

UNIVERZITET UNION NIKOLA TESLA  
FAKULTET ZA GRADITELJSKI MENADŽMENT

LAZAR MILIVOJEVIĆ

**PRAĆENJE I ANALIZA KVALITETA VAZDUHA I METEOROLOŠKIH  
PARAMETARA NA GRADILIŠTU PUTEM IoT-a**

doktorska disertacija

Beograd, 2023.

**UNIVERSITY UNION NIKOLA TESLA**  
**FACULTY OF CONSTRUCTION MANAGEMENT**

**LAZAR MILIVOJEVIĆ**  
**MONITORING AND ANALYSIS OF AIR QUALITY AND**  
**METEOROLOGICAL PARAMETERS ON THE CONSTRUCTION SITE BY**  
**IoT**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023.

## **Mentor**

Dr Sanja Mrazovac Kurilić, redovni profesor, Univerzitet „Union-Nikola Tesla“,  
Fakulteta za ekologiju i zaštitu životne sredine

## **Komisija**

Dr Darinka Golubović Matić, dipl. Inž. Građ., vanredni profesor, predsednik

Komisije, Univerzitet „Union – Nikola Tesla“, Fakultet za graditeljski menadžment.

Dr Zvonimir Božilović, dipl. Inž. Građ., vanredni profesor, član, Univerzitet „Union-  
Nikola Tesla“, Fakultet za graditeljski menadžment.

Dr Ljubo Marković, dipl. Inž. Građ., redovni profesor, spoljni član komisije,

Fakultet Tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Univerzitet u Prištini sa

Privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici;

## **ZAHVALNOST**

*Svoju zahvalnost želim da izrazim mentorki prof. dr Sanji Mrazovac Kurilić kao i profesorima Fakulteta za graditeljski menadžment koji su doprineli realizaciji ove disertacije.*

*Zahvalnost dugujem direktoru i kolektivu građevinskog preduzeća „Graditelj Inženjering“. za pomoć u obezbeđivanju i pripremi podataka koji su bili neophodni za sprovođenje istraživanja.*

*Posebna zahvalnost pripada mojoj porodici za podršku, ljubav i razumevanje.*

## KLJUČNA DOKUMENTACIONA INFORMACIJA

|                          |  |
|--------------------------|--|
| UDK                      |  |
| Tip dokumenta (TD)       | Monografska publikacija  |
| Tip zapisa (TZ)          | Tekstualni štampani materijal  |
| Vrsta rada (VR)          | Doktorska disertacija  |
| Autor (AU)               | Lazar Milivojević  |
| Mentor/Ko-mentor(MN)     | Prof.dr Sanja Mrazovac Kurilić   |
| Naslov rada (NR)         | PRAĆENJE I ANALIZA KVALITETA<br>VAZDUHA I METEOROLOŠKIH<br>PARAMETARA NA GRADILIŠTU<br>PUTEM IoT-a |
| Jezik publikacije (JP)   | Srpski   |
| Zemlja publikovanja (ZP) | Republika Srbija   |
| Geografsko područje (GP) | Srbija   |
| Godina izdavanja (GI)    | 2023   |
| Izdavač (IZ)             | Autorski reprint   |
| Mesto i adresa (MS)      | 11 000 Beograd, Srbija,<br>Cara Dušana 62-63   |

|  |  |
|--|--|
| Fizički obim rada (FO)<br>(broj poglavlja/strana/literaturnih<br>citata/tabela/slika/šema/grafikona) | Poglavlja 5 / strana 98/ literaturnih<br>citata 21 /tabela 15 / slika 21 |
| Naučna oblast (NO)   | Tehničko-tehnološke nauke  |
| Naučna disciplina (ND)   | Građevinarstvo   |
| Predmetna odrednica/ključne reči (PO)  | konstrukcija; koncentracije PM;<br>korelacija; meteorologija             |
| Čuva se (ČU)   | Biblioteka Univerziteta „Union-<br>Nikola Tesla“, Beograd.               |
| Važna napomena   | nema   |
| Datum prihvatanja teme od strane NN veća<br>(DP)   |  |
| Datum odbrane (DO)   |  |

## KEY WORDS DOCUMENTATION

|                              |  |
|------------------------------|--|
| UC                           |  |
| Document Type (DT)           | Monographic publication  |
| Tip of Record (TR)           | Textual printed article  |
| Contains Code (CC)           | Ph. D. thesis  |
| Author (AU)                  | Lazar Milivojević  |
| Mentor/Co-mentor             | Dr Sanja Mrazovac Kurilić  |
| Title (TI)                   | MONITORING AND ANALYSIS OF<br>AIR QUALITY AND<br>METEOROLOGICAL<br>PARAMETERS ON THE<br>CONSTRUCTION SITE BY IoT |
| Language of Text (LT)        | Serbian  |
| Contry of Publication (CP)   | Serbia   |
| Locality of Publication (LP) | Serbia   |
| Publication Year (PY)        | 2023   |
| Publication Place (PP)       | 11 000 Belgrade Serbia Cara Dusana<br>62-63  |

|  |  |
|--|--|
| Physical Description (PD)<br>(chapters/pages/literature/table/<br>pictures/scheme/graphs./annex) | Chapters 5/Pages 98/ literature 21/<br>tables /pictures      |
| Scientific Fields (SF)   | technical and technological sciences                         |
| Scientific Discipline (SD)   | Construction   |
| Subject/key words (CX)   | Construction; PM concentrations;<br>correlation; meteorology |
| Holding Data (HD)  | Library of University<br>“Union-Nikola Tesla“, Belgrade      |
| Note (N)   | None   |
| Accepted by Scientific Board on<br>(ABC)   |  |
| Defended on (DE)   |  |



# **PRAĆENJE I ANALIZA KVALITETA VAZDUHA I METEOROLOŠKIH PARAMETARA NA GRADILIŠTU PUTEM IoT-a**

## **REZIME**

Građevinska industrija je jedan od glavnih proizvođača prašine, gasova staklene bašte i zagađivača vazduha. Efikasno funkcionisanje i upravljanje operacijama na gradilištu može značajno smanjiti ugljenični otisak projekta i druge uticaje na životnu sredinu. Saradnjom naučno-istraživačke ustanove i građevinske kompanije realizovano je praćenje kvaliteta vazduha na gradilištu u realnom vremenu korišćenjem IoT tehnologija. Implementiran je sistemski okvir zasnovan na IoT-u koji integriše distribuiranu senzorsku mrežu za prikupljanje podataka u realnom vremenu i demonstriranje kvaliteta vazduha na gradilištu. Različiti tipovi senzