* (пин 15) AMega - *Tx* (пин D5) *NodeMCU*; *Gnd AMega - Gnd NodeMCU*. Изглед *NodeMCU ESP8266* модула приказан је на слици 3.15.



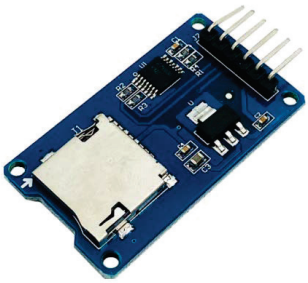
Слика 3.15. *NodeMCU ESP8266 модул [32]*

GPRS/GSM модул *SIM900*, омогућује комуникацију путем мобилних мрежа и *SMS* порука [33]. Модул *SIM900* користи фреквенцијске опсеге од 850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz и 1900 MHz. На захтев корисника путем *SMS* сервиса мобилне телефоније, *PM-MoN* посредством *GPRS/GSM* модула *SIM900* шаље резултате мерења у виду *SMS* поруке. За размену података са *SIM900* модулом на *Arduino Mega* микроконтролеру је искоришћен виртуелни серијски порт на следећим пиновима: *Tx* (пин D62/A8) *AMega - Rx* пин *SIM900*; *Rx* (пин D63/A9) *AMega - Tx* пин *SIM900*; *Gnd AMega - Gnd SIM900*. Изглед *SIM900* модула приказан је на слици 3.16.



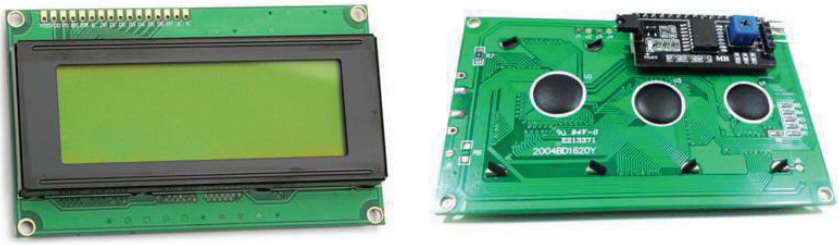
Слика 3.16. *GPRS/GSM модула SIM900 [34]*

Локално складиштење података реализовано је применом *microSD* модула, што омогућава независан рад система и у условима без интернет конекције [35]. Овај модул се напаја једносмерним напоном од 4,5 V до 5,5 V. Подржава *microSD* и *microSDHC* картице, а за комуникацију користи стандардни *SPI* интерфејс. Изглед *microSD* модула приказан је на слици 3.17.



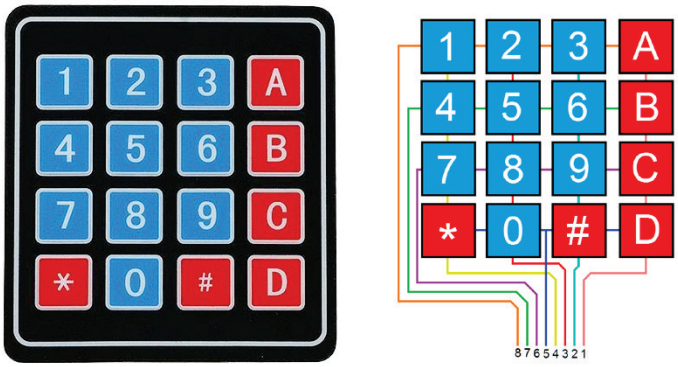
Слика 3.17. *MicroSD модул [35]*

За приказ резултата мерења на самом уређају користи се *LCD2004* модул [36], који омогућује приказ 20x4 карактера (20 карактера у 4 реда) и поседује I^2C интерфејс. Карактеристике овог модула су: напон напајања 5 V DC; димензија штампане плоче 98 mm x 60 mm. Модул поседује потенциометар за подешавање позадинског осветљења. Изглед *LCD2004* модула приказан је на слици 3.18.



Слика 3.18. *Дисплеј модул LCD2004 [36]*

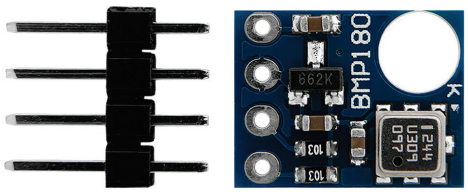
За интеракцију човек-уређај користи се мембранска тастатура са 16 тастера и *flat* интерфејс каблом [37]. Овакве (матричне) тастатуре користе комбинацију четири реда и четири колоне за очитавање стања тастера као што је приказано на слици 3.19.



Слика 3.19. *Мембранска тастатура са 16 тастера (прилагођено према [37])*

BMP180 модул [29] се користи за мерење ваздушног притиска, као један од додатних модула који се уграђује по потреби. Размена података са *Arduino Mega*

микроконтролером се врши преко I^2C магистрале. Карактеристике овог модула су: напон напајања од 1,8 V до 3,6 V DC, потрошња струје 5 μA при фреквенцији очитавања од 1 Hz у стандардном режиму, максимална брзина I^2C магистрале 3,4 MHz, шум мерења до 0,02 hPa у режиму ултра високе резолуције, опсег мерења притиска од 300 hPa до 1100 hPa. Изглед *BMP180* модула приказан је на слици 3.20.



Слика 3.20. *Модул BMP180 [38]*

Сензорски модул *SenseAir S8* [39], је намењен за мерење концентрације CO_2 у ваздуху у опсегу од 400 ppm до 2000 ppm. Овај модул користи *NDIR* принцип рада, и поседује серијски порт (*UART*) за очитавање резултата мерења. Изглед овог сензорског модула приказан је на слици 3.21.



Слика 3.21. *CO_2 модул SenseAir S8 [39]*

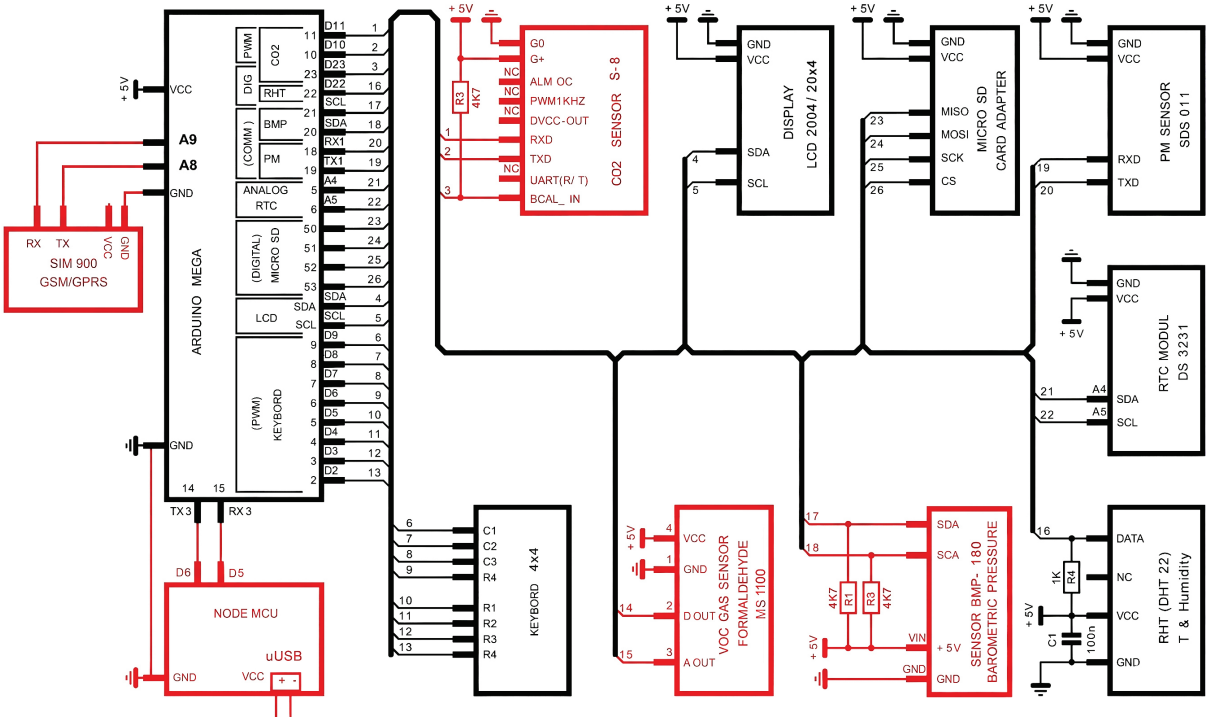
MS1100 сензорски модул [40], намењен је за мерење испарљивих органских материја (*VOC*). Овај сензор може да се користи за одређивање концентрација формалдехида и толуена у ваздуху. У софтверу *PM-MoN* уређаја имплементирана је радна крива за одређивање концентрација формалдехида у ваздуху у опсегу од 0 ppm до 70 ppm. Техничке карактеристике *MS1100* сензорског модула су: напон грејача 5 V DC +/- 2 %, радна струја до 100 mA, осетљивост > 3 %, време одзива < 5 секунди (након грејања сензора у трајању од 3 до 5 минута), потрошња електричне енергије ≤ 430 mW, радна температура сензора -10~60 °C, радни опсег сензора у погледу влажности ваздуха до 90 % *RH* (номинална влажност за рад сензора је 65 % *RH*), опсег излазног аналогног сигнала 0 – 5 V DC. Изглед *MS1100* сензора приказан је на слици 3.22.



Слика 3.22. *VOC сензор MS1100 [40]*

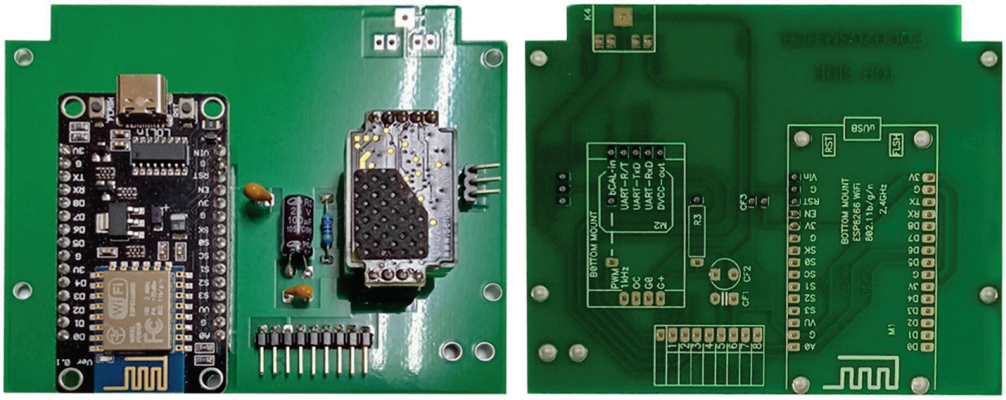
Напајање *PM-MoN* уређаја могуће је било из екстерног извора напајања или из интерне батерије високог капацитета, чиме је обезбеђен аутономан рад уређаја у различитим условима примене. За напајање из електричне мреже *PM-MoN* користи мрежни адаптер (*AC/DC* адаптер 240V/5V, 2 A, 50 Hz). Потребна јачина струје за нормалан рад уређаја износи до 500 mA (ова вредност зависи од броја прикључених сензорских модула). *PM-MoN* садржи интерну литијум-полимер батерију која обезбеђује до 24 часа самосталног рада на терену без додатног извора напајања.

Интеграција свих компоненти *PM-MoN*-а реализована је применом стандардних комуникационих протокола (*UART*, I^2C, *SPI*), што обезбеђује поуздану размену података између сензора, микроконтролера и комуникационих модула. Блок шема *PM-MoN* платформе приказана је на слици 3.23.



Слика 3.23. *Блок шема повезивања модула PM-MoN платформе (пуна конфигурација)*

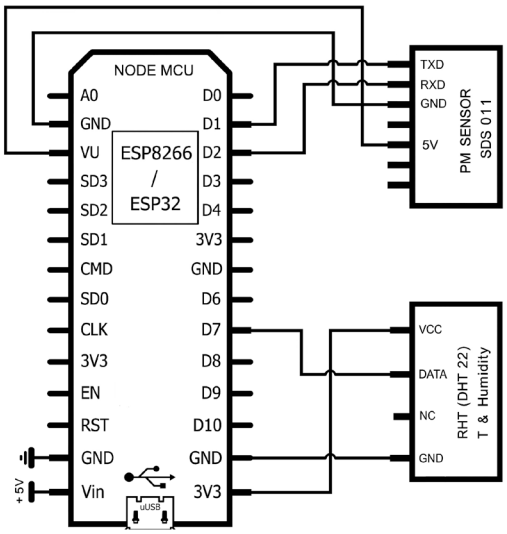
У циљу проширења функционалности *PM-MoN* реализован је сензорски модул за повезивање *NodeMCU ESP8266 Wi-Fi* и *SenseAir S8* модула на *PM-MoN,* приказан на слици 3.24.



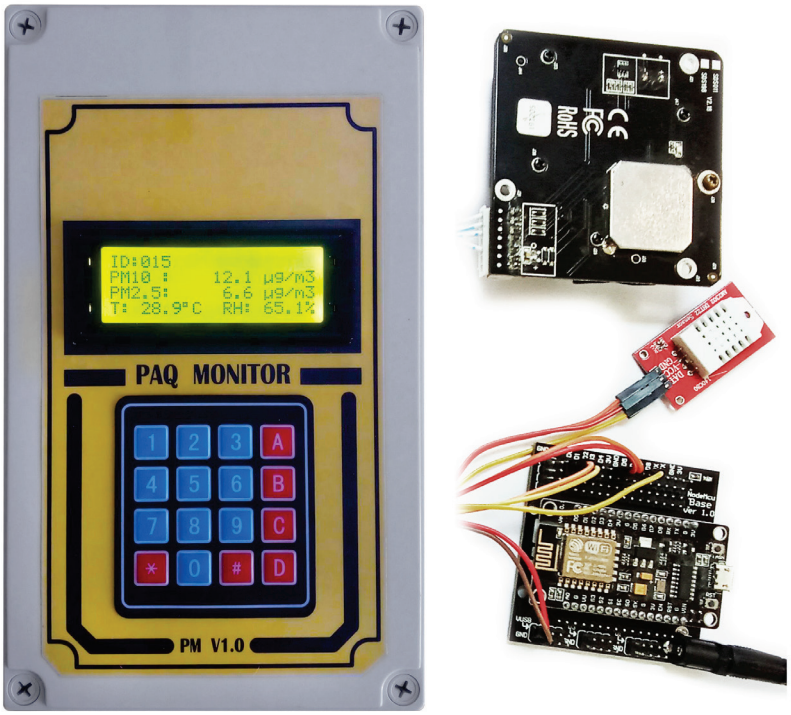
Слика 3.24. *Модул за повезивање MCU ESP8266 Wi-Fi и CO_2 модула SenseAir S8 на PM-MoN*

У циљу тестирања функционалности *PM-MoN* система реализовани су мрежни чворови на бази *NodeMCU ESP8266/ESP32 Wi-Fi, Raspberry Pi Zero Wi-Fi* [41] и *Raspberry Pi 3* [42] микроконтролера и микрорачунара.

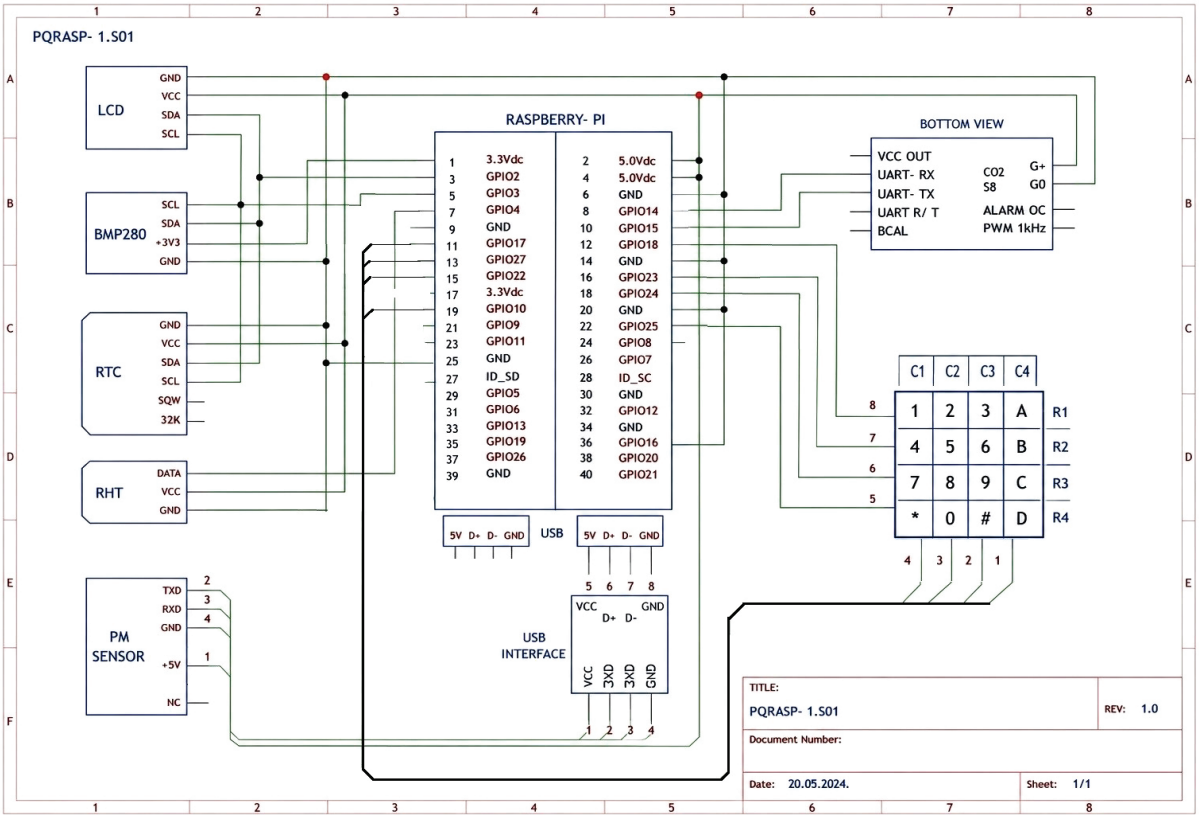
Блок шема *PM-MoN* мрежног чвора на бази *NodeMCU* развојне платформе приказана је на слици 3.25, а реализовани чвор на слици 3.26. Блок шема *PM-MoN* мрежног чвора са *Raspberry Pi 3* микрорачунаром приказана је на слици 3.27, док је сам чвор приказан на слици 3.28.



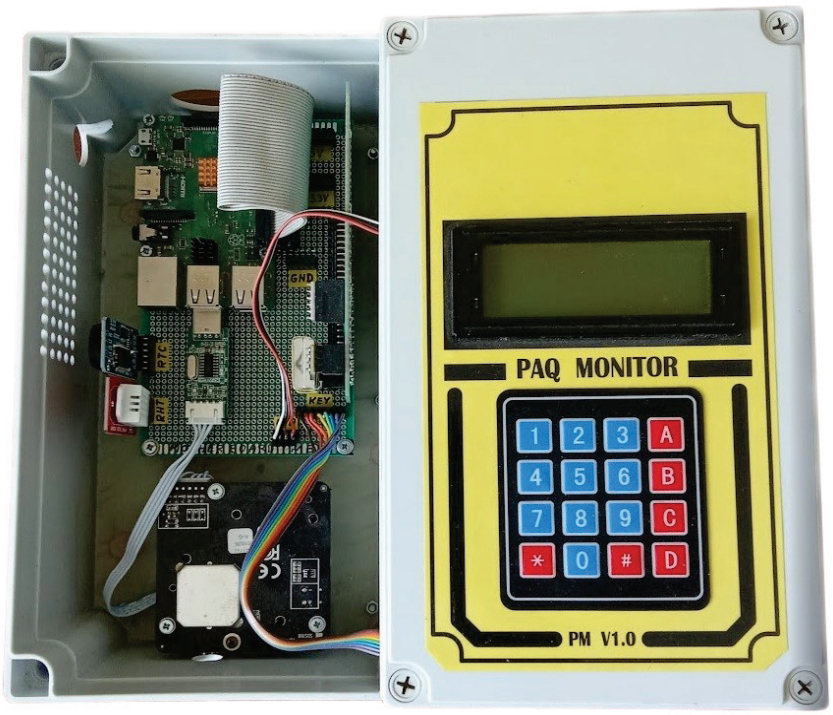
Слика 3.25. *Блок шема повезивања модула PM-MoN чвора на бази NodeMCU платформе*



Слика 3.26. *Реализовани PM-MoN мрежни чвор на бази NodeMCU платформе*



Слика 3.27. *Блок шема повезивања модула PM-MoN чвора на бази Raspberry Pi платформе*



Слика 3.28. *Реализовани PM-MoN мрежни чвор на бази Raspberry Pi платформе*

Развијена хардверска архитектура омогућава реализацију поузданог, флексибилног и скалабилног система за мониторинг квалитета ваздуха. Комбинација сензорских и комуникационих модула обезбеђује не само прикупљање података, већ и њихову интеграцију у системе за анализу и проактивно управљање квалитетом ваздуха, што представља основу функционалности *PM-MoN* платформе.

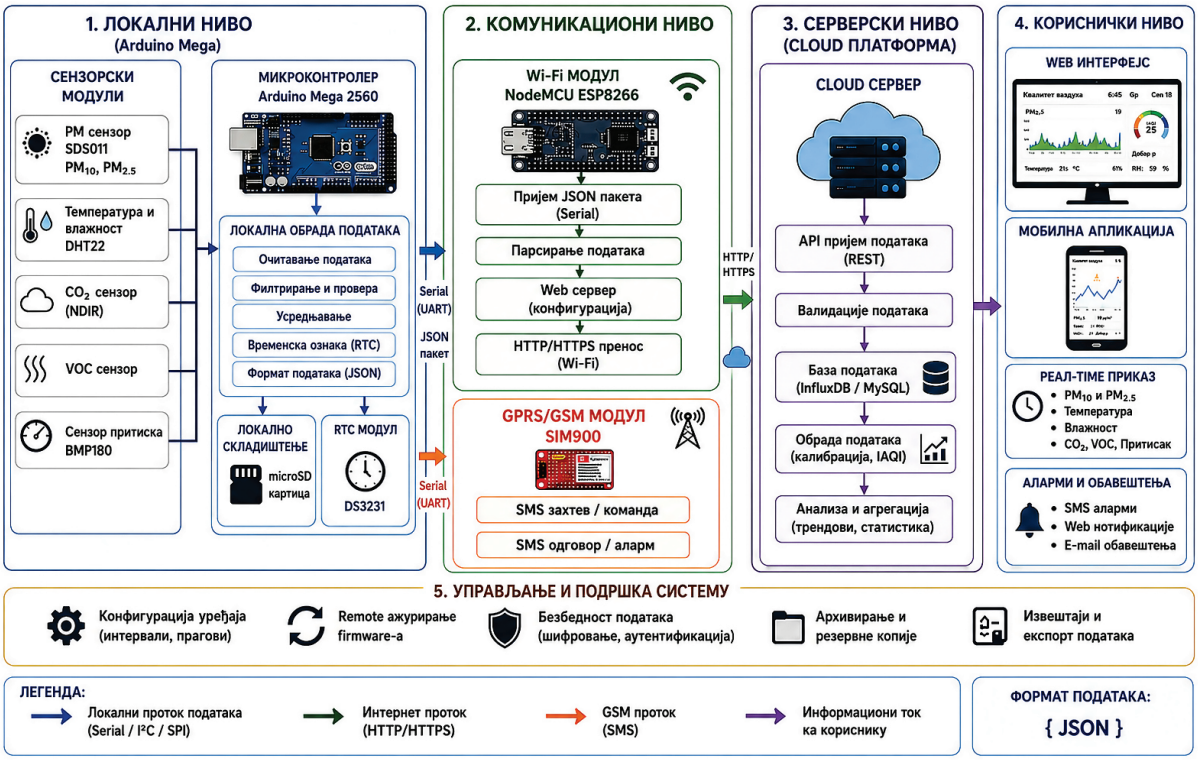
3.4.2. ***Софтверска компонента система***

Софтверска компонента система *PM-MoN* представља кључни сегмент који омогућава функционалну интеграцију хардверских елемената, аквизицију података, њихову обраду, складиштење и даљи пренос ка корисничким и серверским апликацијама. За разлику од класичних мерних система, где је софтвер ограничен на локалну контролу уређаја, *PM-MoN* софтвер је развијен као вишеслојни систем заснован на принципима *IoT* архитектуре.

Архитектура софтверског система *PM-MoN* заснива се на четворослојном моделу који обухвата локални ниво аквизиције и иницијалне обраде података, комуникациони ниво за пренос података, и серверски ниво за складиштење, анализу и визуализацију и кориснички ниво за презентацију резултата, као што је приказано на слици 3.29.

Развијена софтверска компонента омогућава интеграцију свих функционалних елемената система и представља основу за његову даљу надоградњу. Комбинација

локалне обраде, комуникације у реалном времену и *web* визуализације омогућава да *PM-MoN* функционише као потпуно интегрисан систем проактивног мониторинга квалитета ваздуха.



Слика 3.29. *Архитектура софтверског система PM-MoN*

Оваква архитектура омогућава не само прикупљање података, већ и њихову интерпретацију, анализу и примену у доношењу одлука, чиме се систем позиционира као напредна платформа за управљање квалитетом ваздуха.

3.4.2.1. *PM-MoN мрежни чвор заснован на Arduino Mega микроконтролеру*

На *PM-MoN* мрежном чвору заснованом на *Arduino Mega* микроконтролеру програмска логика имплементирана је коришћењем *Arduino IDE* развојног окружења [43]. Програм је структуриран у складу са стандардном организацијом *Arduino* апликација и обухвата три основне целине:

- декларацију променљивих и укључивање библиотека;
- иницијализацију система (*setup* функција);
- главну програмску петљу (*loop* функција).

Декларативни део програма садржи дефиниције глобалних променљивих, иницијализацију комуникационих интерфејса (*SPI*, *UART*, I^2C) и укључивање библиотека за рад са појединачним модулима и објектима (*SD*, *RTC*, *LCD*, *DHT22*, *SDS011*, CO_2, *BMP180*, *JSON* [44]). Оваква организација омогућава модуларност и једноставну надоградњу система.

У оквиру *setup()* функције врши се иницијализација свих компоненти система, укључујући серијске портове, *SD* модул, *RTC* модул, сензоре и кориснички интерфејс. Ова фаза обезбеђује довођење система у стабилно почетно стање и припрему за континуирани рад.

Главна програмска логика реализована је у *loop()* функцији, која се извршава у бесконачној петљи са временом циклуса од приближно 1 секунде. У оквиру ове петље извршавају се следеће операције:

- очитавање података са сензора (*PM*, температура, влажност, CO_2, *VOC*, притисак);
- логичка контрола и филтрирање података;
- усредњавање измерених вредности;
- синхронизација времена;
- приказ података на *LCD* дисплеју;
- упис података у датотеке на *SD* меморијској картици;
- слање података ка комуникационим модулима.

Посебна функционалност система реализована је кроз механизам управљања путем тастатуре, где се притиском на одређене тастере дефинишу параметри рада система, као што су интервали мерења, покретање калибрације или управљање меморијом и преносом података.

Форматирање података за пренос реализовано је коришћењем *JSON* формата, који омогућава структуриран и стандардизован пренос података ка комуникационим и серверским компонентама система.

Комуникациони ниво мрежног чвора заснива се на интеграцији *NodeMCU ESP8266* модула, који омогућава бежични пренос података путем *Wi-Fi* мреже [45]. Програм на овом модулу реализује и асинхрони *web* сервер, који омогућава приказ резултата мерења у реалном времену путем *web* интерфејса.

NodeMCU модул прима податке са *Arduino* микроконтролера путем серијске комуникације, након чега врши њихову обраду и публиковање на *web* страници. Овај процес укључује:

- пријем *JSON* (енгл. *JavaScript Object Notation*) пакета;
- парсирање података;
- ажурирање интерних променљивих;
- генерисање *web* одговора.

Асинхрони приступ омогућава континуирано освежавање података без прекида рада система и без значајног оптерећења микроконтролера.

Поред *Wi-Fi* комуникације, *PM-MoN* чворови подржавају и *GPRS/GSM* комуникацију путем *SIM900* модула, који омогућава размену података путем *SMS* порука. Ова функционалност кориснику обезбеђује приступ актуелним резултатима мерења на захтев, чиме се постиже додатни ниво доступности података.

У оквиру *PM-MoN* система, поред описаног основног мрежног чвора, који се заснива на *Arduino Mega* микроконтролеру, тестирана је примена још две платформе за реализацију мрежних чворова, *NodeMCU ESP8266/ESP32* микроконтролерска платформа и *Raspberry Pi* микрорачунарска платформа.

3.4.2.2. ***NodeMCU ESP8266/ESP32 мрежни чвор***

Софтвер *NodeMCU ESP8266/ESP32* чворова развијен је у *Arduino* развојном окружењу применом програмског језика *C++*, уз коришћење библиотека за рад са *UART, I^2C* и *SPI* комуникационим протоколима.

Програмска логика *NodeMCU* мрежног чвора такође се заснива на цикличном извршавању мерења у дефинисаном временском интервалу. У сваком циклусу иницијализује се комуникација са сензорима, читају подаци са *PM* и микроклиматских сензора, врши се провера валидности података, примењују се основни филтери и корекције, формира се *JSON* пакет и шаљу подаци ка серверу.

NodeMCU чворови користе *Wi-Fi* комуникацију за повезивање са локалном мрежом и сервером. Пренос података реализован је коришћењем *HTTP/HTTPS* протокола, *REST API* механизма и *MQTT* протокола у појединим конфигурацијама.

3.4.2.3. *Raspberry Pi мрежни чвор*

Raspberry Pi мрежни чвор представља напреднију варијанту *PM-MoN* чвора, јер може да обавља више функција, укључујући функцију мрежног чвора, локалног сервера, *web* сервера и централне јединице за управљање.

Захваљујући *Linux* оперативном систему и већим процесорским ресурсима у односу на микроконтролере, *Raspberry Pi* мрежни чвор омогућава имплементацију сложенијих алгоритама обраде података и серверских функција.

Софтвер ових чворова развијен је превасходно у програмском језику *Python*, уз примену библиотека *PySerial, SMBus, Flask, Pandas, NumPy* и *SQLite/MySQL*.

- **Linux окружење и сервиси**

Raspberry Pi користи *Raspberry Pi OS* оперативни систем заснован на *Linux* платформи. Предности овог оперативног система су мултитаскинг архитектура, паралелно извршавање процеса, даљинско управљање преко *SSH*-а и аутоматско покретање сервиса.

Програми за извршавање мерења покрећу се као *systemd* сервиси, што омогућава аутоматско покретање након рестарта, надзор над радом процеса и аутоматски *restart* у случају грешке. *Raspberry Pi* за рад са периферијом користи *GPIO* интерфејс и стандардне серијске комуникационе протоколе. За комуникацију са *PM* сензорима користи се *UART*, док се за *BMP280, LCD2004* и *DS3231* модуле користи I^2C интерфејс.

- **Локална база података**

Једна од предности *Raspberry Pi* платформе јесте могућност локалног складиштења већих количина података. У зависности од конфигурације система коришћене су *SQLite* базе и *MySQL/MariaDB* сервери. Рад са базом података поједностављује архивирање резултата мерења, временску анализу, статистичку обраду, формирање *IAQI* индекса и генерисање извештаја.

- ***Web* сервер и *API* комуникација**

Raspberry Pi чвор може да функционише и као локални *web* сервер. У том случају се користе различити софтверски алати, као што су *Apache* или *Nginx web* сервер, *Flask/PHP web* апликације и *REST API* интерфејси. Корисници приступају *PM-MoN* систему преко *web* претраживача или мобилних апликација. *Web* интерфејс омогућава

приказ тренутних резултата мерења, графички приказ трендова, преглед историјских података, преузимање података и управљање уређајима, што ће детаљније бити описано у поглављу 4. у делу који се односи на визуализацију резултата мерења.

- **Серверска архитектура и *cloud* инфраструктура**

Серверска инфраструктура *PM-MoN* система може да буде реализована локално на *Raspberry Pi* чвору, на персоналном рачунару под *Linux* оперативним системом и у оквиру *cloud* платформе. У мањим инсталацијама *Raspberry Pi* чвор може истовремено да функционише као: мрежни чвор, база података, *web* сервер и *cloud gateway*. Овакав приступ омогућава значајно смањење трошкова и поједностављење инфраструктуре.

- **Принцип комуницирања чворова са сервером и обрада података**

Сервер података на *Raspberry Pi* чвору континуирано прихвата *JSON* пакете са мерних чворова преко *HTTP* или *MQTT* комуникације. Након пријема података врши се валидација формата, провера временских ознака, контрола валидности, складиштење у базу, анализа и агрегација. На тај начин подаци прикупљени са више уређаја могу да се интегришу у јединствен систем, што омогућава анализу просторних и временских образаца загађења.

Једна од најзначајнијих компоненти серверске апликације јесте аналитички модул. Овај модул врши: израчунавање *IAQI* индекса, анализу трендова, детекцију епизода повећаног загађења, анализу прекорачења, статистичку обраду.

- ***Web* апликација и кориснички интерфејс**

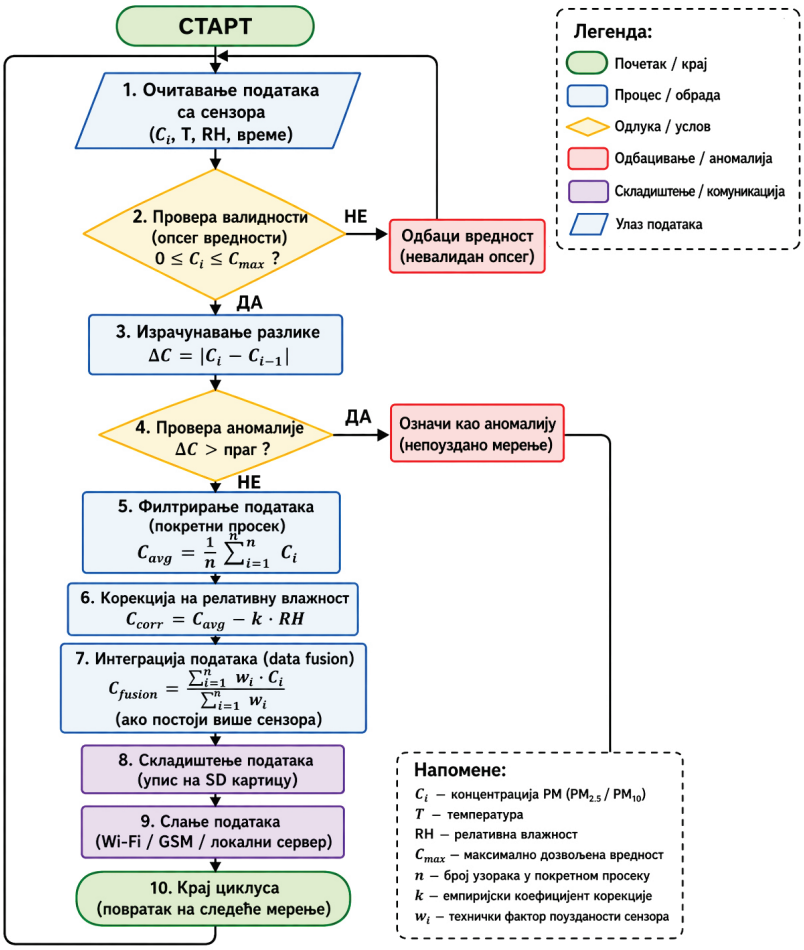
Кориснички интерфејс на *Raspberry Pi* чвору развијен је као *web* апликација доступна путем локалне мреже или интернета. Апликација је реализована применом *HTML, CSS, JavaScript, PHP и MySQL* технологија. Основни циљ *web* апликације је омогућавање једноставног приступа подацима, визуализација резултата мерења и приказ *IAQI* индекса. На основу резултата мерења концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$ аутоматски се израчунава индекс квалитета ваздуха.

Web интерфејс омогућава приказ резултата у реалном времену, укључујући концентрације PM_{10} и $PM_{2.5}$, температуру и релативну влажност, као и историјске прегледе резултата. Оваква визуализација обезбеђује трансформацију података од необрађених резултата мерења до корисних информација о актуелном квалитету ваздуха приказом *IAQI* индекса у реалном времену.

3.5. Прикупљање, обрада и интеграција података

Ефикасност система проактивног мониторинга квалитета ваздуха не зависи искључиво од квалитета сензорских компоненти, већ у великој мери и од способности система да обезбеди поуздано прикупљање, обраду, валидацију и интерпретацију података. У том контексту, систем *PM-MoN* развијен је као информационо-интегрисана платформа у којој аквизиција података представља почетну фазу ширег аналитичког процеса усмереног ка трансформацији необрађених резултата мерења у оперативно корисне информације.

Процес прикупљања података заснива се на континуираној аквизицији мерних вредности из више сензорских модула, укључујући концентрације суспендованих честица, температуру, релативну влажност и друге релевантне параметре квалитета ваздуха. Систем функционише кроз унапред дефинисане временске интервале узорковања, при чему се фреквенција мерења прилагођава циљевима мониторинга, енергетској ефикасности и захтевима даље обраде, као што је приказано на слици 3.30.



Слика 3.30. *Дијаграм тока обраде података у систему PM-MoN*

Необрађени подаци добијени са сензора подложни су различитим изворима несигурности, укључујући шум сигнала, краткотрајне осцилације и утицај параметара околине. Због тога је неопходна вишефазна обрада података која обухвата:

- филтрирање;
- валидацију;
- агрегацију;
- интеграцију података.

- **Филтрирање и валидација података**

Први корак у обради података представља елиминација невалидних мерења. У ту сврху примењују се следећи критеријуми:

- уклањање негативних и физички немогућих вредности;
- ограничење максималних вредности (нпр. > 1000 μg/m^3);
- детекција наглих промена.

Један од приступа заснива се на анализи разлике између узастопних мерења:

$$\Delta C = |C_i - C_{i-1}| \tag{3.6}$$

Уколико је ΔC веће од дефинисаног прага, вредност се означава као аномалија и искључује из даље анализе.

За смањење утицаја шума примењује се покретни просек:

$$\bar{C} = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum C_i \tag{3.7}$$

где је n број узастопних мерења.

Ови поступци су посебно значајни код *low-cost* сензора, код којих је варијабилност сигнала израженија [10], [16], [19].

Валидација података обухвата проверу њихове поузданости и конзистентности. Она се реализује кроз:

- поређење са референтним уређајима;
- анализу временске стабилности;
- анализу корелација.

Један од кључних параметара у процесу валидације података је коефицијент детерминације:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum\left(C_{ref} - C_{senzor}\right)^2}{\sum\left(C_{ref} - \overline{C}_{ref}\right)^2} \tag{3.8}$$

који описује степен слагања са референтним мерењима [16], [19].

При валидацији дужна пажња мора да се посвети и утицају метеоролошких параметара, првенствено релативне влажности ваздуха и температуре, на резултате мерења суспендованих честица. Услед хигроскопског раста суспендованих честица при високим вредностима релативне влажности ваздуха ($RH > 70$ %), долази до систематског прецењивања концентрација *PM* када се за њихово мерење користе *low-cost PM* сензори [10], [11], [16]–[18]. Због тога се примењују адекватни корекциони модели, као на пример:

$$C_{corr} = \frac{C_{meas}}{(1 + k \cdot RH)} \tag{3.9}$$

где је C_{corr} коригована концентрација суспендованих честица, C_{meas} концентрација измерена *low-cost PM* сензором пре корекције, RH релативна влажност ваздуха, а k емпиријски корекциони коефицијент којим се описује утицај релативне влажности на сензорско очитавање.

- **Агрегација и временска анализа података**

Након филтрирања, подаци се агрегирају у различите временске интервале:

- минутни;
- петоминутни;
- сатни;
- дневни просеци.

Овакав приступ омогућава анализу краткотрајних епизода загађења, као и дугорочних трендова.

Просечна вредност за временски интервал T дефинисана је као:

$$C_T = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum C_i \tag{3.10}$$

Агрегација смањује варијабилност и омогућава стабилнију интерпретацију података.

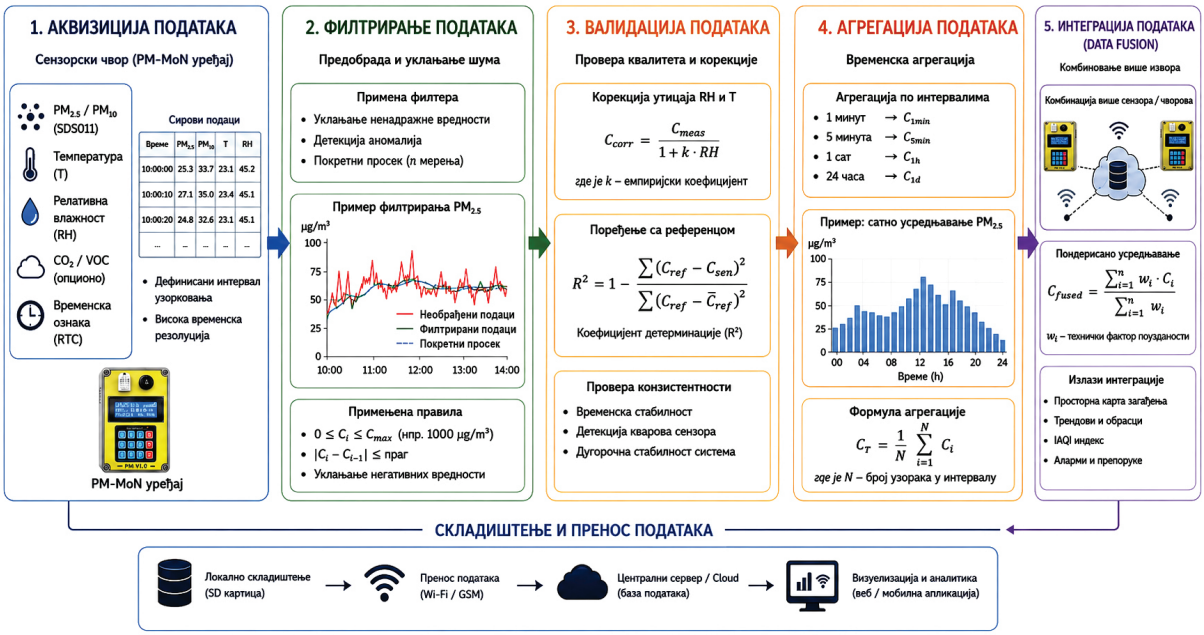
- **Интеграција података (*data fusion*)**

Интеграција података представља напредни ниво обраде, који омогућава комбиновање више извора информација ради добијања поузданије процене квалитета ваздуха. У оквиру *PM-MoN* система, *data fusion* обухвата комбинацију више сензорских чворова, интеграцију микроклиматских параметара и временску и просторну агрегацију. Један од приступа заснива се на пондерисаном усредњавању:

$$C_{fused} = \frac{\sum(w_i \cdot C_i)}{\sum w_i} \tag{3.11}$$

где тежински фактори w_i зависе од поузданости сензора.

Овај приступ омогућава смањење утицаја појединачних грешака, повећање стабилности система и побољшање репрезентативности података. Шематски приказ тока обраде података, од почетне аквизиције до финалне интеграције, детаљно је илустрован на слици 3.31.



Слика 3.31. *Ток обраде података: аквизиција – филтрирање – валидација – агрегација – интеграција*

Поред основних метода, у примени су и напредни приступи корекције резултата мерења као што су:

- регресиони модели;
- методе машинског учења;
- детекција аномалија.

Ови приступи омогућавају идентификацију комплексних образаца и унапређење тачности система [10], [19].

Коначно, обрађени подаци трансформишу се у функционалне индикаторе, укључујући *IAQI* индекс, категорије квалитета ваздуха и систем упозорења. На тај начин, необрађени подаци се трансформишу, добијају практичну вредност и постају основа за доношење одлука и управљање квалитетом ваздуха.

Укупно посматрано, процес прикупљања, обраде и интеграције података представља централни функционални сегмент система *PM-MoN*, који омогућава трансформацију података од необрађених сензорских сигнала у методолошки валидиране, аналитички релевантне и практично применљиве информације.

3.6. Комуникација и пренос података

Комуникација и пренос података представљају кључну функционалну компоненту система *PM-MoN*, јер омогућавају размену информација између сензорских чворова, локалних уређаја за складиштење и централних система за обраду и визуализацију података. У савременим *IoT* системима поузданост и ефикасност комуникације директно утичу на правовременост, континуитет и употребљивост прикупљених података, што је од посебног значаја у контексту проактивног мониторинга квалитета ваздуха.

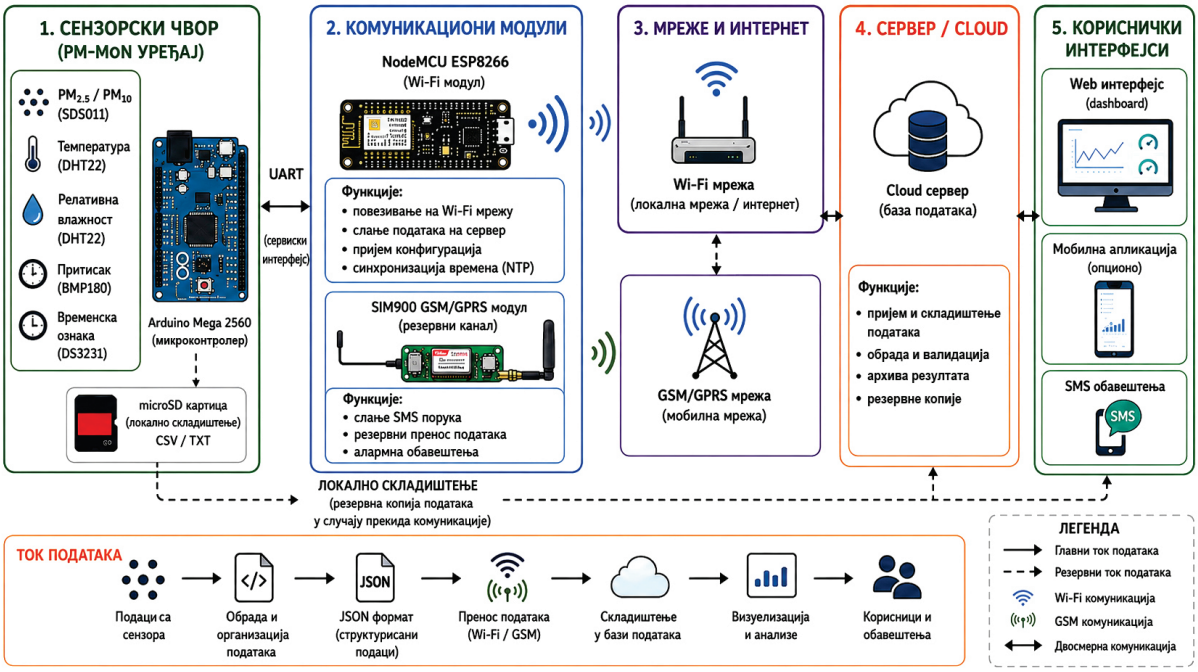
У оквиру *PM-MoN* система примењен је хибридни комуникациони приступ који комбинује *Wi-Fi* и *GPRS/GSM* технологије, чиме се обезбеђује висока флексибилност и робусност система у различитим условима примене. Овакав концепт омогућава континуиран пренос података у условима стабилне мрежне инфраструктуре, али и поуздан рад у ситуацијама када су стандардни комуникациони канали недоступни или нестабилни.

Подаци прикупљени са сензора најпре се обрађују на локалном нивоу, након чега се у структурираном облику прослеђују комуникационом модулу путем серијског интерфејса. За организацију и пренос података користи се *JSON* формат, који омогућава

ефикасну, стандардизовану и интероперабилну размену информација између уређаја и серверских система, што је у складу са савременим *IoT* архитектурама [4], [5].

Структура података који се преносе укључује концентрације суспендованих честица фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$, температуру, релативну влажност ваздуха, временску ознаку и идентификацију уређаја, чиме се обезбеђује комплетан информациони пакет погодан за даљу анализу и интеграцију. Паралелно са преносом података, систем омогућава и локално складиштење на *microSD* картици, што представља важан механизам редундантности и заштите од губитка података у случају прекида комуникације.

Примарни комуникациони канал реализован је коришћењем *Wi-Fi* технологије, која омогућава континуирано слање података ка серверима или *web* апликацијама у реалном времену, као што је приказано на слици 3.32. Овакав приступ је посебно погодан за примену у објектима са развијеном мрежном инфраструктуром, где су обезбеђени стабилан пренос података и њихова непосредна визуализација. Висока брзина преноса и ниско кашњење представљају кључне предности овог комуникационог канала [32], [45].



Слика 3.32. *Архитектура комуникације и преноса података у систему PM-MoN*

Као допуна *Wi-Fi* комуникацији, у чворове мреже интегрисан је и *GSM* модул (*SIM900*), који омогућава размену података путем *SMS* порука [33]. Овај канал комуникације функционише као резервни механизам, омогућавајући рад система у условима када *Wi-Fi* мрежа није доступна. Истовремено, *GSM* комуникација омогућава имплементацију алармних функција, при чему корисницима могу да се шаљу

обавештења о прекорачењу дефинисаних прагова концентрација, што представља важан елемент проактивног мониторинга.

Поузданост система преноса података обезбеђена је комбинацијом више механизама, укључујући локално складиштење података, могућност поновног слања у случају неуспешног преноса и временску синхронизацију података. Ови механизми омогућавају очување континуитета мониторинга и минимизују ризик од губитка информација, што је од посебног значаја у анализи временских серија.

Са аспекта енергетске ефикасности, комуникациони подсистем оптимизован је применом режима периодичног слања података, при чему се пренос врши у дефинисаним временским интервалима. Овакав приступ омогућава смањење потрошње енергије, уз очување адекватне временске резолуције мерења.

Интеграција комуникационог система са *IoT* инфраструктуром омогућава повезивање *PM-MoN* платформе са *cloud* системима, базама података и аналитичким алатима, чиме се обезбеђује централизовано складиштење и напредна анализа података. Овакав приступ представља основу за примену савремених метода, укључујући статистичку анализу и алгоритме машинског учења.

Укупно посматрано, комуникациони подсистем *PM-MoN* платформе омогућава поуздан, флексибилан и енергетски оптимизован пренос података, чиме се обезбеђује континуитет мониторинга и основа за даљу анализу и примену у системима проактивног управљања квалитетом ваздуха.

3.7. Визуализација и кориснички интерфејс

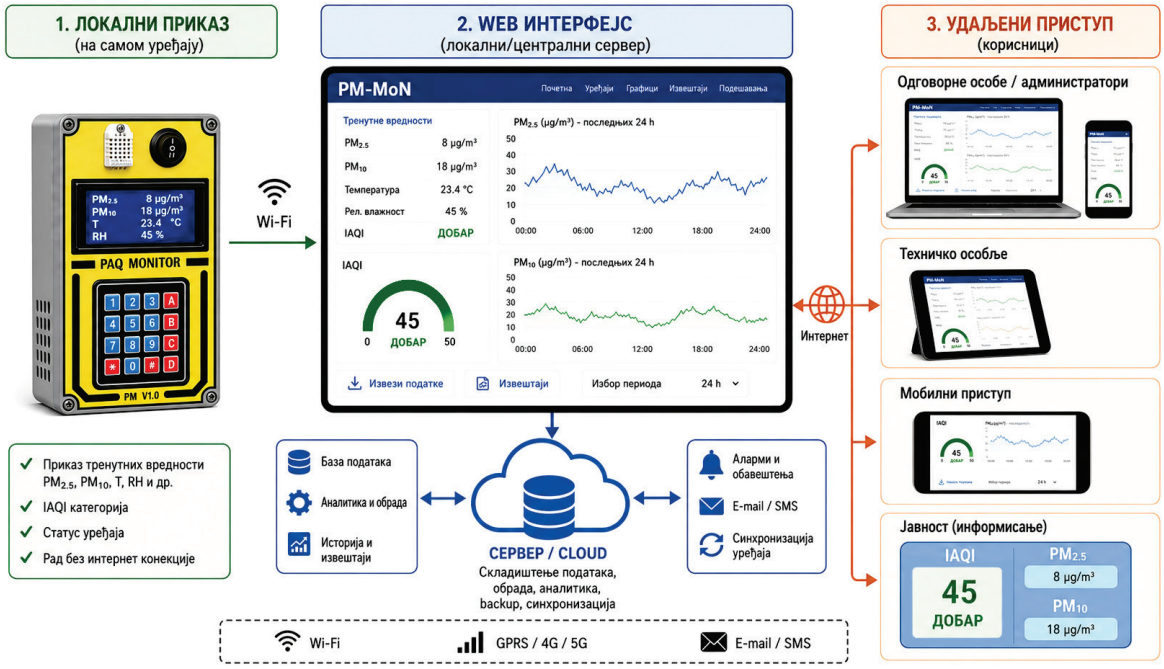
Визуализација података представља завршни, али функционално један од најзначајнијих слојева система проактивног мониторинга квалитета ваздуха. Док сензорски, комуникациони и серверски слој обезбеђују мерење, пренос и складиштење података, кориснички интерфејс омогућава да се добијени резултати претворе у разумљиве, прегледне и оперативно употребљиве информације. У том смислу, визуализација није само технички додатак систему, већ важан елемент интерпретације резултата, процене изложености и подршке доношењу одлука у реалном времену.

У системима заснованим на *low-cost* сензорима, посебан значај има начин на који се кориснику приказују подаци, јер велика временска резолуција мерења може да доведе до формирања обимних скупова података који нису непосредно читљиви без

одговарајуће графичке и аналитичке обраде. Због тога кориснички интерфејс мора да омогући приказ тренутних вредности, временских трендова, средњих вредности за одабране интервале, као и поређење различитих параметара квалитета ваздуха. Овакав приступ омогућава да се необрађени резултати мерења не посматрају изоловано, већ у контексту динамике унутрашњег окружења, промена броја корисника, режима вентилације и утицаја спољашњег загађења.

У оквиру развоја *PM-MoN* система, визуализација података је конципирана као вишеслојна функција. Први ниво представља локални приказ резултата на самом уређају (мрежном чвору), који омогућава непосредан увид у тренутне вредности мерених параметара. Овај ниво је значајан у теренским условима, током краткотрајних мерења, провере рада уређаја и ситуација када није обезбеђена стална интернет конекција. Други ниво чини приказ резултата преко *web* стране или локалног *WWW* сервера, док трећи ниво подразумева могућност повезивања са широм серверском или *cloud* инфраструктуром, где подаци могу да се архивирају, анализирају и приказују кроз напредније графичке форме, као што је приказано на слици 3.33.

Сваки *PM-MoN* чвор помоћу уграђеног *Wi-Fi* модула и *WWW* сервера резултате мерења може да приказује у локалној рачунарској мрежи, а уз додатак *GPRS/GSM* модула, на захтев корисника, резултате мерења шаље у виду *SMS* порука.

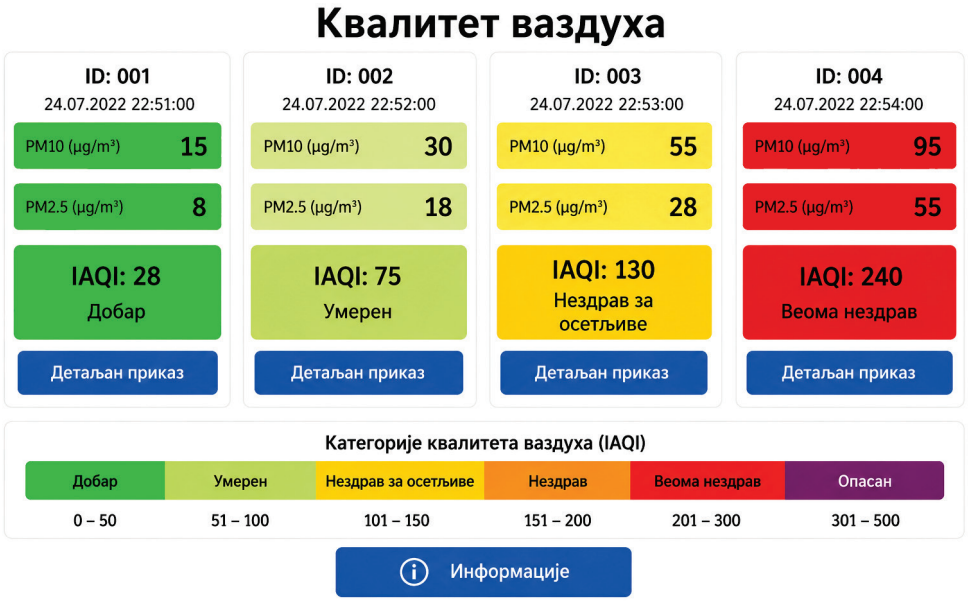


Слика 3.33. *Логички модел визуализације података у PM-MoN систему: локални приказ, web интерфејс и удаљени приступ*

Кориснички интерфејс треба да буде пројектован тако да омогући различите нивое употребе система. За истраживаче и стручна лица важни су детаљни временски низови, могућност преузимања података, избор временског интервала анализе, приказ необрађених и коригованих вредности, као и могућност поређења више параметара. За управљаче објеката и техничко особље важнији су јасни индикатори стања, трендови, алармни прагови и препоруке за реаговање. За крајње кориснике простора најважнији су поједностављени показатељи квалитета ваздуха, као што су категорије *IAQI*, визуелна упозорења и јасна информација да ли је квалитет ваздуха прихватљив, погоршан или захтева корективну меру.

У развијеном систему за праћење квалитета ваздуха, *web* апликација има улогу централног интерфејса за приказ и преузимање резултата мерења. Главна *web* апликација је имплементирана на серверу система и омогућава преузимање и приказ података са свих чворова мониторинг мреже, док основне *web* апликације на самим чворовима омогућавају приказ резултата мерења конкретног чвора.

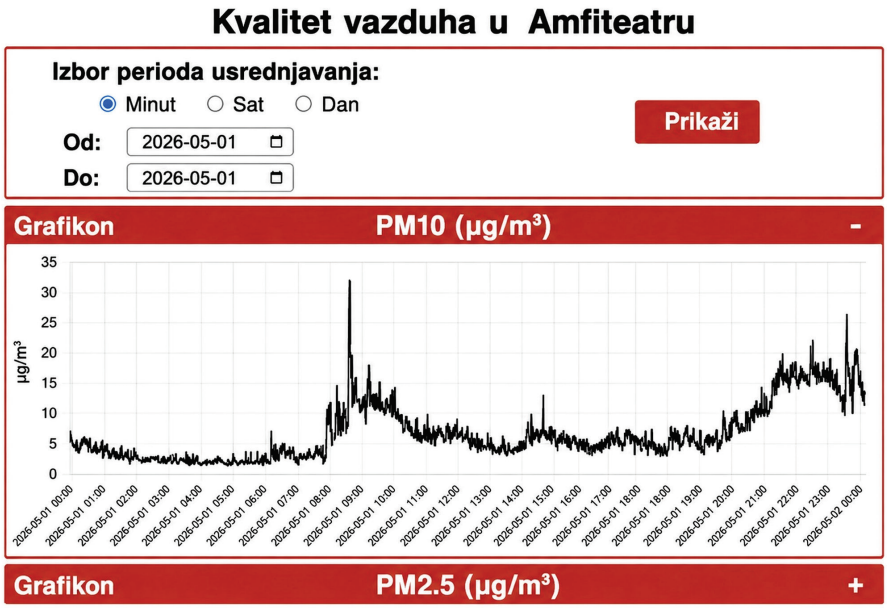
У случају када је сервер података реализован у локалној рачунарској мрежи на *Raspberry Pi* мини рачунару, он се реализује на *LAMP* (енгл. *Linux–Apache–MySQL–PHP*) окружењу, које представља *open-source* интегрисано развојно окружење. Ово окружење такође омогућава развој, имплементацију и одржавање *web* апликација, при чему се уз наведени софтвер користе и други алати као што су *HTML, CSS, JavaScript, Chart.js, jQuery* и *PHP* библиотеке.



Слика 3.34. *Пример структуре web интерфејса за приказ резултата мерења са више сензорских чворова*

Систем мониторинга квалитета ваздуха треба да функционише као мрежно оријентисана платформа у којој резултати мерења са више мерних чворова могу да се прикупљају, приказују, пореде и преузимају, као што је приказано на слици 3.34. Овакав приступ је коришћен и за развој *web* интерфејса *PM-MoN* система. Развијени кориснички интерфејс обезбеђује преглед активних мерних места, приступ тренутним вредностима, приказ историјских података, као и могућност извоза података за даљу статистичку и научну анализу.

Посебно важан сегмент визуализације јесте графичка презентација временских серија, као што је приказано на слици 3.35. У унутрашњем ваздуху концентрације суспендованих честица могу да се интензивно мењају услед активности корисника, отварања прозора, рада система вентилације, уласка спољашњег загађења или ресуспензије. Због тога табеларни приказ тренутних вредности није довољан за разумевање стања квалитета ваздуха у датом простору. Линијски дијаграми омогућавају јасно праћење трендова, идентификацију пикова, одређивање периода повећане изложености и анализу ефекта корективних мера. Графички приказ омогућава и визуелну анализу међусобних односа између параметара који се прате, као што су PM_{10}, $PM_{2.5}$, температура и релативна влажност ваздуха.

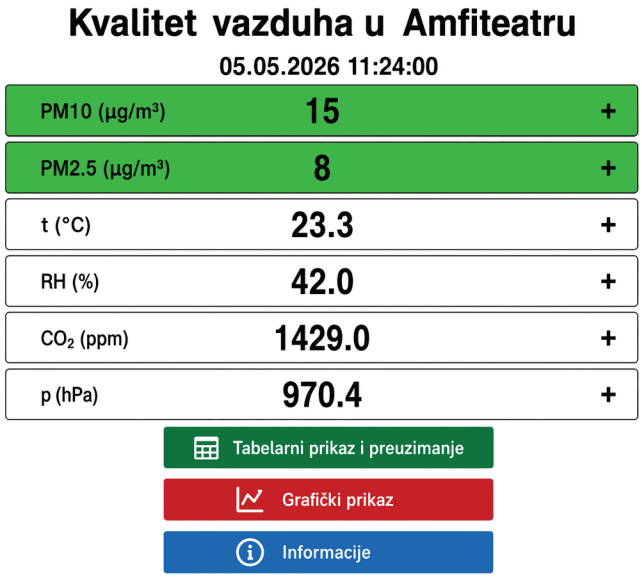


Слика 3.35. *Пример графичког приказа концентрација PM_{10} у web интерфејсу*

Поред линијских дијаграма, кориснички интерфејс може обезбеди и приказ средњих вредности за дефинисане временске интервале, минималних и максималних вредности, броја прекорачења изабраних прагова, као и упоредни приказ више мерних

локација. Овакви елементи су посебно важни у објектима јавне намене, јер омогућавају да се утврди да ли су поједини простори, временски периоди или услови коришћења повезани са повећаним концентрацијама суспендованих честица. На тај начин визуализација постаје аналитички алат, а не само средство приказа података.

Један од кључних захтева за кориснички интерфејс у систему проактивног мониторинга јесте презентација резултата мерења у реалном времену, као што је приказано на сликама 3.36. и 3.37. Приказом резултата мерења у реалном времену омогућава се правовремена реакција у случају наглог повећања концентрација суспендованих честица. Другим речима, стварају се услови за корективно управљање, као што су проветравање, активирање система филтрације, измена режима вентилације или привремено ограничење активности које доводе до повећане емисије или ресуспензије честица. Чворови *PM-MoN* мреже могу да приказују резултате мерења у реалном времену посредством *Wi-Fi* модула и *WWW* сервера, што је од посебног значаја за њихову примену у јавним објектима и теренским условима.



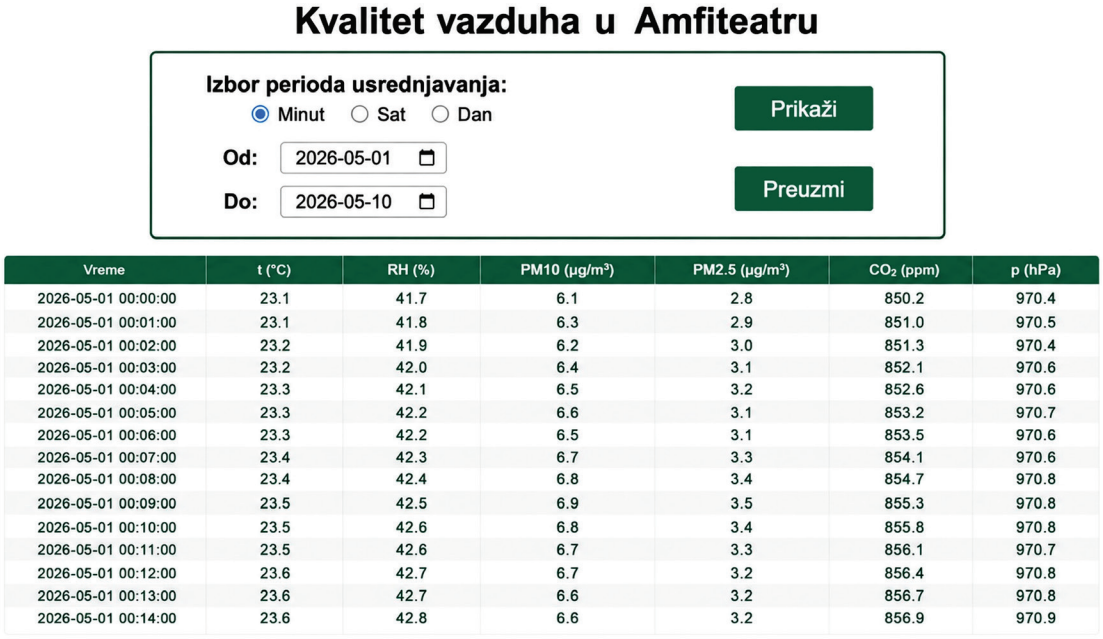
Слика 3.36. *Пример real-time приказа концентрација полутаната и IAQI категорија у web интерфејсу*

Интеграција *IAQI* модела у кориснички интерфејс представља важан корак у трансформацији мерних података у информације разумљиве ширем кругу корисника. Док концентрације PM_{10} и $PM_{2.5}$ изражене у $\mu g/m^3$ имају јасно значење за истраживаче и стручна лица, крајњим корисницима је често потребан једноставнији приказ стања. *IAQI* омогућава да се резултати мерења преведу у категорије квалитета ваздуха, као што су добар, прихватљив, погоршан или лош квалитет ваздуха, уз могућност примене боја,

симбола и текстуалних препорука. На тај начин кориснички интерфејс добија комуникациону и превентивну функцију, јер кориснику не приказује само бројчану вредност, већ и њено практично значење.

У оквиру система мониторинга квалитета ваздуха који је намењен јавним објектима, посебно је важно да кориснички интерфејс буде једноставан, прегледан и функционалан. Због тога је оправдана примена слојевитог приступа приказу: основни приказ за брзу процену стања, проширени приказ за анализу трендова и стручни приказ за преузимање података и детаљну обраду. Овакво решење омогућава да исти систем користе истраживачи, техничко особље, управљачи објеката и крајњи корисници, али на различитим нивоима сложености.

Кориснички интерфејс треба да омогући и преузимање података у формату погодном за даљу обраду. Ова функција је посебно значајна за научноистраживачку примену, јер омогућава статистичку анализу, развој калибрационих модела, процену изложености и израду извештаја. У *PM-MoN* систему централна *web* апликација омогућава приказ и преузимање података са свих чворова мреже мониторинга, док појединачни чворови омогућују приказ и преузимање података са конкретног чвора.



Vreme	t (°C)	RH (%)	PM10 (μg/m³)	PM2.5 (μg/m³)	CO_2 (ppm)	p (hPa)
2026-05-01 00:00:00	23.1	41.7	6.1	2.8	850.2	970.4
2026-05-01 00:01:00	23.1	41.8	6.3	2.9	851.0	970.5
2026-05-01 00:02:00	23.2	41.9	6.2	3.0	851.3	970.4
2026-05-01 00:03:00	23.2	42.0	6.4	3.1	852.1	970.6
2026-05-01 00:04:00	23.3	42.1	6.5	3.2	852.6	970.6
2026-05-01 00:05:00	23.3	42.2	6.6	3.1	853.2	970.7
2026-05-01 00:06:00	23.3	42.2	6.5	3.1	853.5	970.6
2026-05-01 00:07:00	23.4	42.3	6.7	3.3	854.1	970.6
2026-05-01 00:08:00	23.4	42.4	6.8	3.4	854.7	970.8
2026-05-01 00:09:00	23.5	42.5	6.9	3.5	855.3	970.8
2026-05-01 00:10:00	23.5	42.6	6.8	3.4	855.8	970.8
2026-05-01 00:11:00	23.5	42.6	6.7	3.3	856.1	970.7
2026-05-01 00:12:00	23.6	42.7	6.7	3.2	856.4	970.8
2026-05-01 00:13:00	23.6	42.7	6.6	3.2	856.7	970.8
2026-05-01 00:14:00	23.6	42.8	6.6	3.2	856.9	970.9

Слика 3.37. *Концепт извоза и преузимања података из web интерфејса за даљу анализу*

Поред *web* интерфејса, *PM-MoN* систем може да користи и *SMS* комуникацију као допунски канал информисања. Ова функција има посебан значај у ситуацијама када није доступан стабилан интернет приступ или када је потребно да се обезбеди брза

информација о тренутном стању квалитета ваздуха без приступа *web* апликацији. Чвор *PM-MoN* мреже, на захтев корисника, посредством *SIM* модула, шаље последње измерене вредности у виду *SMS* поруке (слика 3.38). На тај начин проширује се функционалност корисничког интерфејса, јер се обезбеђује да резултати мониторинг система буду доступни и у условима ограничене комуникационе инфраструктуре.

Са аспекта проактивног мониторинга, кориснички интерфејс треба да омогући и дефинисање прагова за упозорења. Прагови могу да буду засновани на граничним вредностима, препорукама, интерно дефинисаним *IAQI* категоријама или резултатима претходних мерења у конкретном објекту. Када измерене концентрације пређу дефинисану вредност, систем може да прикаже визуелно упозорење, пошаље обавештење или предложи корективну меру. Оваква функционалност представља суштину проактивног приступа, јер систем не служи само за архивирање података, већ и за правовремено деловање.

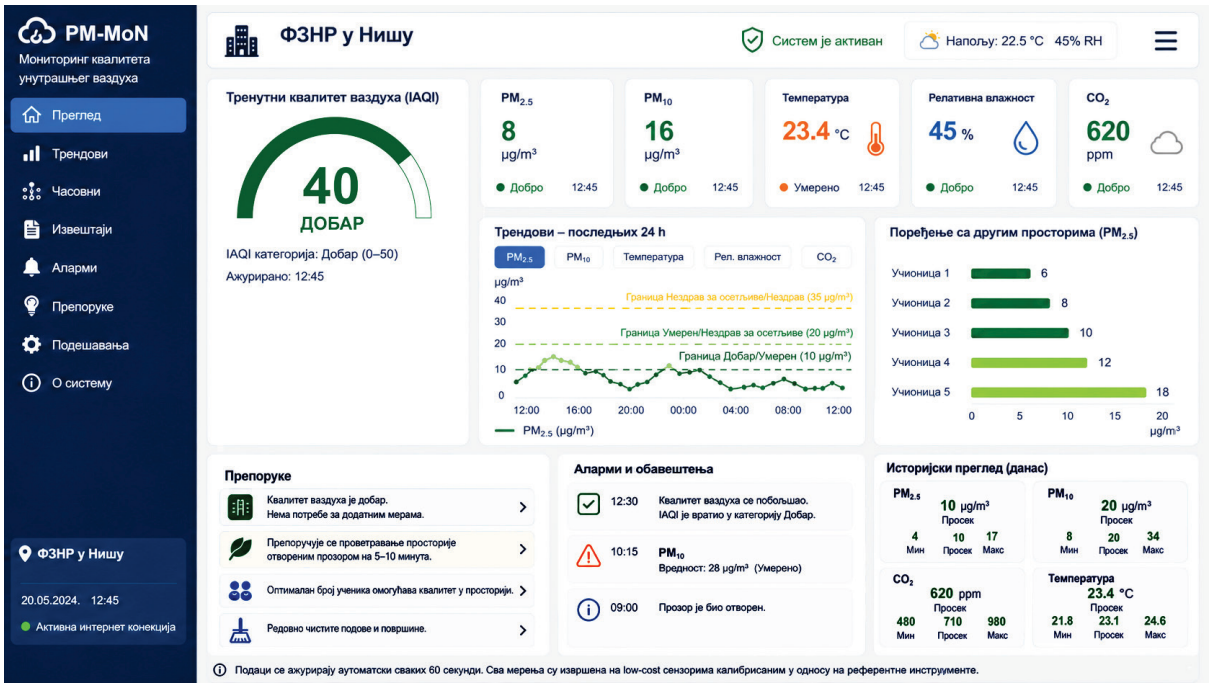


Слика 3.38. *Пример SMS комуникације између корисника и мрежног чвора*

Уколико се *PM-MoN* систем примењује у образовним установама, административним објектима или здравственим установама, кориснички интерфејс може да има и едукативну функцију. Приказ тренутног стања квалитета ваздуха, трендова и препорука може да допринесе подизању свести корисника о значају квалитета унутрашњег

ваздуха и утицају понашања корисника на промену концентрација суспендованих честица. У том смислу, визуализација података има и едукативни значај, јер повезује научно-технички систем са реалним корисницима простора, као што је приказано на слици 3.39.

Укупно посматрано, визуализација и кориснички интерфејс представљају кључну компоненту *PM-MoN* система, јер омогућавају да резултати мерења постану доступни, разумљиви и оперативно употребљиви. Добро пројектован кориснички интерфејс повезује сензорски систем, базу података, *IAQI* модел и корисника у јединствен функционални оквир. На тај начин *PM-MoN* систем постаје користан алат за подршку процени изложености и корективном управљању квалитетом унутрашњег ваздуха.



Слика 3.39. *Предлог корисничког dashboard-а за јавне објекте са приказом тренутног стања, трендова и препорука*

3.8. Имплементација система у реалним условима

Имплементација система *PM-MoN* у реалним условима представља кључну фазу истраживања, у којој је извршена верификација функционалности, поузданости и применљивости развијеног система у стварним условима експлоатације. За разлику од лабораторијских испитивања, реални услови карактеришу се променљивим микроклиматским параметрима, динамичким променама концентрација суспендованих честица и присуством различитих извора загађења, што омогућава свеобухватну процену перформанси система [16].

Експериментална имплементација система спроведена је у објектима јавне намене, који се одликују присуством већег броја корисника и израженом варијабилношћу услова унутрашње средине. Избор оваквих објеката омогућио је анализу понашања система у условима који су карактеристични за реалну примену, укључујући утицај активности корисника, режима вентилације и спољашњих услова на концентрације суспендованих честица [16].

У оквиру имплементације, *PM-MoN* чворови су постављени на репрезентативним локацијама унутар објеката, водећи рачуна о просторном распореду, висини постављања и удаљености од потенцијалних извора емисије (слика 3.40). На овај начин обезбеђено је прикупљање података који репрезентативно приказују услове у зони боравка корисника простора, што је од посебног значаја за процену квалитета унутрашњег ваздуха и њихове изложености. [46], [47].



Слика 3.40. *PM-MoN чворови на репрезентативним мерним местима*

Систем је функционисао у режиму континуираног мониторинга, при чему су подаци о концентрацијама суспендованих честица фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$, као и пратећи микроклиматски параметри, прикупљани у дефинисаним временским интервалима. Овакав приступ омогућио је формирање временских серија података високе резолуције, које су коришћене за даљу анализу динамике загађења [16].

Један од кључних аспеката имплементације била је интеграција система са комуникационом и визуализационом инфраструктуром. Прикупљени подаци су у реалном времену преношени ка серверу, где су складиштени, обрађивани и приказивани путем *web* интерфејса. Ова интеграција омогућила је континуирани увид у стање квалитета ваздуха и представљала основу за даљу анализу и интерпретацију резултата.

Анализа прикупљених података показала је да систем успешно региструје краткотрајне и дуготрајне промене концентрација суспендованих честица, које су повезане са активностима у простору, као што су кретање корисника, проветравање, рад система грејања и климатизације, као и инфилтрација спољашњег ваздуха. Ови резултати потврђују способност система да детектује динамичке промене које нису уочљиве класичним системима мониторинга са ниском временском резолуцијом.

Посебна пажња посвећена је поређењу резултата добијених применом *low-cost PM* сензора са резултатима референтних инструмената. Упоредна анализа показала је задовољавајући степен сагласности, уз одређена одступања која су коригована применом калибрационих модела. Ови резултати указују да је, уз адекватну калибрацију, могуће да се постигне поузданост и тачност резултата мерења довољна за примену у системима мониторинга квалитета ваздуха [16], [48], [49].

Поред техничке валидације, имплементација система омогућила је и процену његове функционалности са аспекта корисника. Једноставност употребе, доступност података и могућност брзе интерпретације резултата показали су се као значајни фактори у прихватању система од стране корисника. Ови аспекти представљају важан предуслов за практичну примену система у јавним објектима.

У оквиру имплементације тестирани су и механизми за проактивно управљање квалитетом ваздуха, укључујући дефинисање прагова концентрација и генерисање упозорења. У случајевима повећаних концентрација, систем је омогућио благовремену реакцију, као што је појачано проветравање простора или измена режима рада система за климатизацију, чиме је потврђена практична вредност развијеног решења [46], [47].

Имплементација у реалним условима показала је да *PM-MoN* систем омогућава интеграцију мерења, анализе и визуализације у јединствену функционалну целину, што представља основу за развој система подршке одлучивању у области управљања квалитетом унутрашњег ваздуха.

Упркос постигнутим резултатима, уочена су и одређена ограничења, која се пре свега односе на утицај микроклиматских услова на перформансе сензора, као и на потребу за периодичном калибрацијом. Ови фактори указују на значај даљег унапређења система, посебно у правцу развоја адаптивних калибрационих модела и примене напредних метода обраде података.

Укупно посматрано, резултати имплементације потврђују да развијени *PM-MoN* систем представља функционално, поуздано и применљиво решење за мониторинг квалитета унутрашњег ваздуха у објектима јавне намене. Овим је потврђена основна хипотеза истраживања, да примена система заснованог на *low-cost* сензорима и информационим технологијама омогућава ефикасно и проактивно управљање квалитетом ваздуха.

3.9. Критичка анализа система

Критичка анализа развијеног система *PM-MoN* представља важан сегмент овог истраживања, јер омогућава објективну процену његових предности, ограничења и потенцијала за даљи развој. У том контексту, систем је анализиран са аспекта техничких перформанси, поузданости мерења, применљивости у реалним условима, као и са аспекта оправданости његове употребе у односу на класичне приступе мониторингу квалитета ваздуха.

Једна од основних предности развијеног система огледа се у примени *low-cost* сензорских технологија, које омогућавају значајно смањење трошкова у односу на класичне референтне системе мониторинга. Ова карактеристика је посебно значајна у ситуацијама када је потребно обезбедити континуирано праћење квалитета унутрашњег ваздуха на више мерних места. Истовремено, примена сензора овог типа захтева опрез при тумачењу добијених резултата, имајући у виду њихова позната ограничења.

Са техничког аспекта, систем показује висок степен функционалне интеграције, јер обухвата све кључне компоненте савременог мониторинг система: мерење, комуникацију, складиштење, обраду и визуализацију података. На тај начин *PM-MoN* чвор не функционише само као мерни уређај, већ као повезана техничко-информациона целина која омогућава праћење стања унутрашњег ваздуха у реалном времену. Таква функционална целина је посебно важна за примену у реалним условима експлоатације, где вредност система не зависи само од тачности појединачног мерења, већ и од стабилности рада, континуитета прикупљања података и могућности њихове оперативне интерпретације.

Ипак, упркос бројним предностима, *PM-MoN* систем има и одређена ограничења. Најзначајније ограничење односи се на карактеристике *low-cost PM* сензора, који могу да буду осетљиви на промене микроклиматских услова, као што су температура и релативна влажност ваздуха [6], [16], [48], [49]. Ове појаве могу да доведу до одступања у резултатима мерења, што захтева примену калибрационих модела и процедура валидације [48], [49]. Због тога резултати добијени оваквим системом не могу да се посматрају изоловано, већ у контексту примењене калибрације, услова мерења и намене за коју се систем користи.

Друго ограничење односи се на просторну репрезентативност мерења. Иако систем омогућава постављање више сензорских чворова, резултати мерења могу да зависе од конкретне позиције уређаја у простору, што може да утиче на интерпретацију података. Ово је посебно важно у унутрашњим окружењима, у којима концентрације суспендованих честица могу да буду условљене локалним изворима, режимом вентилације, кретањем корисника и ресуспензијом честица. Зато критичка примена система подразумева не само анализу измерених вредности, већ и процену положаја мерних места и услова у којима су подаци прикупљени.

Са аспекта примене, важно је да се нагласи да систем не представља замену за референтне мере, већ њихову допуну. У том смислу, *PM-MoN* систем треба да се посматра као алат за скрининг, праћење трендова и подршку управљању, док се за регулаторне сврхе и даље користе референтне методе. Овакво позиционирање система је од суштинског значаја, јер спречава прецењивање могућности *low-cost* сензорских решења, али истовремено истиче њихову вредност у ситуацијама у којима је потребан чест, доступан и просторно флексибилан увид у стање квалитета ваздуха.

Критичка анализа такође показује да вредност *PM-MoN* система не произилази само из могућности мерења концентрација суспендованих честица, већ из начина на који добијени подаци могу да се користе за разумевање промена у унутрашњем окружењу. У том смислу, посебан значај има повезивање измерених концентрација са њиховом временском динамиком и могућношћу препознавања епизода повећаног загађења. Међутим, таква интерпретација захтева опрез, јер краткотрајне промене концентрација не морају увек да указују на трајно погоршање квалитета ваздуха, већ могу да буду последица тренутних активности у простору, промене режима проветравања или локалне ресуспензије честица.

Посебну пажњу у критичкој оцени захтева и примена *IAQI* модела. Иако индекс омогућава једноставнију интерпретацију резултата мерења и њихово превођење у разумљивије категорије квалитета ваздуха, његова употреба мора да буде повезана са јасно дефинисаним улазним параметрима, временским интервалима и ограничењима самог модела. Због тога *IAQI* у оквиру овог система треба да се посматра као оперативни индикатор стања, а не као апсолутна мера здравственог ризика.

Слично томе, интеграција система у *IoT* окружење представља значајну техничку предност, али истовремено отвара питања стабилности комуникације, континуитета преноса података, поузданости складиштења и заштите података. Ови аспекти су важни јер се у реалној примени вредност система не одређује само сензорским перформансама, већ и поузданошћу целокупног информационог ланца – од мерења до приказа и тумачења резултата.

На основу спроведене анализе може да се закључи да развијени систем *PM-MoN* представља функционално и научно засновано решење, које има значајан потенцијал за даљи развој и примену. Међутим, његова примена захтева јасно разумевање домета и ограничења система, посебно у погледу тачности *low-cost PM* сензора, просторне репрезентативности мерења, потребе за калибрацијом и начина интерпретације *IAQI* вредности.

Укупно посматрано, критичка анализа показује да систем има јасно дефинисане предности и ограничења, али да његова примена представља значајан корак ка унапређењу мониторинга и управљања квалитетом унутрашњег ваздуха. Његова највећа вредност огледа се у могућности да обезбеди континуиран, доступан и оперативно употребљив увид у стање унутрашњег ваздуха, уз услов да се резултати тумаче у складу са методолошким ограничењима система.

У поглављу 3 је приказана техничка, софтверска и информациона архитектура *PM-MoN* система. Међутим, практична применљивост оваквог система зависи од поузданости добијених података, стабилности рада у реалним условима и могућности корекције сензорских одступања. Због тога је у наредном поглављу приказана калибрација и валидација *PM-MoN* система, анализа утицаја *RH* и *T*, примена корекционих приступа, као и развој *IAQI* модела и процена изложености корисника простора.

3.10. Литература за поглавље 3

[1] E. G. Snyder *et al.*, "The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 20, pp. 11369–11377, Oct. 2013, doi:10.1021/es4022602.

[2] P. Kumar *et al.*, "The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities," *Environ. Int.*, vol. 75, pp. 199–205, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.envint.2014.11.019.

[3] N. Castell *et al.*, "Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?," *Environ. Int.*, vol. 99, pp. 293–302, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.envint.2016.12.007.

[4] L. Morawska *et al.*, "Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?," *Environ. Int.*, vol. 116, pp. 286–299, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.envint.2018.04.018.

[5] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.

[6] A. Bozilov *et al.*, "Civil air quality monitoring as an alternative and supplement to the National Air Quality Monitoring Network," *Thermal Science*, vol. 27, no. 3 Part B, pp. 2255–2263, 2023, doi: 10.2298/TSCI220303103B.

[7] F. Karagulian *et al.*, "Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level," *Atmos. Environ.*, vol. 120, pp. 475–483, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.087.

[8] M. Ródenas García *et al.*, "Review of low-cost sensors for indoor air quality: Features and applications," *Appl. Spectrosc. Rev.*, vol. 57, no. 9–10, pp. 747–779, Nov. 2022, doi: 10.1080/05704928.2022.2085734.

[9] M. I. Mishchenko, "Gustav Mie and the fundamental concept of electromagnetic scattering by particles: A perspective," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 110, no. 14–16, pp. 1210–1222, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.jqsrt.2009.02.002.

[10] M. R. Giordano *et al.*, "From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors," *J. Aerosol Sci.*, vol. 158, p. 105833, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jaerosci.2021.105833.

[11] R. Jayaratne, X. Liu, P. Thai, M. Dunbabin, and L. Morawska, "The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 11, no. 8, pp. 4883–4890, Aug. 2018, doi: 10.5194/amt-11-4883-2018.

[12] B. Alfano *et al.*, “A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers’ Perspectives,” *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6819, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20236819.

[13] Nova Fitness Co. Ltd., “Laser PM2.5 Sensor specification: SDS011,” Oct. 2015. Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf

[14] Plantower, “PMS5003 series data manual: Digital universal particle concentration sensor,” Jun. 2016. Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf

[15] Plantower, “PMS7003 series data manual: Digital universal particle concentration sensor,” 1, 2016. Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://download.kamami.pl/p564008-PMS7003%20series%20data%20manua_English_V2.5.pdf

[16] A. Božilov *et al.*, “Performance assessment of NOVA SDS011 low-cost PM sensor in various microenvironments,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 194, no. 9, p. 595, Sep. 2022, doi: 10.1007/s10661-022-10290-7.

[17] A. Di Antonio, O. A. M. Popoola, B. Ouyang, J. Saffell, and R. L. Jones, “Developing a Relative Humidity Correction for Low-Cost Sensors Measuring Ambient Particulate Matter,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 2790, Aug. 2018, doi: 10.3390/s18092790.

[18] W. Mui *et al.*, “Development of ASTM International D8405 – Standard Test Method for Evaluating PM $_{2.5}$ Sensors or Sensor Systems Used in Indoor Applications,” *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 20, no. 9, pp. 373–389, Sep. 2023, doi: 10.1080/15459624.2023.2212739.

[19] N. Zimmerman *et al.*, “A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 11, no. 1, pp. 291–313, Jan. 2018, doi: 10.5194/amt-11-291-2018.

[20] ASTM International, “ASTM D8405-21: Standard Test Method for Evaluating PM2.5 Sensors or Sensor Systems Used in Indoor Air Applications,” West Conshohocken, PA, USA, Oct. 2021. doi: 10.1520/D8405-21.

[21] M. Badura, P. Batog, A. Drzeniecka-Osiadacz, and P. Modzel, “Regression methods in the calibration of low-cost sensors for ambient particulate matter measurements,” *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 6, p. 622, Jun. 2019, doi: 10.1007/s42452-019-0630-1.

[22] E. Anastasiou *et al.*, “Feasibility of low-cost particle sensor types in long-term indoor air pollution health studies after repeated calibration, 2019–2021,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, p. 14571, Aug. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-18200-0.

[23] D. B. Topalović, V. M. Tasić, J. S. S. Petrović, J. Lj. Vlahović, M. B. Radenković, and I. D. Smičiklas, “Unveiling the potential of a novel portable air quality platform for assessment of fine and coarse particulate matter: in-field testing, calibration, and machine learning insights,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 196, no. 10, p. 888, Oct. 2024, doi: 10.1007/s10661-024-13069-0.

[24] D. B. Topalović *et al.*, “Primena XGBoost algoritma za kalibraciju prenosnog PAQMON 1.0 PM monitora u uslovima spoljašnje sredine,” *Bakar*, vol. 50, no. 1, pp. 55–56, 2025, doi: 10.5937/bakar2501055T.

[25] J. Venkatraman Jagatha *et al.*, “Calibration Method for Particulate Matter Low-Cost Sensors Used in Ambient Air Quality Monitoring and Research,” *Sensors*, vol. 21, no. 12, p. 3960, Jun. 2021, doi: 10.3390/s21123960.

[26] Arduino, “Arduino Mega 2560 Rev3.” Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf

[27] Aosong Electronics Co. Ltd., “Digital-output relative humidity & temperature sensor/module: DHT22 (DHT22 also named as AM2302).” Accessed: Mar. 25, 2026. [Online]. Available: https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf

[28] SnapMagic Search, “DHT22 Symbol, Footprint & 3D Model by Aosong Electronics.” Accessed: Mar. 25, 2026. [Online]. Available: https://www.snapeda.com/parts/DHT22/Aosong%20Electronics/view-part/

[29] Bosch Sensortec GmbH, “BMP180: Digital pressure sensor.” Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://www.mouser.com/datasheet/2/783/BST-BMP180-DS000-1509579.pdf

[30] Shenzhen LC Technology Co. Ltd., “IIC interface DS3231 high precision clock module.” Accessed: Mar. 25, 2026. [Online]. Available: https://lightcom.su/upload/iblock/b49/muqp1q3xsauxcck770w7sxeb734462w5.pdf

[31] Datasheet Hub, “DS3231 Precision I2C Real-Time Clock Module.” Accessed: Mar. 25, 2026. [Online]. Available: https://www.datasheethub.com/ds3231-precision-i2c-real-time-clock-module/

[32] Handson Technology, “ESP8266 NodeMCU WiFi Development Board.” Accessed: Mar. 28, 2026. [Online]. Available: https://handsontec.com/dataspecs/module/esp8266-V13.pdf

[33] SIMCom Wireless Solutions, “SIM900 Hardware Design.” Accessed: Mar. 28, 2026. [Online]. Available: https://simcom.ee/documents/SIM900/SIM900_Hardware%20Design_V2.05.pdf

[34] K. Draif, “Comment utiliser SIM800L et SIM900 module GSM GPRS avec Arduino.” Accessed: Mar. 28, 2026. [Online]. Available: https://www.moussasoft.com/comment-utiliser-sim800l-et-sim900-module-gsm-gprs-avec-arduino/

[35] “Micro SD Card Memory Shield Module.” Accessed: Mar. 25, 2026. [Online]. Available: https://cdn.manomano.com/pim-dam-img/351/80293794/7e7482b6737d37ac71bfa0daf6ec2c6adfb1632c.pdf

[36] Handson Technology, “I2C Serial Interface 20x4 LCD Module.” Accessed: Mar. 25, 2026. [Online]. Available: https://www.handsontec.com/dataspecs/I2C_2004_LCD.pdf

[37] Handson Technology, “4x4 Matrix ABS Plastic Keypad Module.” Accessed: Mar. 29, 2026. [Online]. Available: https://handsontec.com/dataspecs/switches/4x4%20keypad-B.pdf

[38] AZ-Delivery, “GY-68 BMP180 barometric air pressure and temperature sensor.” Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://www.az-delivery.de/en/products/azdelivery-gy-68-bmp180-barometrischer-sensor-luftdruck-modul-fur-arduino-und-raspberry-pi

[39] Senseair AB, “Senseair S8 Commercial.” Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://rmtplusstoragesenseair.blob.core.windows.net/docs/Dev/publicerat/PSH3444.pdf

[40] Newegg Business Inc., “MS1100 MS-1100 VOC Gas Sensor Module Formaldehyde Benzene Concentration Detection Breakout 100mA CJMCU-1100 for Arduino.” Accessed: Mar. 29, 2026. [Online]. Available: https://www.neweggbusiness.com/product/product.aspx?item=9siv0af9c57002

[41] Raspberry Pi Ltd., “Raspberry Pi Zero W.” Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-w/

[42] Raspberry Pi Ltd., “Raspberry Pi 3 Model B+.” Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/

[43] Arduino, “Arduino IDE documentation.” Accessed: Mar. 26, 2026. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/software/ide/

[44] JSON Schema Organization, “Understanding JSON Schema.” Accessed: Mar. 26, 2026. [Online]. Available: https://json-schema.org/UnderstandingJSONSchema.pdf

[45] Random Nerd Tutorials, “ESP8266 NodeMCU client-server Wi-Fi communication.” Accessed: Apr. 01, 2026. [Online]. Available: https://randomnerdtutorials.com/esp8266-nodemcu-client-server-wi-fi/

[46] A. C. Rai *et al.*, “End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring,” *Science of The Total Environment*, vol. 607–608, pp. 691–705, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.266.

[47] M. M. Protić, A. V. Božilov, V. M. Tasić, I. M. Lazović, N. Z. Mišić, and B. A. Radović, “Evaluating the effect of a modified air purifier on air quality in an apartment in Nis, Serbia,” *Thermal Science*, vol. 29, no. 6 Part A, pp. 4503–4512, 2025, doi: 10.2298/TSCI250122089P.

[48] A. Polidori, V. Quality, S. D. Papapostolou, and H. Zhang, “Laboratory Evaluation of Low-Cost Air Quality Sensors Laboratory Setup and Testing Protocol,” Diamond Bar, CA, Aug. 2016. Accessed: Jan. 17, 2026. [Online]. Available: https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/protocols/sensors-lab-testing-protocol6087afefc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf

[49] H. Zhang and R. Srinivasan, “A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management,” *Sustainability*, vol. 12, no. 21, p. 9045, Oct. 2020, doi: 10.3390/su12219045.

4. ВАЛИДАЦИЈА СИСТЕМА, *IAQI* И ПРОЦЕНА ИЗЛОЖЕНОСТИ

4.1. Експериментални дизајн и методологија валидације

Експериментални дизајн валидације *PM-MoN* система развијен је са циљем да се процене поузданост, тачност, прецизност и применљивост система у условима који одговарају реалним сценаријима мониторинга квалитета ваздуха. Будући да је систем примарно намењен праћењу квалитета унутрашњег ваздуха, методологија валидације није заснована искључиво на лабораторијском испитивању у строго контролисаној комори, већ на хибридном приступу који обједињује лабораторијску и теренску колокацију са референтним и еквивалентним инструментима.

Овакав приступ омогућава процену перформанси система у условима у којима су присутне реалне варијације концентрација суспендованих честица, температуре, релативне влажности, режима вентилације и извора емисије. У односу на стандардизовано коморно испитивање, хибридни приступ има мањи степен контроле појединачних параметара, али обезбеђује већу репрезентативност резултата за практичну примену система у унутрашњим и спољашњим микросрединама.

Методолошки оквир валидације заснован је на колокацији тестираних *PM-MoN* уређаја са референтним или еквивалентним инструментима. Три уређаја *PM-MoN*, означена као *P1*, *P2* и *P3*, постављена су у непосредној близини гравиметријских узоркивача малог волумена, оптичког монитора *OSIRIS Model 2315* и *GRIMM EDM180* монитора. На тај начин обезбеђено је поређење са различитим типовима мерних метода и омогућена је свеобухватнија процена перформанси система.

Валидација је обухватила лабораторијска мерења у унутрашњем ваздуху и теренска мерења у амбијенталном ваздуху. Лабораторијска мерења омогућила су процену рада система у релативно стабилнијим условима унутрашњих простора, док су теренска мерења омогућила анализу понашања система при већим варијацијама температуре, релативне влажности и састава аеросола. Оваква комбинација омогућила је да се *PM-MoN* оцени не само као технички прототип, већ као систем намењен реалној примени.

Примењени експериментални дизајн представља основу за критичку процену могућности и ограничења *PM-MoN* система. Комбинацијом лабораторијске и теренске колокације, применом више референтних и еквивалентних инструмената и

усклађивањем временске резолуције података, створени су услови за поуздану статистичку анализу перформанси система, која је приказана у наредној целини. Део експерименталних резултата приказаних у наставку заснива се на подацима из рада аутора [1], док су табеларни и графички прикази усклађени са структуром дисертације.

4.2. Калибрација, валидација и процена перформанси система

Калибрација и процена перформанси *PM-MoN* система представљају централни део експерименталне провере развијене платформе. Циљ ове целине није само поређење очитавања *PM-MoN* уређаја са референтним инструментима, већ и процена стабилности, репродуктивности, међусензорске варијабилности и применљивости система у различитим микросрединама.

Калибрација је реализована методом колокације, при чему су резултати три *PM-MoN* уређаја поређени са резултатима гравиметријских и оптичких инструмената. Оваква поставка омогућила је анализу понашања система у унутрашњем ваздуху, који представља примарну област примене, али и у спољашњем ваздуху, који је коришћен као условно строжи тест због већих варијација метеоролошких параметара и састава аеросола [2]–[4].

4.2.1. Локације и кампање мерења

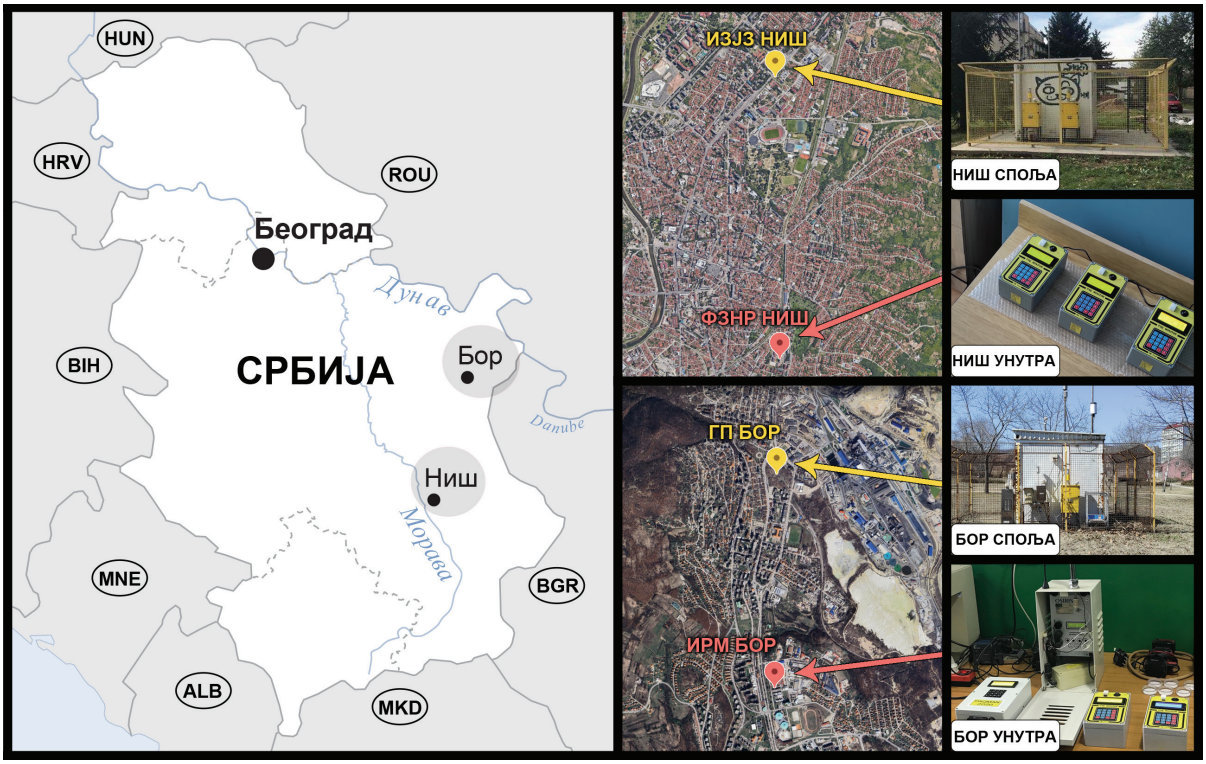
Кампање мерења концентрација суспендованих честица фракције PM_{10} и $PM_{2.5}$ у унутрашњем и спољашњем ваздуху спроведене су у два града у Србији: Бору, где индустрија представља доминантан извор загађења ваздуха суспендованим честицама, и Нишу, где су саобраћај и индивидуална ложишта најзначајнији извори ових честица.

У Бору, значајан извор загађења ваздуха представљају емисије отпадних гасова из топионице бакра, која емитује сумпор-диоксид (SO_2), суспендоване честице са повећаним садржајем тешких метала и аероседименте [5]. Насупрот томе, у Нишу, саобраћај и локално грејање представљају доминантне изворе суспендованих честица [6]. Због различитих извора загађења, резултати мерења у ова два града показују очекиване разлике у погледу концентрација, хемијског састава и расподеле величина суспендованих честица.

Кампање мерења спроведене су у периоду од 15. јануара 2021. до 15. јануара 2022. године, током грејне (ГС) и негрејне сезоне (НС), са циљем да се испита утицај сезонских варијација, различите расподеле величина суспендованих честица и различитих нивоа концентрација на очитавања *PM* монитора.

Колокација *PM* монитора са референтним уређајима у унутрашњем ваздуху вршена је у две лабораторије: Лабораторији за примењену електронику и рачунарско инжењерство Института за рударство и металургију у Бору (*ИРМ Бор*) и Лабораторији за управљање квалитетом ваздуха Факултета заштите на раду у Нишу, Универзитета у Нишу (*ФЗНР Ниш*). Током испитивања коришћена су три *PM-MoN* уређаја истог типа.

Испитивање *PM-MoN* уређаја на отвореном простору спроведено је на станицама за аутоматски мониторинг квалитета ваздуха Агенције за заштиту животне средине Републике Србије (*AMS SEPA*): *АМС ИЗЈЗ Ниш* – Институт за јавно здравље у Нишу и *АМС ГП Бор* – Бор, Градски парк, које су опремљене *GRIMM EDM 180* мониторима за мерење концентрација суспендованих честица. Овај приступ представља стандардну методу за процену перформанси нових уређаја, укључујући *low-cost* сензоре, која се заснива на постављању уређаја који се испитују у непосредној близини референтних или њима еквивалентних инструмената, као што је приказано на слици 4.1.



Слика 4.1. *Локације на којима је вршена калибрација PM-MoN система*

4.2.2. Референтна опрема и услови колокације

- **Опрема коришћена при калибрацији у унутрашњем ваздуху**

Лабораторије *ИРМ Бор* и *ФЗНР Ниш* имају сличне карактеристике: запремина износи од 20 m^3 до 25 m^3, прозори имају површину од 1,5 m^2 и 2 m^2, поседују једна врата, док су подови прекривени ламинатом. Лабораторије се загревају радијаторима из централног грејања, а вентилација је природна, путем отварања прозора или врата, јер нема механичких вентилационих или климатизационих система. Током мерења, прозори и врата су најчешће били затворени, а број корисника у просторији варирао је између један и два. Три монитора *PM-MoN* (означена као *P1*, *P2* и *P3*) била су колоцирана са два референтна узоркивача малог волумена типа *Sven/Leckel LVS3* и уређајем *OSIRIS Model 2315*, који омогућава директно очитавање концентрација *PM* [7].

За мерење средњих дневних концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$ коришћена су два референтна узоркивача *Sven/Leckel LVS3* [8], један опремљен главом за узорковање PM_{10}, а други главом за узорковање $PM_{2.5}$, као што је приказано на сликама 4.2. и 4.3. Узорковање је спроведено у складу са стандардом *SRPS EN 12341:2023* [9].



Слика 4.2. *Колокација уређаја у лабораторији ИРМ Бор*

OSIRIS 2315 монитор подешен је да бележи средње петнаестоминутне концентрације *PM*, док су *PM-MoN* монитори бележили средње минутне вредности. Да би се израчунао дневни просек, било је неопходно да се забележи најмање 90 % ових вредности. У супротном се сматрало да вредности недостају и да мерење није валидно.

Протоци *LVS3* узоркивача (38,3 l/min) и *OSIRIS* монитора (0,6 l/min) проверавани су сертификованим протокомерима на почетку и на крају кампање мерења.



Слика 4.3. *Колокација уређаја у лабораторији ФЗНР Ниш*

- **Опрема коришћена при калибрацији у амбијенталном ваздуху**

Два референтна узоркивача *LIFETEK PMS* [10] и три *PM-MoN* монитора била су постављена поред станица за мониторинг квалитета ваздуха Агенције за заштиту животне средине *ГП Бор* и *ИЗЈЗ Ниш*, где су били колоцирани са *GRIMM EDM180 PM* монитором, као што је приказано на сликама 4.4. и 4.5.



Слика 4.4. *Колокација уређаја на локацији ГП Бор*



Слика 4.5. *Колокација уређаја на локацији ИЗЈЗ Ниш*

- **Кампање мерења у Бору**

Током грејне сезоне, мерење концентрација суспендованих честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ у ваздуху унутар лабораторије *ИРМ Бор* вршено је од 9. априла до 18. априла 2021. године. У негрејној сезони, мерење концентрација суспендованих честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ у ваздуху лабораторије вршено је у периоду од 7. јуна до 21. јуна 2021. године.

Мерење концентрација суспендованих честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ у амбијенталном ваздуху поред *АМС ГП Бор* током грејне сезоне вршено је од 23. марта до 9. априла 2021. године, док су мерења у негрејној сезони вршена од 30. јула до 9. августа 2021. године.

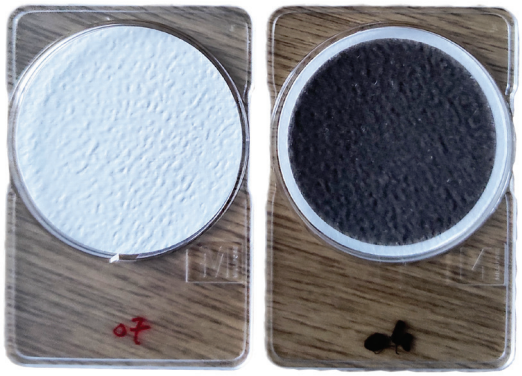
- **Кампање мерења у Нишу**

Током грејне сезоне, мерење концентрација суспендованих честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ у ваздуху унутар лабораторије *ФЗНР Ниш* вршено је од 21. фебруара до 9. марта 2021. године. У негрејној сезони, мерење концентрација суспендованих честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ у ваздуху лабораторије *ФЗНР Ниш* вршено је од 14. маја до 24. маја 2021. године.

Мерење концентрација суспендованих честица PM_{10} и $PM_{2.5}$ у амбијенталном ваздуху поред *АМС ИЗЈЗ Ниш* током грејне сезоне вршено је од 23. децембра 2021. до 11. јануара 2022. године, док су мерења у негрејној сезони вршена од 24. маја до 7. јуна 2021. године.

- **Гравиметријска анализа узорака *PM***

Током истраживања, гравиметријско узорковање *PM* у ваздуху вршено је на кварцним филтерима високе чистоће (*Whatman QM-A,* пречника 47 mm [11]), као што је приказано на слици 4.6.



Слика 4.6. *Whatman QM-A (47 mm) филтери пре и након експонирања*

Узорци су прикупљани свакодневно (од 15 часова до 15 часова наредног дана). Укупно је прикупљено 112 узорака, по 56 узорака за сваку фракцију *PM*. Кондиционирање филтера спроведено је у лабораторији *ИРМ Бор* према захтевима стандарда *SRPS EN 12341:2023*. Граница детекције, израчуната као три стандардне девијације нето масе празних узорака подељене са номиналном запремином узоркованог ваздуха, износила је 2,2 μg/m^3.

4.2.3. Статистички показатељи перформанси

У складу са стандардима *ASTM D8405-21* [2] и *SRPS ISO/IEC 17025:2017* [3], примењена је статистичка анализа која обухвата више индикатора перформанси: средња сатна вредност концентрација *PM*, стандардна девијација (енгл. *standard deviation – SD*), коефицијент варијације (енгл. *coefficient of variation – CV*), тачност, прецизност, средња грешка пристрасности (енгл. *mean bias error – MBE*), корен средње квадратне грешке (енгл. *root mean square error – RMSE*), међумониторска варијабилност (енгл. *inter-monitor variability – IMV*), као и коефицијент детерминације (R^2) између референтних инструмената и коригованих резултата тестираних *PM-MoN* монитора [12].

Све анализе су извршене коришћењем статистичких софтверских пакета *SPSS Statistics 17.0* и *Microsoft Office Excel 2016*.

Тачност представља степен блискости између измерене вредности добијене тестираним *PM-MoN* уређајем и референтне вредности [12], [13]. Тачност је рачуната коришћењем израза:

$$Tačnost_{kampanja} = 100 - \left|\frac{REF - PM_i}{REF}\right| \times 100 \tag{4.1}$$

где је:

REF – масена концентрација *PM* измерена референтним инструментом (*GRIMM 180 EDM* за амбијентални ваздух или *OSIRIS* за унутрашњи ваздух),

PM_i – средња масена концентрација *PM* измерена *i*-тим *PM-MoN* уређајем током периода колоцирања.

Свеукупна тачност је рачуната као средња вредност тачности из сваког периода колоцирања (*n* – број периода колоцирања) помоћу израза:

$$Sveukupna\ tačnost = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Tačnost_{kampanja} \tag{4.2}$$

Да би се проценило да ли *PM-MoN* уређаји прецењују или потцењују концентрацију *PM*, израчуната је средња грешка пристрасности (*MBE*) коришћењем израза:

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{REF - PM_i}{REF} \times 100 \tag{4.3}$$

Треба напоменути да се израз (4.3) примењује за средње сатне масене концентрације *PM*.

Коефицијент варијације (*CV*), као мера расипања/дисперзије података око средње вредности, израчунат је коришћењем израза:

$$CV = \sum \frac{\sigma}{\mu} \tag{4.4}$$

где су:

σ – стандардна девијација,

μ – средња вредност средњих сатних концентрација *PM*.

Прецизност два уређаја истог типа (*AP*) је израчуната коришћењем израза:

$$AP = \left| \frac{PM_i - PM_j}{Average\left(PM_i,\ PM_j\right)} \right| \tag{4.5}$$

Грешка прецизности од 0 % између два *PM-MoN* уређаја би значила да су оба уређаја мерила идентичну вредност концентрације *PM*.

Коефицијенти детерминације (R^2) израчунати су за резултате мерења између свака два *PM-MoN* уређаја, као и за резултате мерења *PM-MoN* уређаја и резултате референтних узоркивача, коришћењем израза 3.8.

Корен средње квадратне грешке (*RMSE*) је израчунат коришћењем израза:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(REF_i - PM_i)^2}{N}} \tag{4.6}$$

где су REF_i и PM_i одговарајуће *i*-те средње сатне концентрације *PM* у периоду колоцирања од *N* сати.

Међумониторска варијабилност (*IMV*) показује колико су блиска мерења између различитих јединица истог типа уређаја. За сет од три *PM-MoN* уређаја, *IMV* се израчунава коришћењем израза [13]:

$$IMV = \left| \frac{Prosek_{najviši} - Prosek_{najniži}}{Prosek_{srednji}} \right| \times 100 \tag{4.7}$$

где су:

$Prosek_{najviši}$ – највиша средња концентрација *PM* (од три посматрана уређаја),

$Prosek_{najniži}$ – најнижа средња концентрација *PM* (од три посматрана уређаја),

$Prosek_{srednji}$ – средња вредност концентрације *PM* (од три посматрана уређаја).

4.2.4. Корекциони фактори

Први ниво корекције резултата *PM-MoN* уређаја заснован је на примени корекционог фактора добијеног поређењем са референтном гравиметријском методом. Овај приступ представља једноставан и практично применљив начин смањења систематског одступања, посебно у ситуацијама када је циљ добијање коригованих концентрација погодних за дугорочно праћење трендова и израчунавање *IAQI* индекса.

За корекцију резултата мерења *PM* монитора коришћен је метод описан у [14]. Корекциони фактор (*F*) се израчунава према изразу:

$$F = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{G_i}{S_i} \tag{4.8}$$

где је:

G_i – средња дневна концентрација *PM* за *i*-ти дан мерења добијена применом референтне гравиметријске методе,

S_i – одговарајућа средња дневна концентрација *PM* добијена применом *PM-MoN* уређаја за *i*-ти дан мерења,

n – број дана упоредног мерења.

Корекција резултата мерења *PM-MoN* уређаја врши се множењем резултата мерења са корекционим фактором. Корекциони фактори израчунати за сваки тестирани уређај и сваку фракцију *PM* приказани су у табели 4.1.

Добијени корекциони фактори, приказани у табели 4.1, показују да су тестирани *PM-MoN* уређаји у већини кампања давали ниже вредности у односу на референтну гравиметријску методу, због чега је корекција извршена множењем измерених вредности одговарајућим фактором.

Просечна вредност корекционог фактора за фракцију PM_{10} износила је 1,18, док је случају $PM_{2.5}$ ова вредност износила 1,20, што указује на релативно конзистентно одступање и могућност примене једноставног корекционог приступа у основној конфигурацији система.

Истовремено, нешто више вредности корекционих фактора у амбијенталном ваздуху указују на већи утицај метеоролошких параметара и састава аеросола у спољашњим условима. Овај резултат је важан јер показује да једноставни корекциони фактор може да буде довољан за основну примену у унутрашњем ваздуху, али да у условима изражене варијабилности *RH, T* и аеросола треба да се размотре проширени корекциони модели [15], [16].

Корекциони фактори за амбијентални ваздух добијени за фракцију $PM_{2.5}$ упоредиви су са резултатима других истраживача [13]. За разлику од *PM* монитора који користе сензор *NOVA SDS011*, *low-cost* $PM_{2.5}$ монитор *PurpleAir*, са *Plantower PMS5003* сензором, прецењује вредности концентрација $PM_{2.5}$ у амбијенталном ваздуху [15].

Експериментални резултати других истраживача такође указују на то да већина инструмената који раде на принципу расејања светлости, као што је *TSI DustTrak* [17], прецењује нивое PM_{10} и $PM_{2.5}$ концентрација за 2 до 2,5 пута у поређењу са референтним инструментима [18]. Ови подаци указују на то да је корекција резултата мерења концентрација *PM* применом *low-cost* сензора кључна за њихову употребљивост.

Табела 4.1. *Корекциони фактори*

КАМПАЊА	PM_{10}			$PM_{2.5}$		
	P1	***P2***	***P3***	***P1***	***P2***	***P3***
ИРМ БОР **ГС унутра**	1,10	1,10	1,20	1,10	1,15	1,20
ГП БОР **ГС споља**	1,15	1,20	1,20	1,30	1,20	1,25
ИРМ БОР **НС унутра**	1,10	1,15	1,10	1,15	1,20	1,20
ГП БОР **НС споља**	1,20	1,30	1,15	1,20	1,15	1,30
ФЗНР НИШ **ГС унутра**	1,10	1,15	1,10	1,15	1,20	1,20
ИЗЈЗ НИШ **ГС споља**	1,30	1,20	1,20	1,20	1,25	1,25
ФЗНР НИШ **НС унутра**	1,15	1,20	1,20	1,15	1,20	1,15
ИЗЈЗ НИШ **НС споља**	1,30	1,20	1,15	1,20	1,20	1,25

Напомена: подаци су преузети из [1] и прилагођени за потребе приказа у дисертацији.

4.2.5. Резултати валидације у Бору

Преглед основне статистике резултата мерења у Бору (средња масена концентрација *PM,* стандардна девијација (*SD*), коефицијент варијације (*CV*), тачност, средња грешка пристрасности (*MBE*), корен средње квадратне грешке (*RMSE*) и међумониторска варијабилност (*IMV*)) дат је у табели 4.2.

Резултати добијени у Бору показују да *PM-MoN* уређаји прате варијације концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$ у унутрашњем ваздуху са високим степеном сагласности у односу на референтне инструменте. Вредности тачности, *RMSE* и међумониторске варијабилности указују на стабилан рад уређаја и добру репродуктивност мерења. Већа одступања у спољашњем ваздуху очекивана су због утицаја метеоролошких услова, сезонских промена и специфичног индустријског састава аеросола у Бору.

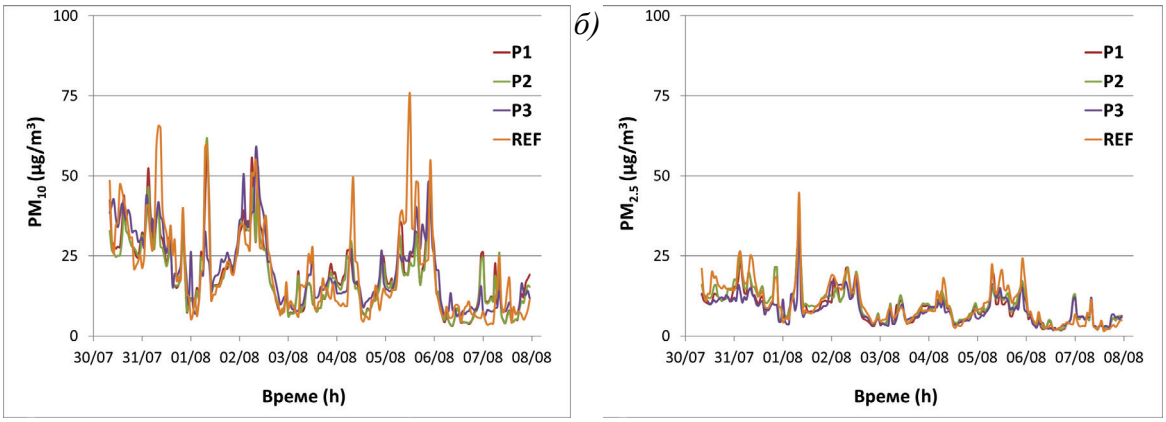
Табела 4.2. *Основна статистика резултата кампање мерења у Бору (масене концентрације PM, SD, CV, тачност, MBE, RMSE и IMV)*

КАМПАЊЕ БОР	**Уређај**	***Средња вредност*** **[μg/m³]**	***SD*** **[μg/m³]**	***CV***	***Тачност*** **[%]**	***MBE*** **[%]**	***RMSE*** **[μg/m³]**	***IMV*** **[%]**
PM_{10}	***P1***	10,94	7,44	0,68	99,34	10,84	3,21	
ИРМ БОР	***P2***	10,37	6,82	0,66	94,20	5,71	3,36	6,70
НС унутра	***P3***	11,10	9,78	0,88	99,19	0,16	1,70	
$PM_{2.5}$	***P1***	8,84	5,55	0,63	94,97	2,36	2,36	
ИРМ БОР	***P2***	8,63	5,52	0,64	92,67	-0,62	2,17	7,69
НС унутра	***P3***	8,72	6,54	0,75	93,66	-5,83	1,40	
PM_{10}	***P1***	19,58	11,53	0,59	94,53	12,05	9,33	
ГП БОР	***P2***	18,54	10,68	0,58	89,52	6,13	9,22	10,92
НС споља	***P3***	20,66	11,48	0,56	99,74	17,16	8,96	
$PM_{2.5}$	***P1***	8,91	5,12	0,58	88,13	-4,35	3,07	
ГП БОР	***P2***	9,58	5,26	0,55	94,79	2,90	2,68	20,71
НС споља	***P3***	8,20	4,33	0,53	81,15	-8,01	3,80	
PM_{10}	***P1***	13,12	9,78	0,75	97,50	10,87	4,33	
ИРМ БОР	***P2***	13,12	8,69	0,66	97,52	12,93	5,02	6,17
ГС унутра	***P3***	12,65	11,32	0,89	94,00	-3,17	2,73	
$PM_{2.5}$	***P1***	11,40	5,72	0,50	94,94	4,20	3,30	
ИРМ БОР	***P2***	10,85	5,77	0,53	90,35	-2,00	3,30	11,29
ГС унутра	***P3***	10,74	6,99	0,65	89,42	-8,62	2,30	
PM_{10}	***P1***	22,64	10,09	0,45	95,41	11,95	11,12	
ГП БОР	***P2***	22,41	8,93	0,40	94,49	11,14	10,35	5,70
ГС споља	***P3***	22,99	11,06	0,48	96,92	10,64	9,67	
$PM_{2.5}$	***P1***	13,04	5,13	0,39	96,91	0,35	3,77	
ГП БОР	***P2***	14,54	6,03	0,41	91,96	10,78	3,87	10,88
ГС споља	***P3***	14,04	7,09	0,50	95,68	6,79	5,00	

Напомена: подаци су преузети из [1] и прилагођени за потребе приказа у дисертацији.

На основу резултата приказаних у табели 4.2, може да се закључи да су највише средње вредности концентрација *PM*, као и *SD* и *RMSE* добијене за фракцију PM_{10} у спољашњем ваздуху током грејне и негрејне сезоне. Вредности *CV* (у просеку 0,55 за ГС и 0,64 за НС), као и *тачност,* биле су уједначене. Вредности *MBE* варирају у опсегу од - 8,6 % до 17,2 % (за уређај *P3*), док су биле конзистентне само у случају мерења концентрације PM_{10} у спољашњем ваздуху, када су резултати свих уређаја премашивали референтне вредности. Ради илустрације, на слици 4.7 приказани су линијски дијаграми средњих сатних концентрација *PM* у спољашњем ваздуху у Бору у негрејној сезони.

а) *б)*



Слика 4.7. *Средње сатне концентрације PM у амбијенталном ваздуху измерене на локацији АМС ГП Бор у негрејној сезони: а) PM_{10}, б) $PM_{2.5}$ (прилагођено према [1])*

4.2.6. Резултати валидације у Нишу

Преглед основне статистике резултата мерења у Нишу (средња масена концентрација *PM,* стандардна девијација (*SD*), коефицијент варијације (*CV*), тачност, средња грешка пристрасности (*MBE*), корен средње квадратне грешке (*RMSE*) и међумониторска варијабилност (*IMV*)) дат је у табели 4.3.

Резултати добијени у Нишу потврђују применљивост *PM-MoN* система у условима урбаног загађења, где доминантни утицај имају саобраћај и индивидуална ложишта током грејне сезоне. Посебно је значајно што су у унутрашњем ваздуху добијене високе вредности слагања између тестираних уређаја и референтних инструмената, што подржава основну намену система као платформе за мониторинг квалитета унутрашњег ваздуха.

На основу резултата приказаних у табели 4.3, може да се закључи да су највише средње вредности концентрација *PM*, као и *SD* и *RMSE*, добијене за фракције PM_{10} и $PM_{2.5}$ у спољашњем ваздуху током грејне сезоне. Треба да се напомене да су средње вредности концентрација *PM* измерене у Нишу биле високе, више од националних граничних вредности за средње дневне концентрације PM_{10} (50 µg/m^3) и $PM_{2.5}$ (25 µg/m^3) дефинисаних за спољашњи ваздух у складу са важећом националном регулативом Републике Србије [19].

Вредности *CV* биле су уједначене током грејне сезоне (у просеку 0,98), док су у негрејној сезони варирале од 0,36 до 2,37 (за фракцију PM_{10}, уређај *P2*). Тачност уређаја била је преко 90 % осим у случају уређаја *P3* за фракцију PM_{10} током кампање мерења у спољашњем ваздуху у негрејној сезони.

Вредности *MBE* су варирале у опсегу од - 9,2 % до 15,4 % (уређај *P2*). Ове вредности су биле конзистентније у случају мерења $PM_{2.5}$ концентрација у унутрашњем ваздуху, али су резултати свих тестираних уређаја у овом случају били нижи у односу на резултате референтних уређаја.

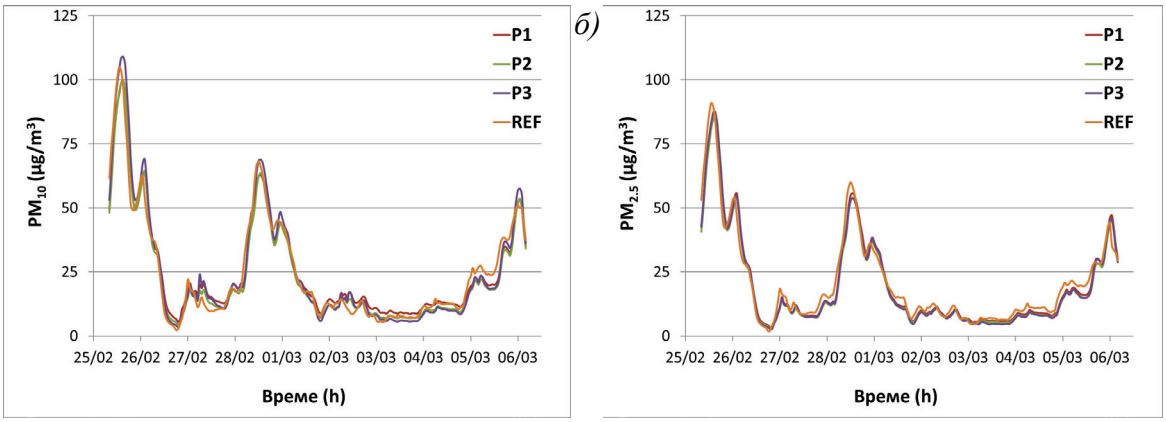
Табела 4.3. *Основна статистика резултата кампање мерења у Нишу (масене концентрације PM, SD, CV, тачност, MBE, RMSE и IMV)*

КАМПАЊЕ НИШ	**Уређај**	**Средња вредност [μg/m³]**	***SD* [μg/m³]**	***CV***	**Тачност [%]**	***MBE* [%]**	***RMSE* [μg/m³]**	***IMV* [%]**
PM10	***P1***	19,89	45,99	2,31	90,29	3,80	13,73	
ФЗНР НИШ	***P2***	18,50	43,89	2,37	97,94	-2,03	12,18	9,31
НС унутра	***P3***	19,08	45,23	2,37	94,74	-3,66	12,66	
PM2.5	***P1***	15,65	25,71	1,64	92,84	6,14	6,74	
ФЗНР НИШ	***P2***	14,58	23,98	1,64	99,86	0,97	5,97	7,09
НС унутра	***P3***	15,31	27,20	1,78	95,17	-0,92	7,86	
PM10	***P1***	13,54	5,52	0,41	98,96	2,69	3,37	
ИЗЈЗ НИШ	***P2***	14,61	5,24	0,36	91,00	12,54	3,49	10,58
НС споља	***P3***	14,90	6,13	0,41	88,86	14,11	4,26	
PM2.5	***P1***	10,70	4,37	0,41	91,97	14,67	2,55	
ИЗЈЗ НИШ	***P2***	10,82	4,64	0,43	90,67	15,42	2,43	8,83
НС споља	***P3***	10,40	5,04	0,48	94,93	8,21	2,53	
PM10	***P1***	33,30	29,92	0,90	97,85	8,90	6,71	
ФЗНР НИШ	***P2***	31,72	30,09	0,95	97,11	-1,62	6,70	7,33
ГС унутра	***P3***	34,14	33,80	0,99	95,28	1,56	8,68	
PM2.5	***P1***	26,80	25,97	0,98	98,34	-4,35	5,43	
ФЗНР НИШ	***P2***	25,82	25,70	1,00	94,75	-9,25	5,70	5,38
ГС унутра	***P3***	26,43	26,54	1,00	96,97	-8,63	5,89	
PM10	***P1***	54,74	54,85	1,00	98,98	-3,49	24,66	
ИЗЈЗ НИШ	***P2***	56,68	55,40	0,98	97,51	0,68	25,28	7,74
ГС споља	***P3***	59,11	56,36	0,95	93,12	5,19	26,91	
PM2.5	***P1***	54,47	55,23	1,01	99,39	-2,31	24,24	
ИЗЈЗ НИШ	***P2***	52,14	52,16	1,00	96,30	-6,09	22,46	6,04
ГС споља	***P3***	51,27	48,86	0,95	94,69	-6,36	21,36	

Напомена: подаци су преузети из [1] и прилагођени за потребе приказа у дисертацији.

Ради илустрације, на слици 4.8 приказане су концентрације *PM* у унутрашњем ваздуху у Нишу у грејној сезони.

а) *б)*



Слика 4.8. *Средње сатне вредности концентрација PM у унутрашњем ваздуху измерене у лабораторији ФЗНР у Нишу током грејне сезоне: а) PM_{10}, б) $PM_{2.5}$ (прилагођено према [1])*

4.2.7. Упоредна анализа и оцена применљивости PM-MoN система

Упоређивањем резултата кампање мерења у Бору (табела 4.2) и кампање мерења у Нишу (табела 4.3) може да се закључи да сви тестирани уређаји показују врло сличне средње вредности концентрација *PM,* као и *SD*, *CV* и *RMSE*.

Вредности међумониторске варијабилности *(IMV)* у кампањама у Бору биле су у опсегу од 5,7 до 11,3 са једним изузетком од 20,7 ($PM_{2.5}$ у спољашњем ваздуху у негрејној сезони), док су у Нишу вредности *IMV* биле у опсегу од 5,4 до 10,6.

Тачност, односно степен блискости између измерених вредности добијених тестираним уређајима и референтним уређајима, у кампањама у Бору била је у опсегу од 81,15 % до 99,74 %, док је у кампањама у Нишу била у опсегу од 88,86 % до 99,86 %. Вредности *IMV* и тачности добијене у овом истраживању су упоредиве са резултатима истраживања приказаним у [13].

- **Коефицијент детерминације R^2**

У табели 4.4 приказани су коефицијенти детерминације (R^2) добијени упоређивањем масених концентрација *PM* између појединачних уређаја *PM-MoN* (*P1, P2, P3*), као и између сваког од њих и референтних инструмената. Ови резултати обухватају целокупни период мерења.

Табела 4.4. *Вредности коефицијента детерминације (R^2)*

КАМПАЊЕ БОР	Уређај	Коефицијент детерминације R^2				КАМПАЊЕ НИШ	Уређај	Коефицијент детерминације R^2			
		P1	*P2*	*P3*	*REF*			*P1*	*P2*	*P3*	*REF*
PM_{10} ИРМ БОР НС унутра	*P1*	1	0,975	0,953	0,920	PM_{10} ФЗНР НИШ НС унутра	*P1*	1	0,992	0,988	0,952
	P2	0,975	1	0,967	0,948		*P2*	0,992	1	0,996	0,949
	P3	0,953	0,967	1	0,970		*P3*	0,988	0,996	1	0,958
$PM_{2.5}$ ИРМ БОР НС унутра	*P1*	1	0,984	0,930	0,928	$PM_{2.5}$ ФЗНР НИШ НС унутра	*P1*	1	0,991	0,984	0,952
	P2	0,984	1	0,955	0,958		*P2*	0,991	1	0,992	0,944
	P3	0,930	0,955	1	0,973		*P3*	0,984	0,992	1	0,951
PM_{10} ГП БОР НС споља	*P1*	1	0,953	0,721	0,599	PM_{10} ИЗЈЗ НИШ НС споља	*P1*	1	0,977	0,937	0,645
	P2	0,953	1	0,704	0,628		*P2*	0,977	1	0,928	0,644
	P3	0,721	0,704	1	0,624		*P3*	0,937	0,928	1	0,581
$PM_{2.5}$ ГП БОР НС споља	*P1*	1	0,942	0,733	0,807	$PM_{2.5}$ ИЗЈЗ НИШ НС споља	*P1*	1	0,959	0,916	0,734
	P2	0,942	1	0,714	0,833		*P2*	0,959	1	0,932	0,777
	P3	0,733	0,714	1	0,765		*P3*	0,916	0,932	1	0,760
PM_{10} ИРМ БОР ГС унутра	*P1*	1	0,965	0,972	0,940	PM_{10} ФЗНР НИШ ГС унутра	*P1*	1	0,998	0,998	0,950
	P2	0,965	1	0,981	0,948		*P2*	0,998	1	0,998	0,952
	P3	0,972	0,981	1	0,975		*P3*	0,998	0,998	1	0,952
$PM_{2.5}$ ИРМ БОР ГС унутра	*P1*	1	0,990	0,980	0,935	$PM_{2.5}$ ФЗНР НИШ ГС унутра	*P1*	1	0,997	0,998	0,958
	P2	0,990	1	0,976	0,951		*P2*	0,997	1	0,998	0,955
	P3	0,980	0,976	1	0,973		*P3*	0,998	0,998	1	0,952
PM_{10} ГП БОР ГС споља	*P1*	1	0,923	0,869	0,516	PM_{10} ИЗЈЗ НИШ ГС споља	*P1*	1	0,996	0,987	0,805
	P2	0,923	1	0,935	0,597		*P2*	0,996	1	0,990	0,801
	P3	0,869	0,935	1	0,630		*P3*	0,987	0,990	1	0,786
$PM_{2.5}$ ГП БОР ГС споља	*P1*	1	0,973	0,899	0,660	$PM_{2.5}$ ИЗЈЗ НИШ ГС споља	*P1*	1	0,997	0,986	0,818
	P2	0,973	1	0,909	0,726		*P2*	0,997	1	0,986	0,819
	P3	0,899	0,909	1	0,548		*P3*	0,986	0,986	1	0,812

Напомена: подаци су преузети из [1] и прилагођени за потребе приказа у дисертацији.

Анализом података датих у табели 4.4 уочава се да су вредности R^2 углавном веће за унутрашњи ваздух, због слабијег утицаја метеоролошких параметара (посебно температуре и релативне влажности) на очитавања тестираних уређаја.

Као што је и уочено при тестирању основних карактеристика уређаја, најниже вредности R^2 одређене су за резултате мерења концентрација *PM* на отвореном. Најниже вредности R^2 између тестираних уређаја и референтног инструмента (*REF*) биле су 0,516 (између *P3* и *REF*) у Бору и 0,581 (између *P3* и *REF*) у Нишу. Најниже вредности R^2 добијене упоређивањем резултата између самих *PM-MoN* уређаја износиле су 0,704 (између *P2* и *P3* уређаја) у Бору и 0,916 (између *P1* и *P3* уређаја) у Нишу.

Највише вредности R^2 између самих *PM* уређаја биле су 0,990 (између *P1* и *P2*) у Бору и 0,998 (између више уређаја) у Нишу, а добијене су упоређивањем резултата мерења у унутрашњем ваздуху. С друге стране, максималне вредности коефицијента детерминације у односу на референтни инструмент (*REF*) забележене су за уређај *P3*, и износиле су 0,975 у Бору, односно 0,958 у Нишу, што додатно потврђује високу поузданост *PM-MoN* система у затвореном простору.

Ниже вредности R^2 у теренским условима указују на значајан утицај фактора као што су релативна влажност, температура, хемијски састав честица и динамика извора емисије. Ови резултати су у потпуности у складу са налазима других аутора, где је показано да оптички сензори имају ограничења у условима високе влажности и варијабилног састава аеросола [15], [16]. Такође, резултати овог истраживања конзистентни су са резултатима спроведених истраживања у спољашњем ваздуху у Пољској [20] и Норвешкој [13].

- **Прецизност *PM* монитора (*AP*)**

У табели 4.5 приказани су резултати прецизности тестираних монитора за све кампање мерења. У току целог периода мерења, прецизност тестираних монитора *P1* и *P2* била је ≤ 0,1, са једним изузетком ($PM_{2.5}$ споља на локацији *ГП Бор* за време грејне сезоне). Монитор *P3* је показао варијабилну прецизност са *P1* и *P2* мониторима у распону од 0,04 до 0,27, са најнижим вредностима забележеним за фракцију $PM_{2.5}$ у унутрашњем ваздуху, али без конзистентности потребне за референтне инструменте (референтни инструменти за амбијентални ваздух имају прецизност мању од 0,1 [12]).

- **Запажања након валидације резултата**

Рад свих тестираних *PM-MoN* монитора био је стабилан и поуздан током целог периода мерења, без прекида и без губитка података. У периоду од 2020. до 2023. године испитано је више од двадесет *NOVA SDS011 PM* сензора и имплементирано у различите типове *PM-MoN* уређаја за мерење концентрација *PM*.

У неким истраживањима се наводи да сензор *NOVA SDS011* није довољно прецизан за мерења PM_{10} [21], [22]. Нека друга истраживања наводе да сензор *NOVA SDS011* има довољну тачност за индикативна мерења концентрација $PM_{2.5}$ [13], [20].

Ово истраживање је показало да тестирани *PM* монитори могу да буду довољно тачни за квантитативно одређивање концентрација *PM* у унутрашњем ваздуху, за

специфичан температурни распон од 10 °C до 30 °C и распон релативне влажности од 10 % до 70 %, уз одговарајућу корекцију резултата упоређивањем са резултатима добијеним референтним инструментима [1].

Упоредна анализа кампања у Бору и Нишу показује да *PM-MoN* систем задржава стабилне перформансе у различитим урбаним и индустријским контекстима. Иако су вредности R^2, *RMSE* и *MBE* варирале у зависности од сезоне, локације и типа средине, резултати указују на добру репродуктивност мерења, нарочито у унутрашњем ваздуху. То потврђује да је систем погодан за индикативни и оперативни мониторинг концентрација суспендованих честица у затвореним просторима.

Табела 4.5. *Прецизност PM монитора*

КАМПАЊЕ БОР	**Уређај**	**Прецизност (*AP*)**			**КАМПАЊЕ НИШ**	**Уређај**	**Прецизност (*AP*)**		
		P1	***P2***	***P3***			***P1***	***P2***	***P3***
PM_{10} – ИРМ БОР **НС унутра**	***P1***	0	0,08	0,18	***PM_{10} – ФЗНР НИШ*** **НС унутра**	***P1***	0	0,09	0,16
	P2	0,08	0	0,15		***P2***	0,09	0	0,09
	P3	0,18	0,15	0		***P3***	0,16	0,09	0
$PM_{2.5}$ – ИРМ БОР **НС унутра**	***P1***	0	0,05	0,15	***$PM_{2.5}$ – ФЗНР НИШ*** **НС унутра**	***P1***	0	0,08	0,09
	P2	0,05	0	0,12		***P2***	0,08	0	0,08
	P3	0,15	0,12	0		***P3***	0,09	0,08	0
PM_{10} – ГП БОР **НС споља**	***P1***	0	0,07	0,26	***PM_{10} – ИЗЈЗ НИШ*** **НС споља**	***P1***	0	0,10	0,12
	P2	0,07	0	0,27		***P2***	0,10	0	0,09
	P3	0,26	0,27	0		***P3***	0,12	0,09	0
$PM_{2.5}$ – ГП БОР **НС споља**	***P1***	0	0,10	0,18	***$PM_{2.5}$ – ИЗЈЗ НИШ*** **НС споља**	***P1***	0	0,04	0,12
	P2	0,10	0	0,22		***P2***	0,04	0	0,12
	P3	0,18	0,22	0		***P3***	0,12	0,12	0
PM_{10} – ИРМ БОР **ГС унутра**	***P1***	0	0,07	0,16	***PM_{10} – ФЗНР НИШ*** **ГС унутра**	***P1***	0	0,10	0,12
	P2	0,07	0	0,17		***P2***	0,10	0	0,08
	P3	0,16	0,17	0		***P3***	0,12	0,08	0
$PM_{2.5}$ – ИРМ БОР **ГС унутра**	***P1***	0	0,06	0,14	***$PM_{2.5}$ – ФЗНР НИШ*** **ГС унутра**	***P1***	0	0,06	0,06
	P2	0,06	0	0,10		***P2***	0,06	0	0,04
	P3	0,14	0,10	0		***P3***	0,06	0,04	0
PM_{10} – ГП БОР **ГС споља**	***P1***	0	0,10	0,15	***PM_{10} – ИЗЈЗ НИШ*** **ГС споља**	***P1***	0	0,05	0,10
	P2	0,10	0	0,09		***P2***	0,05	0	0,06
	P3	0,15	0,09			***P3***	0,10	0,06	0
$PM_{2.5}$ – ГП БОР **ГС споља**	***P1***	0	0,11	0,15	***$PM_{2.5}$ – ИЗЈЗ НИШ*** **ГС споља**	***P1***	0	0,05	0,11
	P2	0,11	0	0,13		***P2***	0,05	0	0,11
	P3	0,15	0,13	0		***P3***	0,11	0,11	0

Напомена: подаци су преузети из [1] и прилагођени за потребе приказа у дисертацији.

4.3. Утицај температуре и релативне влажности на резултате мерења

Перформансе оптичких *low-cost PM* сензора значајно зависе од услова средине, пре свега релативне влажности и температуре ваздуха. Утицај релативне влажности посебно је изражен код аеросола са хигроскопним својствима, јер при повишеним вредностима *RH* долази до раста пречника честица услед апсорпције водене паре. Повећање ефективног пречника честица доводи до интензивнијег расејања светлости у мерној комори сензора, што може да резултира прецењивањем масених концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$.

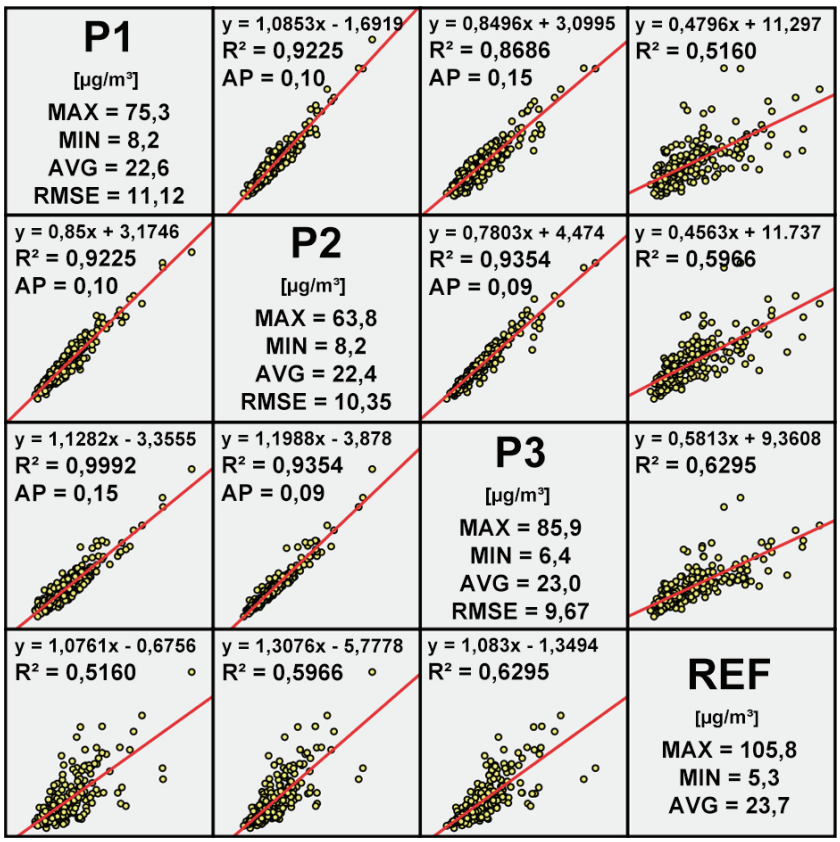
Температура ваздуха може да утиче на резултате мерења директно, преко стабилности електронских компоненти и рада сензора, али и индиректно, кроз повезаност са релативном влажношћу, кондензационим условима и динамиком формирања секундарних аеросола. Због тога *RH* и *T* не могу да се посматрају као споредни параметри, већ као важни фактори несигурности у примени оптичких *low-cost PM* сензора.

У току кампања мерења, проценат средњих сатних вредности са релативном влажношћу ваздуха изнад 80 % износио је 27 % у грејној сезони и 11 % у негрејној сезони у Бору и 21 % у грејној сезони и 0 % у негрејној сезони у Нишу.

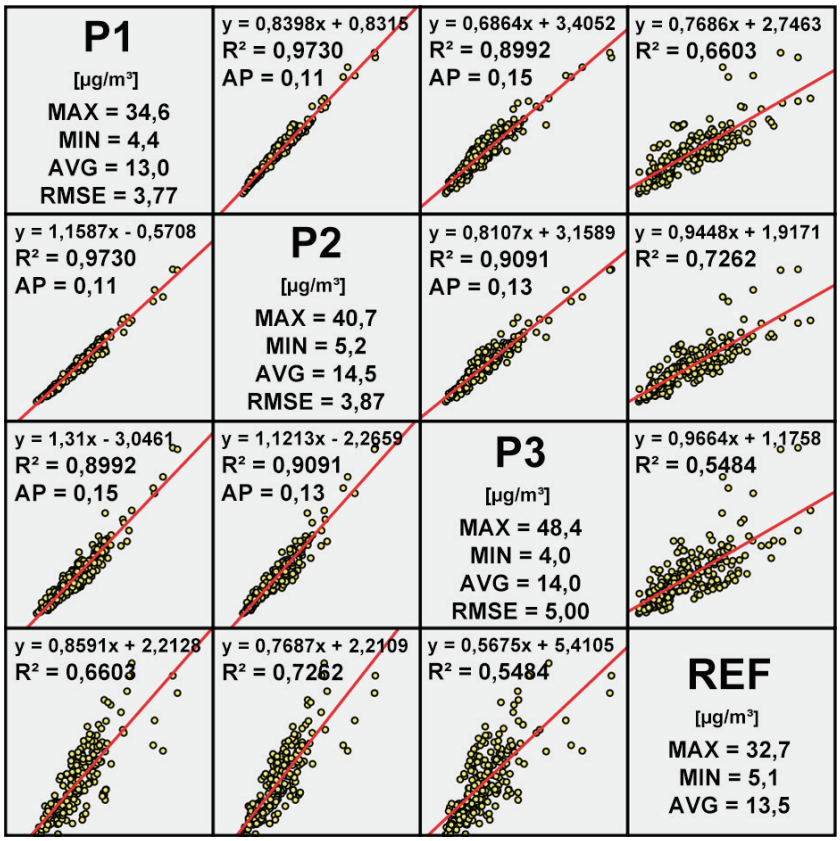
Средње вредности температуре и релативне влажности ваздуха током кампање мерења у спољашњем ваздуху у Бору износиле су 7,6 °C и 66,3 % у грејној сезони и 24,6 °C и 58,1 % у негрејној сезони. Средње вредности поменутих параметара током кампање мерења у спољашњем ваздуху у Нишу биле су 9,1 °C и 69,6 % у грејној сезони и 21,4 °C и 51,6 % у негрејној сезони.

Ради илустрације утицаја спољашњег окружења на резултате мерења концентрација *PM*, на слици 4.9 приказани су дијаграми расејања концентрација *PM* измерених у спољашњем ваздуху у Бору током грејне сезоне. На слици 4.9а приказане су вредности R^2 за фракцију $PM_{10.}$ Приказане вредности су ниже у поређењу са вредностима R^2 на слици 4.9б, које се односе на фракцију $PM_{2.5}$. Овакви резултати приписују се утицају *RH* на очитавања тестираних *PM* монитора. Такође, слика 4.10 приказује дијаграме расејања концентрација *PM* у унутрашњем ваздуху у Нишу током грејне сезоне. На слици 4.10а приказане су вредности R^2 за фракцију PM_{10}, док су вредности R^2 за фракцију $PM_{2.5}$ приказане на слици 4.10б. Вредности R^2 приказане на слици 4.10 јасно показују изузетно поклапање резултата мерења за обе фракције (PM_{10} и $PM_{2.5}$) у унутрашњем ваздуху, као и изузетну прецизност (*AP*).

а)

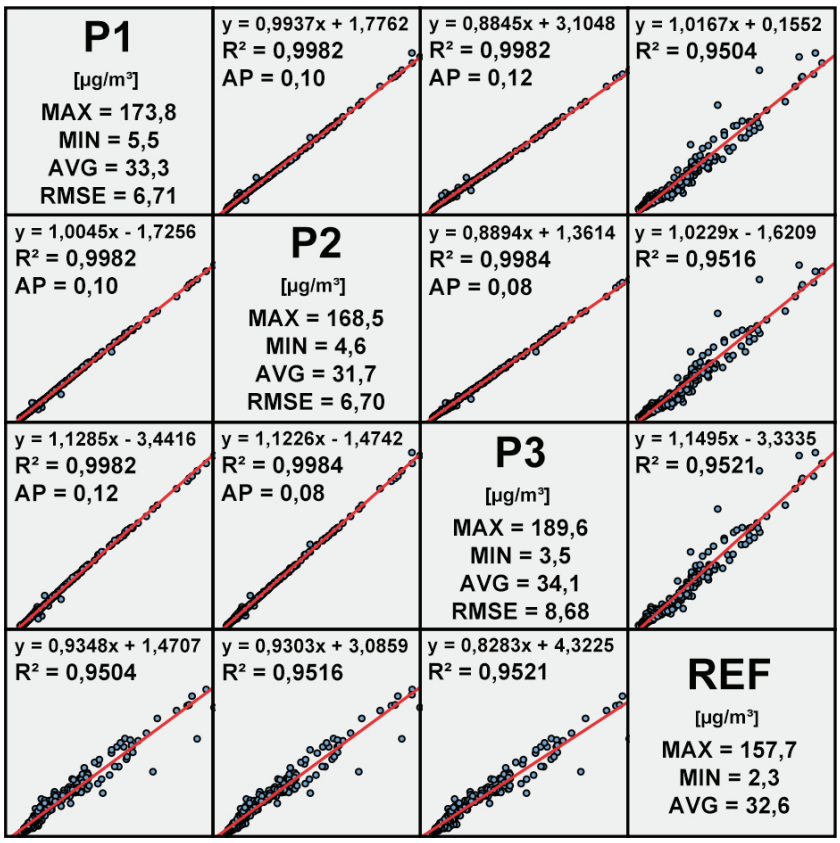


б)

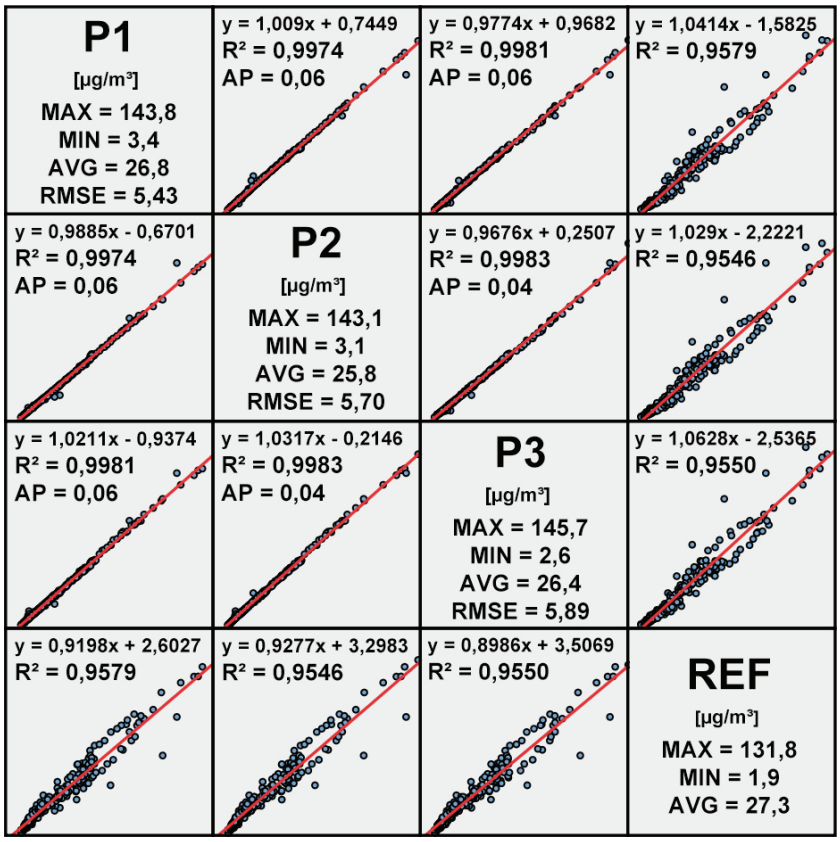


Слика 4.9. *Дијаграми расејања средњих сатних концентрација PM у спољашњем ваздуху на локацији ГП Бор током грејне сезоне: а) PM_{10}; б) $PM_{2.5}$ (прилагођено према [1])*

а)



б)



Слика 4.10. *Дијаграми расејања средњих сатних концентрација PM у унутрашњем ваздуху на локацији ФЗНР Ниш током грејне сезоне: а) PM_{10}; б) $PM_{2.5}$ (прилагођено према [1])*

У оквиру спроведених кампања мерења, утицај *RH* и *T* био је израженији у спољашњем ваздуху него у унутрашњим просторима. То је очекивано, јер су унутрашњи услови били стабилнији, са мањим осцилацијама релативне влажности и температуре.

Међутим, резултати теренских мерења показују да у условима повишене *RH* долази до слабијег слагања између *PM-MoN* уређаја и референтних инструмената, што је посебно уочљиво код мерења у амбијенталном ваздуху.

Овај налаз има двоструки значај. Са једне стране, потврђује да је *PM-MoN* погоднији за примену у унутрашњем ваздуху, где су микроклиматски услови стабилнији и утицај *RH* мање изражен. Са друге стране, указује да је за примену у условима повећане влажности неопходно да се уведу проширени корекциони модели који поред сензорског очитавања укључују и релативну влажност и температуру.

Основни проширени модел корекције може да се представи у облику:

$$C_{kor} = a \cdot C_{senzor} + b \cdot RH + c \cdot T + d \tag{4.9}$$

где је C_{kor} коригована концентрација, C_{senzor} некориговано очитавање *PM-MoN* сензора, *RH* релативна влажност, *T* температура ваздуха, док су *a*, *b*, *c* и *d* параметри модела добијени регресионом анализом.

Уколико се покаже да је утицај *RH* нелинеаран, модел може додатно да се прошири укључивањем квадратних и/или интеракционих чланова, на пример:

$$C_{kor} = a \cdot C_{senzor} + b \cdot RH + c \cdot T + d \cdot RH^2 + e \cdot C_{senzor} \cdot RH + f \tag{4.10}$$

Овакви модели омогућавају боље описивање ситуација у којима релативна влажност не делује линеарно на сензорски сигнал, што је чест случај код оптичких *PM* сензора.

Анализа утицаја релативне влажности и температуре показује да једноставни корекциони фактори могу да буду практични за основну примену *PM-MoN* система у унутрашњем ваздуху, али да у условима повећане микроклиматске варијабилности треба да се примене проширени модели корекције. Овај закључак представља основу за примену напреднијих приступа, укључујући моделе машинског учења, који могу да обухвате нелинеарне односе између сензорских очитавања, *RH, T* и референтних концентрација *PM*.

4.4. Примена машинског учења за корекцију сензорских мерења

Полазећи од резултата приказаних у претходној целини, који су показали да релативна влажност, температура, сезонске промене и састав аеросола могу значајно да утичу на одзив оптичких *PM* сензора, у овој целини разматра се примена статистичких модела и модела машинског учења за корекцију мерења *PM-MoN* система. За разлику од једноставних корекционих фактора, ови модели омогућавају укључивање више улазних променљивих и описивање сложенијих односа између сензорског сигнала, микроклиматских параметара и референтних концентрација.

Једноставни корекциони фактори, приказани у претходним деловима поглавља, представљају практичан и лако применљив приступ за смањење систематског одступања, али њихово ограничење огледа се у томе што не могу адекватно да опишу нелинеарне ефекте настале услед промена релативне влажности, температуре, сезоне и састава аеросола. Због тога су у даљој анализи разматрани универијантни, мултиваријантни и нелинеарни модели корекције. У том контексту, машинско учење не посматра се као замена за класичну калибрацију, већ као њена аналитичка надоградња, чији је циљ да смањи грешку мерења, побољша слагање са референтним инструментима и повећа робусност *PM-MoN* система у реалним условима мониторинга.

Посебно је важно да се нагласи да је део резултата колокационих мерења *PM-MoN* система, у амбијенталном ваздуху у Бору, коришћен у објављеним радовима [23], [24]. У првом раду [23] на резултате мерења три монитора *PM-MoN*, за обе фракције суспендованих честица, PM_{10} и $PM_{2.5}$, примењени су *ULR*, *MLR* и *Random Forest* (*RF*) модели. У другом раду [24] на резултате мерења једног *PM-MoN* монитора, за фракцију $PM_{2.5}$, примењени су *ULR*, *MLR* и *XGBoost* модели.

За корекцију резултата мерења примењена су четири модела:

- Универијантна линеарна регресија (енгл. *univariate linear regression – ULR*) представља модел у којем се референтна концентрација процењује само на основу некоригованог сензорског очитавања [25];
- Мултиваријантна линеарна регресија (енгл. *multivariate linear regression – MLR*) је модел у којем се, поред сензорског очитавања, укључују и метеоролошки, односно микроклиматски параметри, као што су релативна влажност и температура [4], [25];

- *Random Forest* (*RF*) је модел који припада групи нелинеарних алгоритама машинског учења и омогућава моделирање сложенијих, нелинеарних односа између улазних променљивих и референтне концентрације [26], [27];
- *XGBoost* је модел који припада групи ансамбл метода заснованих на стаблима одлучивања и градијентном појачавању. За разлику од *RF* модела, код кога се велики број стабала формира паралелно и независно, *XGBoost* се развија секвенцијално, тако што се свако наредно стабло обучава да умањи грешку претходних предикција. На тај начин модел постепено побољшава способност предвиђања, може ефикасно да препозна сложене интеракције између променљивих и, захваљујући регуларизацији и контроли сложености, показује добру способност генерализације и смањен ризик од прекомерног прилагођавања [28], [29].

Перформансе свих модела процењене су применом прилагођеног коефицијента детерминације (енгл. *adjusted R-squared – adjR*^{2}) и нормализованог корена средње квадратне грешке (енгл. *normalized root mean squared error – NRMSE*), посебно за тренинг и тест скупове података. Веће вредности *adjR*^{2} и ниже вредности *NRMSE* указују на боље слагање са референтним мерењима, док мале разлике између резултата добијених на тренинг и тест скуповима указују на добру генерализацију модела и низак ризик од *overfitting*-а.

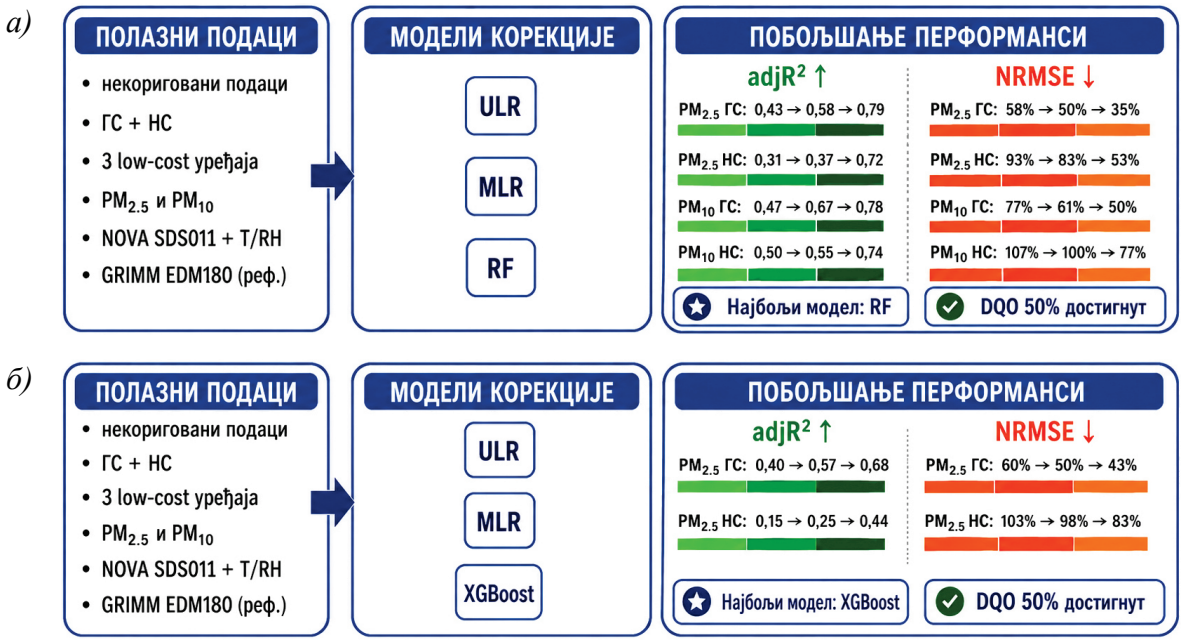
Као што је већ напоменуто, за развој корекционих модела коришћени су подаци добијени током колокационих мерења *PM-MoN* уређаја са референтним инструментом *GRIMM EDM180* у амбијенталном ваздуху у Бору. Формирани су скупови података $\{PM_{2.5,lc,ref}, PM_{10,lc,ref}, RH_{lc,ref}, T_{lc,ref}\} \in S_1, S_2$ који одговарају грејној и негрејној сезони, при чему је сваки ред представљао временски синхронизовано мерење, а колоне су садржале концентрације *PM* добијене *low-cost* сензорима и референтним инструментом, као и одговарајуће метеоролошке параметре. Улазне променљиве модела обухватале су некориговане вредности PM_{10} и $PM_{2.5}$ добијене *NOVA SDS011* сензором, температуру ваздуха (*T*), релативну влажност ваздуха (*RH*), као и апсолутну влажност (*AH*). С обзиром на постојање високе корелације између температуре и релативне влажности, апсолутна влажност је уведена као алтернативни параметар, чиме је избегнут проблем мултиколинеарности, а истовремено је очувана информација о садржају водене паре у ваздуху.

Пре развоја модела извршено је претпроцесирање података. Анализирани су скупови података током грејне и негрејне сезоне, при чему су временске серије синхронизоване на једночасовну временску резолуцију. Пошто је проценат узорака са недостајућим вредностима био мали, примењено је *listwise уклањање узорака* (енгл. *listwise deletion).* Анализа временских серија показала је да су *low-cost* сензори *NOVA SDS011* и *AM2302/DHT22* интегрисани у платформе били стабилни, поуздани и без очигледних грешака [23], [24]. Уочено је и да су пикови у временским серијама PM_{10} и $PM_{2.5}$ били временски усклађени са мерењима референтног инструмента, што указује да се не ради искључиво о грешкама мерења, већ и о реалним епизодама повишеног загађења. Из тог разлога моделовање је извршено без уклањања *outlier*-а, како би се избегло увођење пристрасности и губитак информација о екстремним епизодама загађења.

Анализа утицаја температуре и релативне влажности показала је да се апсолутна грешка мерења *PM* сензора значајно мења са променом микроклиматских услова. Код нижих температура апсолутна грешка је расла са порастом температуре, док је код виших температура долазило до делимичне стабилизације сигнала за $PM_{2.5}$. Са друге стране, уочено је да при релативној влажности већој од 80 % поново долази до повећања грешке мерења. Ова појава повезује се са хигроскопским растом честица, променом ефикасности расејања светлости и ограничењима оптичких *low-cost* сензора [13], [20], [30].

За развој и евалуацију модела подаци су подељени на тренинг и тест скуп у односу 80:20. Додатно, ради повећања количине података и смањења ризика од *overfitting*-а, примењена је техника проширења скупа података (енгл. *data augmentation*), заснована на линеарној интерполацији временских серија. Перформансе модела процењиване су применом параметара $adjR^2$ и *NRMSE*, а посебна пажња посвећена је разликама између резултата добијених на тренинг и тест скуповима. У радовима је утврђено да су те разлике мале, односно на нивоу неколико процентних поена, што указује на добру способност генерализације модела [23], [24].

Сажет приказ примењених модела и оствареног побољшања перформанси приказан је на слици 4.11.



Слика 4.11. *Упоредни приказ корекције мерења low-cost PM сензора применом линеарних и ансамбл модела: а) ULR, MLR и RF модели за PM_{10} и $PM_{2.5}$; б) ULR, MLR и XGBoost модели за $PM_{2.5}$ (на основу података из [23], [24])*

- **Примена *ULR* модела**

ULR модел представљао је полазни ниво и омогућио је процену основне линеарне везе између *PM-MoN* система и референтног инструмента. У раду [23], у коме су анализирана три уређаја и обе *PM* фракције, *ULR* модел није значајно повећао вредности $adjR^2$ у односу на необрађене податке, али је довео до смањења *NRMSE* вредности. За фракцију $PM_{2.5}$, просечна вредност *NRMSE* смањена је за 44 % током грејне сезоне и 58 % током негрејне сезоне, док је за PM_{10} смањење износило 16 % током грејне и 36 % током негрејне сезоне. Просечне вредности $adjR^2$ за $PM_{2.5}$ износиле су 0,43 током грејне и 0,31 током негрејне сезоне, док су за PM_{10} износиле 0,47 и 0,50. Истовремено, *NRMSE* вредности су и након *ULR* корекције остале релативно високе: 58 % и 93 % интерквартилног опсега референтних $PM_{2.5}$ мерења, односно 77 % и 107 % интерквартилног опсега референтних PM_{10} мерења [23].

Слична тенденција потврђена је и у раду [24], у коме су моделирани резултати мерења једног уређаја, и то само за фракцију $PM_{2.5}$. У случају примене *ULR* модела вредности $adjR^2$ износиле су 0,40 током грејног периода и 0,15 током негрејног периода, док су *NRMSE* вредности износиле 60 % и 103 % интерквартилног опсега референтних мерења. Ови резултати показују да *ULR* модел може да обезбеди основну корекцију сензорских мерења, али да његове перформансе значајно зависе од *PM* фракције и сезонских услова, те да он има значај пре свега као почетни ниво корекције [24].

- **Примена *MLR* модела**

Мултиваријантна линеарна регресија представља кључни линеарни приступ примењен за калибрацију *low-cost* сензора интегрисаних у *PM-MoN* уређаје. За разлику од *ULR* модела, *MLR* омогућава истовремено укључивање већег броја предикторских варијабли и на тај начин боље описује сложене услове мерења у реалном амбијенту. Увођење температуре и влажности, односно апсолутне влажности, као додатних предиктора, довело је до побољшања перформанси у односу на једноставније регресионе моделе.

У раду [23], најбоље резултате међу линеарним моделима дали су *MLR* модели који су као предикторе укључивали резултате мерења *PM*, температуру и апсолутну влажност. За фракцију $PM_{2.5}$, просечна вредност $adjR^2$ повећана је са 0,43 (*ULR* модел) на 0,58 током грејне сезоне, док је током негрејне сезоне повећана са 0,31 (*ULR* модел) на 0,37. Код фракције PM_{10} побољшање је било израженије: $adjR^2$ је повећан са 0,47 (*ULR* модел) на 0,67 током грејне сезоне и са 0,50 (*ULR* модел) на 0,55 током негрејне сезоне. Истовремено, *NRMSE* вредност за фракцију $PM_{2.5}$ је смањена са 58 % (*ULR* модел) на 50 % током грејне сезоне и са 93 % (*ULR* модел) на 88 % током негрејне сезоне. За фракцију PM_{10} *NRMSE* вредност смањена је са 77 % (*ULR* модел) на 61 % у грејној сезони и са 107 % (*ULR* модел) на 101 % у негрејној сезони. Ови резултати потврђују да укључивање метеоролошких параметара доприноси бољем описивању одступања SDS011 сензора од референтних мерења.

У раду [24], применом *MLR* модела вредност $adjR^2$ повећана је са 0,40 (*ULR* модел) на 0,57 током грејног периода и са 0,15 (*ULR* модел) на 0,25 током негрејног периода. Вредност *NRMSE* је смањена са 60 % (*ULR* модел) на 50 % током грејног периода и са 103 % (*ULR* модел) на 96 % током негрејног периода. На тај начин показано је да примена *MLR* има предност у односу на *ULR* у корекцији резултата мерења, посебно у променљивим атмосферским условима.

- **Примена RF модела**

Најбоље корекције резултата мерења постигнуте су применом *Random Forest* модела [23]. Применом *RF* модела вредност $adjR^2$ за фракцију $PM_{2.5}$ је повећана са 58 % (*MLR* модел) на 79 % у грејној сезони и са 37 % (*MLR* модел) на 72 % у негрејној сезони, док је код фракције PM_{10} повећање износило са 67 % (*MLR* модел) на 78 % у грејној и са 55 % (*MLR* модел) на 74 % у негрејној сезони [23].

Бољи резултати *RF* модела у односу на *MLR* јасно се уочавају и преко *NRMSE* вредности. За фракцију $PM_{2.5}$, вредност *NRMSE* је смањена са 50 % (*MLR* модел) на 35 % током грејне сезоне и са 88 % (*MLR* модел) на 59 % током негрејне сезоне. За фракцију PM_{10}, вредност *NRMSE* је смањена са 61 % (*MLR* модел) на 50 % у грејној сезони и са 101 % (*MLR* модел) на 77 % у негрејној сезони [23]. На тај начин примена *RF* модел није само повећала проценат објашњења варијансе, већ је истовремено значајно смањила грешку предикције за обе *PM* фракције.

Посебно је важно што примена *RF* модела показује стабилније перформансе у различитим сезонским условима. Док су код *ULR* и *MLR* модела разлике резултата моделирања у грејној и негрејној сезони биле израженије, применом *RF* модела задржане су високе вредности $adjR^2$ и ниже *NRMSE* вредности у обе сезоне, што указује на већу робусност овог приступа у условима промењивог састава аеросола, различитих концентрационих нивоа, температуре и влажности. Применом *RF* модела резултати мерења *PM-MoN* уређаја достижу циљ квалитета података (енгл. *data quality objective – DQO*) од 50 %, што потврђује важност примене овог модела у пракси [23].

- **Примена XGBoost модела**

У раду [24] примењен је *XGBoost* алгоритам за корекцију резултата мерења једног *PM-MoN* уређаја, при чему су кориговани резултати мерења само за фракцију $PM_{2.5}$.

Применом *XGBoost* модела вредност $adjR^2$ за фракцију $PM_{2.5}$ је повећана са 57 % (*MLR* модел) 68 % током грејног периода, док је током негрејног периода повећана са 25 % (*MLR* модел) на 44 %. Ово показује да је *XGBoost*, као нелинеарни ансамбл модел, боље описао односе између резултата мерења $PM_{2.5}$, температуре и релативне влажности ваздуха.

Побољшање је потврђено и кроз смањење *NRMSE* вредности. Вредност *NRMSE* је смањена са 50 % (*MLR* модел) на 43 % током грејног периода и са 96 % (*MLR* модел) на 83 % током негрејног периода. Иако су резултати *XGBoost* модела били лошији током негрејног периода (у односу на оне у грејној сезони), они су и даље били бољи од резултата добијених применом *ULR* и *MLR* модела. Поред тога, примена *XGBoost* модела омогућила је да резултати мерења достигну циљ квалитета података (*DQO*) од 50 % током обе кампање мерења [24], што потврђује оправданост примене овог модела и метролошку употребљивост.

- **Упоредна анализа резултата**

Резултати моделирања показују да примена статистичких модела и модела машинског учења омогућава значајно побољшање тачности резултата мерења *low-cost PM* сензора интегрисаних у *PM-MoN* платформу. *ULR* модел обезбеђује основни ниво корекције и омогућава смањење систематског одступања у односу на референтни монитор, али његове перформансе остају ограничене, јер се заснива само на једном предиктору и претпоставља једноставну линеарну зависност између сензорског и референтног сигнала.

MLR модел представља значајан напредак у односу на *ULR*, јер укључује додатне метеоролошке параметре, пре свега температуру и релативну влажност ваздуха, који директно утичу на одзив оптичких *PM* сензора. Утврђено је да примена *MLR* повећава вредности $adjR^2$ и смањује вредности *NRMSE* у односу на примену *ULR*. То потврђује да понашање *SDS011* сензора не може довољно добро да се опише само једноставним линеарним односом између некориговане и референтне концентрације, већ је неопходно да се укључе и додатни физички релевантни параметри.

Резултати приказани у [23] показују да *RF* модел успешно описује сложене и нелинеарне односе између сензорског сигнала, температуре, влажности и референтних концентрација, уз високу робусност у различитим сезонским условима.

Резултати приказани у [24] показују да примена *XGBoost* модела такође значајно утиче на кориговање резултата мерења $PM_{2.5}$, нарочито у условима у којима линеарни модели не могу довољно добро да опишу сложене односе у подацима.

Поређење резултата из [23] и [24] показује да *RF* и *XGBoost*, као напредни ансамбл модели машинског учења, имају јасну предност у односу на класичне линеарне приступе. Применом *RF* модела постигнута је најбоља стабилност и највећа тачност у ширем скупу података, док су применом *XGBoost* модела постигнути значајно бољи резултати у односу на *ULR* и *MLR* моделе.

Иако ови резултати нису директно упоредиви у строгом статистичком смислу због различитог обима података и различитог броја анализираних фракција, они доследно указују на исту тенденцију: модели машинског учења омогућавају прецизнију, робуснију и адаптивнију корекцију сензорских мерења у односу на класичне линеарне моделе.

Добијени резултати указују да машинско учење не треба да се посматра као замена за класичну калибрацију, већ као њена аналитичка надоградња. Његовом применом повећавају се робусност, адаптивност и поузданост *PM-MoN* система у

реалним условима амбијенталног мониторинга, што представља значајан допринос развоју савремених платформи за праћење квалитета ваздуха.

4.5. Развој и имплементација *IAQI* модела

Након калибрације, валидације и корекције сензорских података, наредни корак у примени *PM-MoN* система представља њихова интерпретација у облику индекса квалитета унутрашњег ваздуха. *IAQI* модел развијен је са циљем да се измерене концентрације PM_{10} и $PM_{2.5}$ трансформишу у јединствену, кориснику разумљиву вредност, која одражава тренутно стање квалитета ваздуха и ниво потенцијалног здравственог ризика [31], [32].

За разлику од класичног приказа концентрација у $\mu g/m^3$, *IAQI* омогућава да се резултати мерења прикажу у категоријама квалитета ваздуха. Ово је посебно важно у системима намењеним корисницима који нису нужно стручна лица, јер омогућава брзу интерпретацију стања и лакше доношење одлука о потребним корективним мерама [32], [33].

Развој *IAQI* индекса заснива се на концепту постојећих индекса квалитета амбијенталног ваздуха, пре свега *AQI* модела, али је прилагођен специфичностима унутрашњег окружења. За разлику од амбијенталног ваздуха, у затвореним просторима изложеност корисника често траје дуже, извори загађења могу бити локализовани, а услови вентилације, број корисника и начин коришћења простора значајно утичу на концентрације суспендованих честица. Због тога је било неопходно да се *IAQI* модел формулише тако да задржи једноставност *AQI* приступа, али да истовремено буде применљив у условима континуираног мониторинга унутрашњег ваздуха.

- **Математичка формулација *IAQI***

Математичка формулација *IAQI* модела заснована је на линеарној интерполацији између дефинисаних концентрационих интервала (енгл. *breakpoint*) и одговарајућих индексних вредности, по узору на стандардну *AQI* методологију [31]. За сваки параметар (концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$) израчунава се посебна индексна вредност према следећој релацији:

$$IAQI_i = \frac{I_{high} - I_{low}}{C_{high} - C_{low}}(C - C_{low}) + I_{low} \tag{4.11}$$

где су:

$IAQI_i$ – индексна вредност за појединачну загађујућу супстанцу;

C – измерена или коригована концентрација загађујуће супстанце;

C_{low} – доња гранична вредност концентрационог опсега који садржи вредност C;

C_{high} – горња гранична вредност концентрационог опсега који садржи вредност C;

I_{low} – доња гранична вредност *IAQI* опсега који одговара концентрационом опсегу;

I_{high} – горња гранична вредност *IAQI* опсега који одговара концентрационом опсегу.

Након израчунавања појединачних вредности индекса за PM_{10} и $PM_{2.5}$, укупни *IAQI* се одређује применом методе доминантног полутанта, односно усвајањем максималне вредности међу појединачним индексима [33]:

$$IAQI_{total} = \max\left(IAQI_{PM10}, IAQI_{PM2.5}\right) \tag{4.12}$$

На тај начин коначну вредност *IAQI* одређује онај параметар који у датом тренутку највише погоршава квалитет унутрашњег ваздуха.

- **Дефинисање категорија *IAQI***

Категорије *IAQI* индекса дефинисане су у опсегу од 0 до 500, при чему ниже вредности указују на добар квалитет ваздуха, а више вредности на повећан здравствени ризик. Дефинисане су следеће категорије квалитета ваздуха: добар, умерен, нездрав за осетљиве групе, нездрав, веома нездрав, опасан [31].

Категоризација *IAQI* вредности у овој дисертацији дефинисана је на основу комбинације вредности из смерница Светске здравствене организације (*СЗО*), *AQI* система Агенције за заштиту животне средине Сједињених Америчких Држава (*EPA AQI breakpoint*) и савремених литературних препорука за процену квалитета унутрашњег ваздуха [31]–[35].

Избор опсега није заснован искључиво на административним граничним вредностима, већ на концепту постепеног преласка између различитих нивоа здравственог ризика, при чему су у обзир узети специфични услови дуготрајног боравка корисника у затвореним просторима, осетљивост изложене популације и карактер унутрашњих извора загађења. Квалитет унутрашњег ваздуха представља сложен и хетероген концепт, при чему се у литератури користе различити *IAQI* индекси, различити скупови параметара и различити приступи категоризацији. У појединим *IAQ* моделима класификација се заснива на концентрационим интервалима, граничним вредностима изложености и здравствено заснованој интерпретацији резултата [32].

Посебно се указује да су концентрациони прагови у *IAQ* системима дефинисани на основу граничних вредности изложености (енгл. *exposure limit values – ELV*), епидемиолошких студија и процене здравственог ризика, при чему различити индекси користе постепено рангирање нивоа изложености ради лакше интерпретације услова у затвореном простору.

Овај приступ је у складу са савременим *IAQ* концептом који унутрашње окружење посматра као критичан фактор изложености, будући да људи у савременим условима проводе више од 80–90 % времена у затвореном простору [35].

Конкретни опсези дефинисани су на следећи начин:

- Категорија „**Добар**" ($PM_{2.5}$: 0–10 μg/m^3; PM_{10}: 0–20 μg/m^3) постављена је у зони ниских концентрација и у близини здравствено оријентисаних вредности *СЗО* за дугорочну изложеност, те представља услове минималног здравственог ризика [34].
- Опсег „**Умерен**" ($PM_{2.5}$: 10–20 μg/m^3; PM_{10}: 20–40 μg/m^3) обухвата концентрације које се и даље сматрају прихватљивим за већину популације, али већ могу да представљају ризик за осетљиве групе, нарочито у условима продужене изложености [31], [34], [35].
- Категорије „**Нездрав за осетљиве**" ($PM_{2.5}$: 20–35 μg/m^3; PM_{10}: 40–60 μg/m^3) и „**Нездрав**" ($PM_{2.5}$: 35–50 μg/m^3; PM_{10}: 60–90 μg/m^3) дефинисане су по узору на логику *EPA AQI breakpoint* система, у коме се након одређених концентрационих прагова посебно издвајају осетљиве групе становништва. У предложеном *IAQI* моделу, вредности $PM_{2.5}$ у зони око 35 μg/m^3 представљају прелаз ка вишем нивоу ризика, што је у складу са здравствено оријентисаним приступима процене изложености суспендованим честицама. Повећане концентрације суспендованих честица у унутрашњем простору повезују се са порастом ризика од респираторних симптома, астме, кардиоваскуларних ефеката и симптома синдрома болесне зграде (енгл. *sick building syndrome – SBS*) [32], [35]. Суспендоване честице фракције $PM_{2.5}$, због могућности продора у бронхиоле и алвеоле, представљају један од најзначајнијих *indoor* полутаната повезаних са респираторним и кардиопулмоналним обољењима, когнитивним поремећајима и повећаним ризиком за осетљиве групе становништва [35].
- Категорије „**Веома нездрав**" ($PM_{2.5}$: 50–75 μg/m^3; PM_{10}: 90–120 μg/m^3) и „**Опасан**" ($PM_{2.5}$: > 75 μg/m^3; PM_{10}: > 120 μg/m^3) дефинисане су као концентрациони опсези код којих се очекује висок ризик, односно акутни здравствени ефекти услед значајног погоршања квалитета унутрашњег ваздуха, посебно током дужег боравка у затвореним просторима [31], [34], [35].

IAQI индекси треба да омогуће једноставну, кориснику разумљиву и здравствено засновану интерпретацију комплексних услова квалитета унутрашњег ваздуха [32]. Истовремено, посебна пажња треба да се посвети осетљивим популацијама, као што су деца, старије особе, пацијенти и хронични болесници, будући да су ове групе подложније негативним ефектима повишених концентрација суспендованих честица у унутрашњим срединама [35].

Као што је већ напоменуто, граничне вредности концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$, односно *breakpoint* вредности, нису директно преузете из једног стандарда, већ су ауторски дефинисане и адаптиране за потребе *IAQI* модела. Њихово дефинисање засновано је на здравствено оријентисаним препорукама Светске здравствене организације, методолошкој структури *EPA AQI* система и релевантним научним истраживањима из области квалитета унутрашњег ваздуха [31]–[35]. У табели 4.6 приказане су дефинисане категорије *IAQI* индекса, са концентрационим опсезима прилагођеним условима унутрашњег окружења. На тај начин, задржана је индексна логика и структура категоризације карактеристична за *EPA AQI* систем, док су прагови концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$ адаптирани у складу са препорукама *СЗО* и налазима релевантне IAQ литературе.

Табела 4.6. *Критеријуми за категоризацију индекса квалитета унутрашњег ваздуха (IAQI)*

IAQI	***Категорија***	***$PM_{2.5}$* (μg/m^3)**	***PM_{10}* (μg/m^3)**
0–50	Добар	0–10	0–20
51–100	Умерен	10–20	20–40
101–150	Нездрав за осетљиве	20–35	40–60
151–200	Нездрав	35–50	60–90
201–300	Веома нездрав	50–75	90–120
301–500	Опасан	> 75	> 120

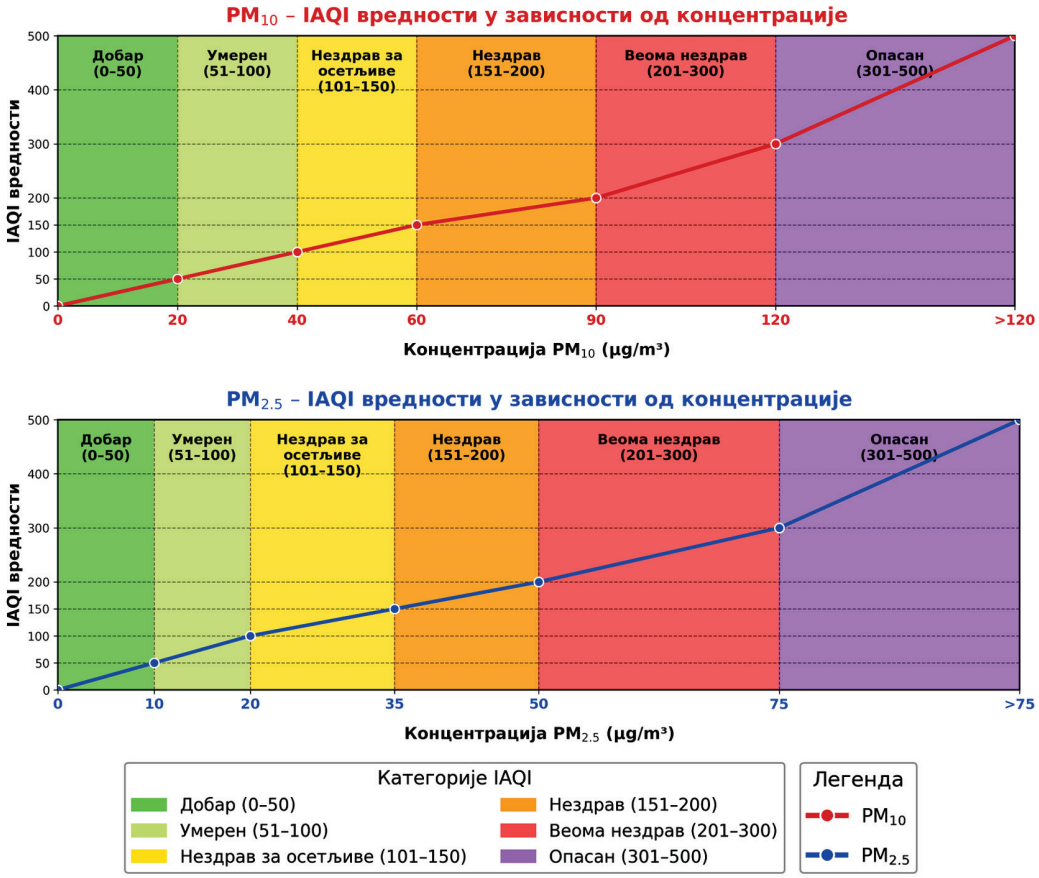
По узору на *EPA AQI* систем, визуелна интерпретација категорија реализована је коришћењем ауторски адаптираног колор-кодирања: *зелена*, *светло зелена*, *жута*, *наранџаста*, *црвена*, *љубичаста*, што омогућава интуитивно разумевање стања квалитета ваздуха.

Овако дефинисане категорије омогућавају јасну повезаност између концентрација суспендованих честица и потенцијалних здравствених ефеката, при чему је посвећена посебна пажња осетљивим групама становништва, код којих и умерена повећања концентрација могу да доведу до значајних здравствених последица [31].

- **Имплементација *IAQI* у реалном времену**

Имплементација *IAQI* индекса у оквиру *PM-MoN* система реализује се као део аутоматизованог тока обраде података у реалном времену. Након аквизиције, филтрирања, агрегације и корекције резултата мерења, систем израчунава *IAQI* вредност за сваки дефинисани временски интервал. Добијена вредност се затим приказује у *web* интерфејсу, заједно са концентрацијама PM_{10} и $PM_{2.5}$, температуром, релативном влажношћу и одговарајућом категоријом квалитета ваздуха.

У случају повећања *IAQI* вредности изнад дефинисаног прага, систем може да генерише визуелно упозорење и предложи корективне мере, као што су проветравање, активирање филтрације, смањење активности које доводе до ресуспензије честица или привремено ограничење боравка корисника у простору. Оваква имплементација омогућава да систем *PM-MoN* функционише као алат за оперативно праћење квалитета ваздуха и подршку доношењу одлука у управљању условима унутрашње средине. На слици 4.12 је приказана функционална зависност између концентрација *PM* и индекса *IAQI*.



Слика 4.12. *Зависност IAQI вредности од концентрације суспендованих честица са приказом категорија квалитета ваздуха*

- **Ограничења *IAQI* модела**

Упркос постигнутим резултатима, развијени *IAQI* модел има одређена ограничења. Пре свега, тачност индекса директно зависи од квалитета улазних података и перформанси *low-cost PM* сензора, који су осетљиви на промене температуре, релативне влажности и карактеристика аеросола.

Додатно ограничење односи се на чињеницу да модел тренутно укључује искључиво PM_{10} и $PM_{2.5}$ параметре, док остали полутанти нису директно интегрисани у формулацију индекса. Иако овакав приступ омогућава једноставнију имплементацију и интерпретацију резултата, он не приказује укупно стање квалитета унутрашњег ваздуха.

Такође, дефинисане граничне вредности нису у потпуности погодне за све врсте унутрашњег простора; оне у пракси варирају у зависности од типа објекта, броја корисника и начина коришћења простора, што указује на потребу за даљом адаптацијом *IAQI* модела специфичним условима примене.

- **Усклађеност *IAQI* модела са смерницама *СЗО***

Развијени *IAQI* модел представља интеграцију мониторинга, анализе и интерпретације квалитета ваздуха у јединствену функционалну целину. За разлику од класичних приступа заснованих искључиво на концентрацијама полутаната, *IAQI* омогућава синтетички приказ стања квалитета ваздуха и његову директну примену у системима за подршку одлучивању.

Модел је концептуално усклађен са смерницама Светске здравствене организације за честице PM_{10} и $PM_{2.5}$, при чему су препоручене вредности коришћене као здравствено оријентисана основа, а не као директно преузети концентрациони интервали. Оне су адаптиране условима унутрашњег окружења и специфичностима *real-time* мониторинга. Овакав приступ обезбеђује научну утемељеност индекса и његову практичну применљивост у системима заснованим на *low-cost PM* сензорима.

Посебан значај *IAQI* модела огледа се у могућности његове интеграције у системе проактивног управљања квалитетом унутрашњег ваздуха, где резултати мерења могу да буду директно повезани са аутоматским доношењем корективних мера. На тај начин омогућен је функционални прелаз са пасивног праћења стања ваздуха ка активном управљању условима унутрашње средине.

4.6. Процена изложености корисника

Процена изложености представља логичан наставак *IAQI* анализе, јер омогућава да се квалитет унутрашњег ваздуха не тумачи само на основу тренутно измерених концентрација, већ и у односу на време боравка корисника у посматраном простору. Док *IAQI* индекс обезбеђује брзу категоризацију тренутног стања квалитета ваздуха, процена изложености уводи временску компоненту и омогућава процену стварног оптерећења коме је корисник изложен током одређеног периода.

Ова разлика је значајна са становишта здравственог ризика, јер краткотрајно повећање концентрације загађујуће супстанце и дуготрајна изложеност умерено повишеним концентрацијама не морају да имају исте последице. Због тога изложеност не може адекватно да се процени само на основу појединачне вредности концентрације, већ је неопходно да се у обзир узме и трајање контакта корисника са загађеним ваздухом.

У најједноставнијем облику, изложеност може да се представи као производ концентрације загађујуће супстанце и времена трајања контакта. Међутим, у реалним условима концентрације нису константне, већ се мењају током времена. Због тога се изложеност прецизније дефинише као временски интегрисана изложеност (енгл. *time-integrated exposure*), односно као интеграл концентрације загађујуће супстанце у времену [36]. У општем облику, изложеност може да се посматра као површина испод криве концентрација–време, која описује укупну количину загађујуће супстанце којој је појединац изложен у посматраном периоду.

Овај континуални модел се дефинише следећим интегралним обликом:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} C(t)\, dt \tag{4.13}$$

где је:

E – укупна изложеност у посматраном периоду;

$C(t)$ – тренутна концентрација у времену;

t_1 – почетак периода мониторинга;

t_2 – крај периода мониторинга.

Уколико се претпостави да је концентрација током посматраног периода константна, односно да се вредност концентрације не мења током времена боравка корисника, претходни интегрални израз се своди на једноставнији линеарни модел:

$$E = \int_0^t C(t)\, dt = C \cdot t \tag{4.14}$$

где је E изложеност, C је концентрација, а t је време боравка у простору.

У реалним условима континуираног мониторинга, концентрације суспендованих честица стално флуктуирају. Поред тога, системи за мониторинг квалитета ваздуха, укључујући аутоматске мерне станице и паметне сензорске системе, не региструју концентрацију као непрекидну математичку функцију, већ као низ дискретних вредности у дефинисаним временским интервалима. У зависности од начина рада система, то могу да буду минутни, часовни или други временски агрегирани подаци.

Због тога се теоријски концепт временски интегрисане изложености у практичној примени прилагођава раду са дискретним вредностима. Укупни временски интервал се дели на n мањих подинтервала (Δt_i), унутар којих се регистрована концентрација апроксимира као константна вредност C_i. Коришћењем особине адитивности интеграла, прелази се са континуалног модела на дискретну суму изложености у појединачним временским интервалима. Дискретни облик прорачуна изложености може да се представи следећом релацијом:

$$E_{ukupno} = \sum_{i=1}^{n} \int_{t_1}^{t_2} C_i\, dt = \sum_{i=1}^{n} C_i \cdot \Delta t_i \tag{4.15}$$

где је:

E_{ukupno} – укупна изложеност у целом посматраном периоду;

C_i – просечна концентрација у i-том временском интервалу;

Δt_i – трајање i-тог временског интервала;

n – укупан број временских интервала обухваћених прорачуном.

Укупна изложеност се практично добија сабирањем производа концентрације и времена трајања за сваки појединачни временски интервал.

У случају равномерних временских интервала, где је дужина интервала Δt_i константна за све интервале мерења, добија се поједностављени облик израза за одређивање укупне изложености:

$$E_{ukupno} = \Delta t_i \cdot \sum_{i=1}^{n} C_i \tag{4.16}$$

Овакав приступ је посебно погодан за примену у *PM-MoN* систему, јер систем обезбеђује континуиране временски означене податке о концентрацијама PM_{10} и $PM_{2.5}$. На основу тих података, процена изложености може да се спроводи на различитим временским нивоима, у зависности од намене простора, начина његовог коришћења и трајања боравка корисника. На пример, у радном простору може да се анализира изложеност током осмочасовног радног времена, док у школским објектима процена може да се односи на период трајања наставе или боравка ученика у учионици.

Интеграцијом континуираних мерења, *IAQI* интерпретације и временске компоненте боравка у простору, *PM-MoN* систем омогућава прелазак са класичног мониторинга концентрација на процену стварне изложености корисника. На тај начин подаци добијени мониторингом добијају већу практичну вредност, јер се не користе само за опис тренутног стања ваздуха, већ и за процену укупног оптерећења коме су корисници изложени током боравка у затвореном простору.

У комбинацији са *IAQI* индексом, процена изложености омогућава јасно разликовање краткотрајних епизода погоршаног квалитета ваздуха од ситуација у којима умерено повишене концентрације трају дужи временски период. Ова разлика је важна за планирање корективних мера, јер различити обрасци изложености захтевају различите интервенције. Краткотрајни пикови концентрација могу да указују на потребу за тренутним проветравањем, ограничењем активности које доводе до ресуспензије честица или уклањањем извора загађења. Са друге стране, дуготрајна изложеност умерено повишеним концентрацијама може да указује на потребу за системским мерама, као што су побољшање вентилације, примена филтрације ваздуха или промена режима коришћења простора.

На овај начин, процена изложености проширује функционалност *PM-MoN* система и омогућава његову примену не само као система за праћење концентрација суспендованих честица, већ и као алата за процену стварног оптерећења корисника и подршку одлучивању у управљању квалитетом унутрашњег ваздуха.

4.7. Проактивно интегрисано управљање квалитетом унутрашњег ваздуха

Проактивно управљање квалитетом ваздуха заснива се на претварању резултата мониторинга у конкретне информације које могу да подрже правовремену реакцију корисника. У *PM-MoN* систему ова функција се остварује кроз интеграцију валидираних мерења, *IAQI* индекса, процене изложености и визуелних упозорења у оквиру корисничког интерфејса.

Уколико систем региструје повећање концентрација PM_{10} или $PM_{2.5}$, односно прелазак *IAQI* вредности у неповољнију категорију, кориснику може да се прикаже упозорење и да се предложи одговарајућа мера. У зависности од узрока и трајања погоршања, мере могу да обухвате природну или механичку вентилацију, активирање уређаја за филтрацију ваздуха, смањење активности које доводе до ресуспензије честица, промену режима коришћења простора или привремено ограничење боравка осетљивих група.

Посебна предност *PM-MoN* система је могућност праћења ефекта корективних мера. На пример, након проветравања или активирања филтрације, систем може да покаже да ли долази до смањења концентрација и побољшања *IAQI* категорије. На тај начин корисник не добија само информацију да је ваздух лошег квалитета, већ и повратну информацију о ефикасности предузете мере.

У објектима јавне намене, као што су школе, факултети, лабораторије и канцеларијски простори, овакав систем може да има значајну оперативну вредност. Дистрибуирана мрежа *PM-MoN* чворова омогућава идентификацију критичних простора, поређење различитих зона унутар објекта и планирање мера које су прилагођене стварним условима коришћења простора.

Проактивна функција *PM-MoN* система огледа се у томе што се мерење, анализа, *IAQI* интерпретација и препоруке за поступање повезују у јединствен процес. На тај начин систем не служи само за документовање стања квалитета ваздуха, већ и за подршку управљању изложеношћу и побољшању услова боравка у унутрашњим просторима.

За разлику од поглавља 3, у којем је приказана техничка реализација корисничког интерфејса и система упозорења, у овој целини проактивно управљање је разматрано кроз примену валидираних и интерпретираних података у доношењу корективних мера.

4.8. Литература за поглавље 4

[1] A. Božilov *et al.*, "Performance assessment of NOVA SDS011 low-cost PM sensor in various microenvironments," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 194, no. 9, p. 595, Sep. 2022, doi: 10.1007/s10661-022-10290-7.

[2] ASTM International, "ASTM D8405-21: Standard Test Method for Evaluating PM2.5 Sensors or Sensor Systems Used in Indoor Air Applications," West Conshohocken, PA, USA, Oct. 2021. doi: 10.1520/D8405-21.

[3] Institut za standardizaciju Srbije, *SRPS ISO/IEC 17025:2017 Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje*. https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:60059, 2017. Accessed: Mar. 07, 2026. [Online]. Available: https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:60059

[4] M. R. Giordano *et al.*, "From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors," *J. Aerosol Sci.*, vol. 158, p. 105833, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jaerosci.2021.105833.

[5] V. Tasić, N. Milošević, R. Kovačević, and N. Petrović, "Analysis of air pollution caused by particle matter emission from the copper smelter complex Bor (Serbia)," *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 16, no. 3, pp. 219–228, 2010, doi: 10.2298/CICEQ090909011T.

[6] R. Kovačević *et al.*, "Mass concentrations and indoor-outdoor relationships of PM in selected educational buildings in Nis, Serbia," *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 21, no. 1–2, pp. 149–158, 2015, doi: 10.2298/CICEQ140207013K.

[7] V. Tasić, M. Jovašević-Stojanović, S. Vardoulakis, N. Milošević, R. Kovačević, and 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.*, vol. 54, pp. 358–364, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.02.030.

[8] Sven Leckel Ingenieurbüro GmbH, "Small Filter Device (Kleinfiltergerät) LVS3 / MVS6: Technical Brochure [PDF hosted by BHB]," Sven Leckel Ingenieurbüro GmbH, Berlin, Germany, Jul. 2011. Accessed: May 17, 2024. [Online]. Available: https://www.bhb.pt/en/images/Produtos/Analitica/Qualidade_do_Ar/Amostradores_de_Particulas/Brochura_LSV3.pdf

[9] Institut za standardizaciju Srbije, *SRPS EN 12341:2023 Vazduh ambijenta – Standardna gravimetrijska metoda merenja za određivanje PM10 ili PM2,5 masene koncentracije suspendovanih čestica*. https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:104555, 2023. Accessed: Mar. 07, 2026. [Online]. Available: https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:104555

[10] Mega System S.r.l, "LIFETEK PMS Series: Sequential System for Fine Dust Particles," Mega System S.r.l., Bareggio, MI, Italy, 2022. Accessed: May 17, 2024. [Online]. Available: https://www.megasystemsrl.com/wp-content/uploads/2022/06/LIFETEK-PMS-04-22-ENG.pdf

[11] Cytiva, "Whatman QM-A Quartz Microfiber Filters, Grade QM-A, 47 mm (1851-047)," Cytiva product webpage. Accessed: Apr. 18, 2026. [Online]. Available: https://www.cytivalifesciences.com/en/us/products/items/whatman-qm-a-quartz-microfiber-filters-p-00753

[12] M. L. Zamora, J. Rice, and K. Koehler, "One year evaluation of three low-cost PM2.5 monitors," *Atmos. Environ.*, vol. 235, p. 117615, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117615.

[13] H.-Y. Liu, P. Schneider, R. Haugen, and M. Vogt, "Performance Assessment of a Low-Cost PM2.5 Sensor for a near Four-Month Period in Oslo, Norway," *Atmosphere (Basel).*, vol. 10, no. 2, p. 41, Jan. 2019, doi: 10.3390/atmos10020041.

[14] G. Ramachandran, J. L. Adgate, G. C. Pratt, and K. Sexton, "Characterizing Indoor and Outdoor 15 Minute Average PM 2.5 Concentrations in Urban Neighborhoods," *Aerosol Science and Technology*, vol. 37, no. 1, pp. 33–45, Jan. 2003, doi: 10.1080/02786820300889.

[15] L. Wallace, J. Bi, W. R. Ott, J. Sarnat, and Y. Liu, "Calibration of low-cost PurpleAir outdoor monitors using an improved method of calculating PM," *Atmos. Environ.*, vol. 256, p. 118432, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118432.

[16] D. Wu *et al.*, "Influence of particle properties and environmental factors on the performance of typical particle monitors and low-cost particle sensors in the market of China," *Atmos. Environ.*, vol. 268, p. 118825, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118825.

[17] TSI Incorporated, "DustTrak II Aerosol Monitor 8530," TSI Incorporated. Accessed: Mar. 05, 2026. [Online]. Available: https://tsi.com/products/aerosol-and-dust-monitors/aerosol-and-dust-monitors/dusttrak-ii-aerosol-monitor-8530

[18] L. Morawska, “Characteristics of particle number and mass concentrations in residential houses in Brisbane, Australia,” *Atmos. Environ.*, vol. 37, no. 30, pp. 4195–4203, Sep. 2003, doi: 10.1016/S1352-2310(03)00566-1.

[19] Vlada Republike Srbije, *Uredba o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha, Službeni glasnik RS, br. 11/2010, 75/2010 i 63/2013*. Srbija: Pravno-informacioni sistem Republike Srbije, 2013. Accessed: Apr. 15, 2026. [Online]. Available: https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/vlada/uredba/2010/11/9/reg

[20] M. Badura, P. Batog, A. Drzeniecka-Osiadacz, and P. Modzel, “Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient $PM_{2.5}$ Monitoring,” *J. Sens.*, vol. 2018, p. 5096540, Oct. 2018, doi: 10.1155/2018/5096540.

[21] M. Budde *et al.*, “Potential and Limitations of the Low-Cost SDS011 Particle Sensor for Monitoring Urban Air Quality,” in *3nd International Conference on Atmospheric Dust*, Bari, Italy: Digilabs, May 2018, pp. 6–12. doi: 10.14644/dust.2018.002.

[22] J. Kuula *et al.*, “Laboratory evaluation of particle-size selectivity of optical low-cost particulate matter sensors,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 13, no. 5, pp. 2413–2423, May 2020, doi: 10.5194/amt-13-2413-2020.

[23] D. B. Topalović, V. M. Tasić, J. S. S. Petrović, J. Lj. Vlahović, M. B. Radenković, and I. D. Smičiklas, “Unveiling the potential of a novel portable air quality platform for assessment of fine and coarse particulate matter: in-field testing, calibration, and machine learning insights,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 196, no. 10, p. 888, Oct. 2024, doi: 10.1007/s10661-024-13069-0.

[24] D. B. Topalović *et al.*, “Primena XGBoost algoritma za kalibraciju prenosnog PAQMON 1.0 PM monitora u uslovima spoljašnje sredine,” *Bakar*, vol. 50, no. 1, pp. 55–56, 2025, doi: 10.5937/bakar2501055T.

[25] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. Geoffrey. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2013.

[26] L. Breiman, “Random Forests,” *Mach. Learn.*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, Oct. 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324.

[27] G. Biau and E. Scornet, “A random forest guided tour,” *TEST*, vol. 25, no. 2, pp. 197–227, Jun. 2016, doi: 10.1007/s11749-016-0481-7.

[28] T. Chen and C. Guestrin, “XGBoost: A Scalable Tree Boosting System,” in *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, San Francisco, CA, USA: ACM, Aug. 2016, pp. 785–794. doi: 10.1145/2939672.2939785.

[29] Y. Song *et al.*, "Spatial prediction of $PM_{2.5}$ concentration using hyper-parameter optimization XGBoost model in China," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 32, p. 103272, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.eti.2023.103272.

[30] D. H. Hagan and J. H. Kroll, "Assessing the accuracy of low-cost optical particle sensors using a physics-based approach," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 13, no. 11, pp. 6343–6355, Nov. 2020, doi: 10.5194/amt-13-6343-2020.

[31] U.S. Environmental Protection Agency, "Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI), EPA 454/B-18-007," Research Triangle Park, NC, USA, Sep. 2018. Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: URL: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf

[32] M. Pourkiaei and A.-C. Romain, "Scoping review of indoor air quality indexes: Characterization and applications," *Journal of Building Engineering*, vol. 75, p. 106703, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.106703.

[33] S. Zaib, J. Lu, and M. Bilal, "Spatio-Temporal Characteristics of Air Quality Index (AQI) over Northwest China," *Atmosphere (Basel).*, vol. 13, no. 3, p. 375, Feb. 2022, doi: 10.3390/atmos13030375.

[34] World Health Organization, "WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide," Geneva, Switzerland, Sep. 2021. Accessed: Apr. 12, 2025. [Online]. Available: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

[35] A. Chamseddine, I. M. Elzein, and N. Hassan, "Indoor Air Quality in Critical Indoor Environments: A Review Paper," *Water Air Soil Pollut.*, vol. 236, no. 13, p. 885, Dec. 2025, doi: 10.1007/s11270-025-08512-y.

[36] V. Zartarian, N. Duan, and W. Ott, "Basic Concepts and Definitions of Exposure and Dose," in *Exposure Analysis*, CRC Press, 2006, pp. 33–63. doi: 10.1201/9781420012637.ch2.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕПОРУКЕ

5.1. Сумарни приказ резултата

Истраживање спроведено у оквиру докторске дисертације било је усмерено на испитивање загађења унутрашњег ваздуха објеката јавне намене суспендованим честицама, применом проактивног мониторинга. Полазећи од уоченог истраживачког проблема, који се односи на недовољну развијеност континуираних, валидираних и оперативно применљивих система за праћење концентрација у реалном времену, развијен је и експериментално валидиран интегрисани *PM-MoN* систем, заснован на *low-cost* сензорима, калибрационим и корекционим моделима, *IoT* технологијама и *IAQI* приступу. Развијени систем омогућава праћење концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$, прикупљање, обраду и визуализацију података у реалном времену, као и процену квалитета ваздуха применом *IAQI* модела.

Теоријски део истраживања обухватио је анализу квалитета унутрашњег ваздуха, здравствених ефеката изложености суспендованим честицама, принципа мониторинга квалитета ваздуха и савремених приступа заснованих на *low-cost* сензорима и *IoT* архитектури. Прегледом литературе утврђено је да традиционални мониторинг системи, иако обезбеђују висок ниво тачности, имају ограничења у погледу просторне покривености, временске резолуције и економске оправданости примене у већем броју јавних објеката. Истовремено је утврђено да *low-cost* сензорски системи представљају перспективно решење, али само под условом да се њихова примена заснива на јасно дефинисаним поступцима калибрације, валидације и корекције података.

На основу теоријске анализе, развоја система и његове експерименталне провере формирана је научно заснована и практично применљива методологија за процену квалитета унутрашњег ваздуха у односу на суспендоване честице у објектима јавне намене.

У оквиру развоја *PM-MoN* система реализована је интегрисана хардверско-софтверска платформа која обједињује *low-cost PM* сензоре, микроконтролерску јединицу, комуникационе модуле и *cloud* инфраструктуру. Систем је конципиран као модуларно и прошириво решење, способно за континуирано прикупљање података, локалну и удаљену визуализацију резултата, као и повезивање са *web* интерфејсом и *IoT* системима. Посебна вредност овог приступа огледа се у томе што је развијено технички функционално и ценовно приступачно решење, прилагођено реалним условима примене у објектима јавне намене.

Модуларна структура система омогућава његову примену на више мерних позиција, чиме се стварају услови за просторно дистрибуирано праћење концентрација суспендованих честица у различитим зонама објеката јавне намене. На тај начин развијени систем задржава оперативну једноставност и ценовну приступачност, уз могућност континуираног праћења стања квалитета унутрашњег ваздуха у реалном времену.

Подаци добијени мониторингом учињени су доступним крајњим корисницима кроз функционалне и приступачне алате за визуализацију. Ови алати омогућавају приказ тренутних концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$, временских трендова, *IAQI* категорија и стања квалитета ваздуха у реалном времену, чиме се обезбеђује правовремена доступност информација управљачима објеката, запосленима и посетиоцима.

Експериментална валидација система изведена је методом колокације са више типова референтних и њима еквивалентних инструмената. У испитивањима су коришћени гравиметријски узоркивачи малог протока *LVS3*, *OSIRIS 2315* монитор и *GRIMM EDM180* монитори. Оваквим избором опреме омогућена је провера *PM-MoN* система у односу на различите мерне принципе. Гравиметријски узоркивач *LVS3* коришћен је као основа за проверу тачности мерења масене концентрације честица, док су оптички монитори *OSIRIS 2315* и *GRIMM EDM180* омогућили поређење резултата са високом временском резолуцијом.

Испитивања су спроведена у лабораторијским и теренским условима, у Бору и Нишу, током грејне и негрејне сезоне. На тај начин обухваћени су различити опсези концентрација, температуре, релативне влажности и састава аеросола, што је омогућило реалнију процену понашања система у променљивим условима унутрашњег и спољашњег ваздуха.

Резултати валидације показали су да *PM-MoN* систем остварује висок степен сагласности са референтним инструментима, нарочито у контролисаним условима унутрашњег ваздуха. У лабораторијским условима добијене су високе вредности коефицијента детерминације ($R^2 \approx 0{,}95 – 0{,}98$), што указује на поуздано праћење промена концентрација и стабилан рад система. У теренским условима вредности R^2 биле су ниже ($\approx 0{,}67 – 0{,}83$), што је очекивано с обзиром на израженији утицај релативне влажности, температурних промена и карактеристика аеросола.

Посебно је потврђено да релативна влажност ваздуха значајно утиче на одзив оптичких *PM* сензора. При вредностима *RH* вишим од 70 % уочено је прецењивање концентрација суспендованих честица, што се може објаснити хигроскопским растом честица и појачаним расејањем светлости. Применом калибрационих и корекционих

модела унапређена је поузданост сензорских мерења у овим условима, чиме је показано да њихова примена није само пожељан, већ и неопходан услов за практичну употребу *low-cost PM* сензора у реалним условима. На тај начин је потврђен значај калибрационих и корекционих поступака као саставног дела методологије за поуздану примену *low-cost PM* сензора у процени квалитета унутрашњег ваздуха.

У дисертацији је развијен и *IAQI* модел, прилагођен условима унутрашњег ваздуха и мониторингу у реалном времену. За разлику од класичних *AQI* система, који су углавном оријентисани на амбијентални ваздух и дуже временске просеке, предложени *IAQI* омогућава динамичку процену стања квалитета унутрашњег ваздуха у кратким временским интервалима. Модел се заснива на трансформацији концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$ у категоријске вредности које су повезане са нивоима квалитета ваздуха и потенцијалним здравственим ризиком.

Резултати мониторинга указали су на изражену временску варијабилност концентрација суспендованих честица у унутрашњем ваздуху јавних објеката. Уочене су краткотрајне епизоде повећаних концентрација, повезане са активностима корисника простора, природном вентилацијом, ресуспензијом и продором спољашњег загађења. Ови налази потврђују да периодична мерења не могу у потпуности да обухвате динамику изложености корисника, нарочито у просторима са промењљивом фреквенцијом боравка.

Истраживање је показало да примена проактивног мониторинга омогућава континуирано праћење динамике концентрација *PM*, благовремену идентификацију епизода повећаног загађења, процену изложености корисника, подршку корективном управљању квалитетом ваздуха и интеграцију са *IoT* и *cloud* инфраструктуром.

Посебан значај добијених резултата огледа се у преласку са класичног, реактивног мониторинга на проактивни приступ управљању квалитетом унутрашњег ваздуха. У том контексту мониторинг више не представља само процес регистрације података, већ постаје алат за препознавање ризичних ситуација, доношење одлука и смањење изложености корисника повишеним концентрацијама суспендованих честица.

Укупно посматрано, резултати дисертације показују да је могуће развити поуздан, ценовно приступачан и оперативно применљив систем за проактивни мониторинг суспендованих честица у унутрашњем ваздуху јавних објеката.

Интеграцијом *low-cost* сензора, калибрационих модела, *IAQI* концепта и *IoT* технологија реализован је систем који обезбеђује континуирано праћење квалитета ваздуха, процену изложености и подршку управљању условима унутрашњег окружења, чиме је потврђена научна и практична оправданост предложеног приступа.

Добијени резултати могу да представљају основу за даљи развој техничких смерница, препорука и будућих регулаторних оквира у области мониторинга суспендованих честица у унутрашњем ваздуху објеката јавне намене, укључујући и разматрање критеријума за дефинисање дозвољених граничних вредности PM_{10} и $PM_{2.5}$ у оваквим просторима.

5.2. Потврда научних хипотеза

Полазећи од предмета и циљева истраживања, као и од хипотеза формулисаних у уводном поглављу дисертације, у овом делу су размотрене оне претпоставке које су непосредно проверене кроз развој, валидацију и примену *PM-MoN* система. Провера хипотеза односила се на могућност примене *low-cost* сензора у континуираном мониторингу суспендованих честица, утицај релативне влажности и температуре на поузданост мерења, потребу за калибрационим и корекционим моделима, развој *IAQI* приступа, примену *IoT/cloud* инфраструктуре и предност континуираног мониторинга у односу на периодична мерења.

Основна научна хипотеза полазила је од претпоставке да примена нове методологије за процену квалитета унутрашњег ваздуха у односу на суспендоване честице у објектима јавне намене, засноване на проактивном мониторингу, *low-cost* сензорима, калибрационим моделима, *IAQI* приступу и информационим технологијама, омогућава ефикасно корективно управљање квалитетом унутрашњег ваздуха у реалном времену. Резултати истраживања потврдили су ову хипотезу, јер је развијени *PM-MoN* систем омогућио континуирано праћење концентрација суспендованих честица фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$, обраду и визуализацију података у реалном времену, идентификацију краткотрајних епизода повећаног загађења, интерпретацију резултата применом *IAQI* модела и дефинисање основа за правовремено предузимање корективних мера. На тај начин потврђено је да реализовани систем за мониторинг квалитета ваздуха не служи само за пасивно регистровање концентрација, већ је то функционални алат за процену изложености и управљање условима унутрашњег окружења.

Потврђена је претпоставка да суспендоване честице представљају један од кључних показатеља квалитета унутрашњег ваздуха у објектима јавне намене. Резултати мониторинга показали су да концентрације PM_{10} и $PM_{2.5}$ имају изражену временску променљивост и да су повезане са активностима корисника, режимом вентилације,

ресуспензијом и продором спољашњег загађења, због чега њихово праћење има значајну улогу у процени изложености корисника простора.

Експериментални део дисертације доказао је хипотезу да фактори унутрашње средине, пре свега релативна влажност и температура ваздуха, значајно утичу на перформансе *low-cost PM* сензора. Испитивања су показала да повећање релативне влажности доводи до систематског прецењивања концентрација, услед хигроскопског раста честица и промене оптичких својстава аеросола. Примена регресионих и мултиваријантних корекционих модела побољшала је сагласност са референтним мерењима, чиме је потврђена оправданост њихове примене у *PM-MoN* систему.

Поступак валидације потврдио је хипотезу о постојању статистички значајне и високе корелације између резултата добијених применом *PM-MoN* система и резултата добијених референтним или еквивалентним методама мерења. Поређења са гравиметријским узоркивачем *LVS3*, као и са оптичким мониторима *OSIRIS 2315* и *GRIMM EDM180*, показала су да развијени систем може поуздано да прати промене концентрација, посебно у контролисаним условима, док одступања у теренским условима указују на значај калибрације и корекције података.

Уједно је потврђена и хипотеза да системи за мониторинг квалитета ваздуха засновани на *low-cost PM* сензорима, уз адекватну калибрацију, корекцију и валидацију података, могу да обезбеде задовољавајући ниво тачности и поузданости за континуирано праћење концентрација суспендованих честица у реалним условима експлоатације. Високе вредности коефицијента детерминације у лабораторијским условима, као и прихватљив ниво сагласности у теренским условима, показују да се *PM-MoN* систем може користити за праћење трендова, релативних промена концентрација, идентификацију епизода повећаног загађења и подршку процени изложености.

Такође, потврђена је хипотеза да развој и имплементација *IAQI* модела, заснованог на континуираном праћењу суспендованих честица, унапређује интерпретацију резултата мониторинга, процену нивоа изложености и информисање корисника о потенцијалним здравственим ризицима. Предложени модел омогућио је да се измерене концентрације PM_{10} и $PM_{2.5}$ преведу у категорије квалитета ваздуха, разумљиве стручним корисницима и ширем кругу корисника објеката. Посебна вредност модела огледа се у његовој повезаности са системом визуализације и могућности употребе у корективном управљању квалитетом унутрашњег ваздуха.

Постављена хипотеза да континуирани мониторинг у реалном времену омогућава ефикаснију идентификацију краткотрајних епизода повећаног загађења у односу на класичне периодичне приступе, потврђена је током истраживања, јер су регистроване изражене краткотрајне варијације концентрација, повезане са присуством корисника, ресуспензијом, режимом вентилације и утицајем спољашњих извора. Такве епизоде би применом периодичних мерења могле остати непримећене и недовољно описане.

Кроз практичну примену потврђена је и хипотеза да интеграција *low-cost PM* сензора, *IoT* архитектуре, *cloud* инфраструктуре и *web* интерфејса омогућава развој функционалног система за даљински мониторинг и визуализацију података. Развијени *PM-MoN* систем омогућио је континуирано прикупљање, складиштење, пренос и приказ резултата у реалном времену, уз могућност локалног и удаљеног приступа. На тај начин показана је применљивост *IoT* концепта у области мониторинга квалитета унутрашњег ваздуха.

Поред потврде основне и помоћних хипотеза, резултати истраживања су указали и на више додатних сазнања. Утврђено је да *low-cost PM* сензори не могу у потпуности заменити референтне методе у свим условима, али могу имати високу употребну вредност у системима проактивног мониторинга, посебно када је циљ праћење трендова, релативних промена и просторних варијација концентрација. Такође је показано да интеграција више технолошких компоненти у јединствен систем значајно проширује могућности класичног мониторинга.

Коначно, добијени резултати интеграције *low-cost PM* сензора, калибрационих и корекционих модела, *IAQI* концепта и *IoT* технологија указују на оправданост истраживања и показују одржив правац развоја проактивног мониторинга квалитета унутрашњег ваздуха у објектима јавне намене.

5.3. Научни допринос истраживања

Научни допринос ове докторске дисертације произилази из повезивања *low-cost* сензорских технологија, калибрационих модела, *IAQI* концепта и *IoT* архитектуре у јединствен систем проактивног мониторинга суспендованих честица у унутрашњем ваздуху објеката јавне намене. Истраживање је усмерено на превазилажење ограничења класичних приступа мониторингу, који се најчешће заснивају на скупим референтним системима и повременим мерењима, као и на развој решења које може да обезбеди континуирано праћење квалитета ваздуха у реалним условима експлоатације система.

Први допринос огледа се у развоју интегрисаног система *PM-MoN*, заснованог на *low-cost PM* сензорима, микроконтролерској платформи, комуникационим модулима и *cloud* инфраструктури. Развијени систем представља функционалну целину која омогућава прикупљање, обраду, складиштење и визуализацију података о концентрацијама суспендованих честица и параметрима микроклиме. Његова модуларност и проширивост омогућавају да се систем прилагоди различитим просторима и условима примене.

Методолошки допринос дисертације односи се на поступак калибрације и валидације *low-cost PM* сензора у условима унутрашњег ваздуха. Истраживањем је потврђено да на перформансе оптичких сензора утичу релативна влажност, температура и карактеристике аеросола, због чега је за поузданију интерпретацију резултата неопходна примена корекционих модела. Примењени приступи омогућили су побољшање сагласности са референтним инструментима и показали да *low-cost* сензори, уз одговарајућу обраду података, могу бити корисни у системима континуираног мониторинга.

При томе, развијени систем не треба посматрати као замену за референтне методе мерења, већ као њихову функционалну допуну у условима када је потребно обезбедити континуирано праћење, већу просторну покривеност, идентификацију трендова и оперативну подршку управљању квалитетом ваздуха. Овакво позиционирање *PM-MoN* система представља важан методолошки допринос, јер јасно дефинише домет примене сензорских система на бази *low-cost PM* сензора у односу на класичне референтне приступе.

Посебан научни допринос представља развој *IAQI* модела прилагођеног условима унутрашњег ваздуха. Постојећи *AQI* системи углавном су намењени амбијенталном ваздуху и засновани на дужим временским просецима, док је у овој дисертацији предложен модел који омогућава процену стања квалитета ваздуха у реалном времену. Трансформацијом концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$ у категоријске вредности повезане са нивоима ризика, резултати мерења добијају јаснији оперативни смисао и могу се користити као подршка управљању квалитетом унутрашњег ваздуха.

Допринос истраживања огледа се и у примени концепта проактивног мониторинга. Уместо приступа у којем се подаци анализирају тек након завршетка мерења, развијени систем омогућава континуирано праћење динамике концентрација, препознавање краткотрајних епизода повећаног загађења и благовремену подршку корективним мерама. Оваквим приступом мониторинг добија активну улогу у смањењу изложености корисника и унапређењу услова боравка у затвореним просторима.

Значајан допринос представља и интеграција *IoT* архитектуре и информационо-комуникационих технологија у област мониторинга квалитета унутрашњег ваздуха. Развијени систем омогућава пренос података, удаљени приступ резултатима мерења, визуализацију у реалном времену и повезивање са *web* платформама и *cloud* инфраструктуром. Тиме је показано да *IoT* технологије могу значајно повећати доступност података и оперативност система мониторинга.

Резултати дисертације доприносе и проширењу сазнања о понашању суспендованих честица у унутрашњем ваздуху јавних објеката. Они су показали да концентрације PM_{10} и $PM_{2.5}$ имају изражену временску варијабилност и да на њихову динамику утичу активност корисника, вентилација, ресуспензија и спољашње загађење. Ови налази су значајни за разумевање начина на који се формира изложеност суспендованим честицама у затвореним просторима.

Посебна вредност дисертације огледа се у њеној интердисциплинарности. Истраживање повезује области квалитета ваздуха, заштите животне средине, сензорских технологија, информационо-комуникационих система, статистичке анализе и процене здравственог ризика. Таква интеграција омогућила је развој методолошког оквира који може послужити као основа за даља истраживања паметних система мониторинга.

У целини, научни допринос ове докторске дисертације огледа се у развоју методолошки заснованог, експериментално валидираног и практично применљивог приступа за проактивни мониторинг суспендованих честица у унутрашњем ваздуху јавних објеката. Развијени *PM-MoN* систем представља корак ка унапређењу мониторинга квалитета ваздуха, процене изложености корисника и управљања условима унутрашњег окружења, уз могућност даље примене у оквиру паметних објеката и савремених *IoT* система.

5.4. Практични допринос и примена резултата

Поред научног значаја, резултати ове докторске дисертације имају изражен практични допринос, који се огледа у могућности примене развијеног *PM-MoN* система у реалним условима мониторинга квалитета унутрашњег ваздуха у објектима јавне намене.

Систем представља ценовно приступачно, технички функционално и оперативно применљиво решење за континуирано праћење концентрација суспендованих честица, процену изложености корисника, *IAQI* интерпретацију резултата и подршку управљању условима унутрашњег окружења.

Један од најзначајнијих практичних резултата рада јесте могућност континуираног праћења концентрација PM_{10} и $PM_{2.5}$ у затвореним просторима. За разлику од класичних приступа, који се најчешће заснивају на периодичним мерењима и накнадној анализи, *PM-MoN* омогућава непосредан увид у промене концентрација и брже препознавање епизода повећаног загађења. Ова функционалност је посебно значајна у јавним објектима, у којима је квалитет унутрашњег ваздуха повезан са здрављем, комфором и радном способношћу већег броја корисника.

Практична примена развијеног система посебно је значајна у образовним установама, административним објектима, здравственим установама, јавним службама, библиотекама и читаоницама, затвореним радним просторима и објектима са повећаном фреквенцијом корисника.

У таквим просторима *PM-MoN* систем може да обезбеди стални увид у услове унутрашњег ваздуха и да помогне при доношењу одлука о режиму вентилације, проветравања и организацији боравка корисника и примени других корективних мера.

На основу *IAQI* вредности и временске динамике концентрација могу се дефинисати конкретне корективне мере, као што су повећање интензитета вентилације, промена режима проветравања, ограничење или временско померање активности које доводе до ресуспензије честица, контрола унутрашњих извора загађења и оптимизација времена боравка корисника у простору. На тај начин систем добија активну управљачку функцију, јер омогућава да се мере не предузимају накнадно, већ у тренутку када подаци указују на погоршање квалитета ваздуха.

Посебан практични значај система односи се на благовремену идентификацију краткотрајних епизода повећаног загађења. Такве епизоде могу бити последица активности корисника, ресуспензије, чишћења простора, природне вентилације или продора спољашњег загађења. Истраживање је показало да оне могу значајно утицати на изложеност корисника, а да при томе често остају нерегистроване када се користе само периодична мерења.

Развијени *IAQI* модел има практичну вредност јер омогућава једноставније тумачење резултата мерења и њихово повезивање са нивоима потенцијалног здравственог ризика. Категоријски и визуелни приказ стања квалитета ваздуха олакшава разумевање резултата корисницима који немају стручно знање из области квалитета ваздуха, што је важно за примену система у школама, административним зградама, здравственим установама и другим јавним просторима.

Практични значај *IAQI* концепта огледа се и у могућности интеграције са алармним системима, системима вентилације и *HVAC* инфраструктуром, *web* интерфејсима, *cloud* платформама и системима паметних објеката.

На тај начин систем мониторинга може да добије активнију улогу у управљању условима унутрашњег окружења, а не само у пасивном приказу измерених концентрација суспендованих честица.

Значајан практични допринос представља и примена *IoT* архитектуре. Развијени систем обезбеђује даљински приступ подацима, континуирани пренос резултата, складиштење података, визуализацију у реалном времену и централизовани надзор више мерних локација.

Ове функционалности омогућавају примену система у оквиру мрежа мониторинга, паметних објеката и интегрисаних система управљања.

Ценовна приступачност развијеног решења додатно повећава могућност његове шире примене, јер омогућава постављање већег броја мерних јединица и бољу просторну покривеност у односу на системе засноване искључиво на скупој референтној опреми.

Практични резултати рада могу се применити у области процене изложености корисника, оптимизације вентилације, управљања ризиком, здравствене заштите, заштите животне средине и управљања условима унутрашњег окружења.

Интеграцијом података о концентрацијама суспендованих честица са параметрима микроклиме могуће је унапредити управљање условима боравка и побољшати квалитет унутрашњег ваздуха у јавним објектима.

Резултати истраживања могу да бити корисни и у процесу доношења прописа, препорука и техничких смерница у области квалитета унутрашњег ваздуха. Развијени приступ може послужити као основа за развој локалних *IAQI* стандарда, дефинисање препоручених прагова, унапређење мониторинга у јавним објектима и израду смерница за примену *low-cost* система.

Поред директне примене, развијени систем има и едукативни значај. Приказ концентрација и *IAQI* вредности у реалном времену може допринети подизању свести корисника о значају квалитета унутрашњег ваздуха и о утицају свакодневних активности на концентрације суспендованих честица. На тај начин систем може подстаћи одговорније понашање и боље управљање условима боравка у затвореним просторима.

Укупно посматрано, практични допринос дисертације огледа се у развоју приступачног, функционалног и применљивог система за континуирани мониторинг квалитета унутрашњег ваздуха. *PM-MoN* омогућава праћење концентрација суспендованих честица, процену изложености, визуализацију података и подршку управљању условима унутрашњег окружења, чиме представља основу за даљи развој савремених система мониторинга у јавним објектима.

5.5. Ограничења система и препоруке за будућа истраживања

Иако су резултати ове докторске дисертације потврдили научну и практичну оправданост развијеног *PM-MoN* система, истраживање је истовремено указало и на одређена ограничења која треба узети у обзир приликом тумачења резултата и планирања његовог даљег развоја. Ова ограничења не умањују вредност добијених резултата, већ представљају основу за унапређење будућих система мониторинга и за развој нових истраживачких приступа у области квалитета унутрашњег ваздуха.

Једно од основних ограничења односи се на природу *low-cost PM* сензора. Иако су примењени сензори показали добру способност праћења трендова и релативних промена концентрација, њихова тачност и стабилност зависе од услова окружења, пре свега од релативне влажности, температуре и карактеристика аеросола. Утврђено је да висока релативна влажност може довести до систематског прецењивања концентрација услед хигроскопског раста честица и промена њихових оптичких својстава. Због тога се примена корекционих модела издваја као неопходан услов за поуздану употребу оваквих сензора.

Ограничење система представља и чињеница да су у оквиру овог истраживања анализиране првенствено само суспендоване честице (фракција PM_{10} и $PM_{2.5}$). Иако оне спадају међу најзначајније параметре квалитета ваздуха, унутрашње окружење карактерише присуство већег броја загађујућих супстанци, као што су *VOC* једињења, CO_2, NO_2, O_3 и биолошки аеросоли. Због тога се препоручује да будућа истраживања буду усмерена ка развоју мултипараметарских система мониторинга, који би омогућили свеобухватнију процену квалитета ваздуха и изложености корисника.

Једно од значајних ограничења односи се и на дугорочну стабилност сензора. Старење компоненти, акумулација прашине и промене у оптичком систему временом могу да утичу на тачност мерења. Иако овај ефекат није значајно утицао на резултате током периода испитивања, дугорочна примена система захтева увођење процедура периодичне рекалибрације, самодијагностике и контроле квалитета података.

Ограничење *IAQI* модела огледа се у чињеници да је модел заснован првенствено на концентрацијама суспендованих честица и да не укључује директно друге параметре квалитета ваздуха и индивидуалне карактеристике изложености корисника. Иако предложени модел омогућава процену стања ваздуха у реалном времену будући развој треба усмерити ка сложенијим *IAQI* приступима који би могли да обухвате већи број загађујућих супстанци, тежинске факторе, временску изложеност, физиолошке параметре и осетљивост различитих категорија корисника.

Таквим приступом било би могуће развити персонализованије *IAQI* моделе и прецизније системе процене ризика у унутрашњем окружењу.

Ограничење истраживања односи се и на просторни обухват мерења. Иако су испитивања реализована у различитим условима и на више локација, обим истраживања није омогућио формирање велике дистрибуиране сензорске мреже. Због тога би будућа истраживања требало да обухвате већи број мерних јединица и различите типове јавних објеката, како би се детаљније анализирале просторне варијације концентрација и изложености корисника.

Поред броја мерних јединица, значајно ограничење представља и просторна репрезентативност појединачних мерења. У сложеним унутрашњим окружењима концентрације суспендованих честица могу бити неравномерно распоређене, због чега резултати могу зависити од конкретне позиције сензорског чвора у простору, удаљености од извора загађења, вентилационих отвора, зона кретања корисника и места ресуспензије честица. Због тога будућа истраживања треба да обухвате и оптимизацију распореда сензорских јединица, као и анализу просторне репрезентативности података у различитим типовима јавних објеката.

Посебан правац будућих истраживања односи се на примену метода машинског учења и вештачке интелигенције у области калибрације, анализе и предикције концентрација. У овој дисертацији примењени су класични статистички модели, али добијени резултати указују на значајан потенцијал напреднијих приступа као што су вештачке неуронске мреже (*Artificial Neural Networks – ANN*), алгоритми машинског учења за динамичку калибрацију и модели за предикцију краткотрајних епизода повећаних концентрација. Наведени приступи могли би да омогуће адаптивну калибрацију сензора и повећање тачности мерења у условима променљивог окружења.

Значајан потенцијал постоји и у даљој интеграцији система са *HVAC* инфраструктуром и паметним објектима. У оквиру овог истраживања систем *PM-MoN* је првенствено имао мониторинг функцију, али добијени резултати указују на то да систем може да представља основу за развој аутоматизованог управљања вентилацијом, интелигентних система филтрације и адаптивног управљања квалитетом ваздуха.

Интеграција ових функционалности омогућила би прелазак са пасивног мониторинга на интелигентне системе управљања условима унутрашњег окружења.

Будућа истраживања могу бити усмерена и на развој персонализованих система процене изложености. Комбинацијом података о концентрацијама, времену боравка, активностима корисника и резултата персоналног мониторинга могуће је развити моделе реалне изложености, што би имало значајан потенцијал у области јавног здравља и превенције хроничних обољења.

Додатни правац даљег развоја односи се и на примену *Big Data* и *cloud* технологија. Велики обим података који генеришу *IoT* системи омогућава развој система раног упозорења и предиктивних модела. Такви системи не би само пратили тренутно стање ваздуха, већ би могли да предвиђају потенцијално ризичне услове и да предложе или активирају корективне мере.

Поред техничких и научних аспеката, потребан је даљи развој нормативног оквира за примену *low-cost* система у мониторингу квалитета унутрашњег ваздуха. Постојећи стандарди и регулативе углавном су усмерени на референтне методе, док примена *IoT* и *low-cost* сензорских система још увек није довољно стандардизована. Резултати ове дисертације представљају основу за развој техничких смерница, дефинисање процедура валидације, увођење *IAQI* концепта и развој стандарда за системе мониторинга унутрашњег ваздуха.

Укупно посматрано, резултати докторске дисертације отварају простор за даљи развој напредних система проактивног мониторинга квалитета унутрашњег ваздуха. Иако *PM-MoN* систем има одређена ограничења, истраживање је показало да интеграција *low-cost* сензора, *IAQI* модела, *IoT* технологија и напредне анализе података представља перспективан приступ са значајним научним и практичним потенцијалом за управљање квалитетом унутрашњег ваздуха.

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Аца Божилов је рођен 1984. године у Нишу. Основну школу „Георги Димитров“ и средњу школу „Гимназија Босилеград“ завршио је у Босилеграду као носилац дипломе „Вук Караџић“. Студије на Факултету заштите на раду Универзитета у Нишу завршио је 2012. године са просеком 9,63 и стекао звање дипломирани инжењер заштите од пожара. Током студија био је стипендиста Града Ниша и Републичке фондације за развој научног и уметничког подмлатка.

Од 2013. запослен је на Факултету заштите на раду у Нишу као сарадник – асистент за ужу научну област Управљање квалитетом радне и животне средине. Ангажован је на предметима Ризик од опасних материја, Управљање отпадом, Еколошки ризик, Пречишћавање индустријских отпадних материја, Процена утицаја на животну средину и Заштита ваздуха на основним академским студијама, као и на предметима Управљање отпадом, Управљање индустријским отпадом, Управљање пројектима, Управљање комуналним отпадом, Мониторинг животне средине, Мониторинг аерозагађења и квалитета ваздуха и Тактика интервенција и спасавања на мастер академским студијама.

Поред наставног рада, учествовао је у стручним, организационим и развојним активностима Факултета кроз рад у Савету Факултета, Канцеларији за међународну сарадњу, Центру за управљање ризиком у радној и животној средини и Лабораторији за управљање квалитетом ваздуха.

Као истраживач учествовао је на пројектима „Мониторинг електромагнетних зрачења мобилних телекомуникационих система у животној средини, анализа молекуларних механизама и биомаркера оштећења код хроничне изложености са развојем модела за процену ризика и метода за заштиту“ (III 43012) и „Унапређење система мониторинга и процене дуготрајне изложености становништва загађујућим супстанцама у животној средини применом неуронских мрежа“ (III 43014).

Научноистраживачки рад Аце Божилова усмерен је на квалитет ваздуха, мониторинг аерозагађења, примену сензорских технологија и развој система за праћење параметара животне средине у реалном времену. Аутор је и коаутор више научних радова објављених у међународним часописима и конференцијама.

ИЗЈАВЕ АУТОРА

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

РАЗВОЈ СИСТЕМА ПРОАКТИВНОГ МОНИТОРИНГА СУСПЕНДОВАНИХ ЧЕСТИЦА У УНУТРАШЊЕМ ВАЗДУХУ ЈАВНИХ ОБЈЕКАТА

која је одбрањена на Факултету Заштите на раду у Нишу Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио ауторска права, нити злоупотребио интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 12.06.2026. године

Потпис аутора дисертације:

Аца Божилов

Аца В. Божилов

ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНОГ И ЕЛЕКТРОНСКОГ ОБЛИКА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов дисертације:

РАЗВОЈ СИСТЕМА ПРОАКТИВНОГ МОНИТОРИНГА СУСПЕНДОВАНИХ ЧЕСТИЦА У УНУТРАШЊЕМ ВАЗДУХУ ЈАВНИХ ОБЈЕКАТА

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу,** истоветан штампаном облику.

У Нишу, 12.06.2026. године

Потпис аутора дисертације:

Аца Божилов

Аца В. Божилов

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

РАЗВОЈ СИСТЕМА ПРОАКТИВНОГ МОНИТОРИНГА СУСПЕНДОВАНИХ ЧЕСТИЦА У УНУТРАШЊЕМ ВАЗДУХУ ЈАВНИХ ОБЈЕКАТА

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио.

1. Ауторство **(CC BY)**
2. Ауторство – некомерцијално **(CC BY-NC)**
3. **Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима **(CC BY-NC-SA)**
5. Ауторство – без прераде **(CC BY-ND)**
6. Ауторство – делити под истим условима **(CC BY-SA)**

У Нишу, 12.06.2026. године

Потпис аутора дисертације:

Аца Божилов

Аца В. Божилов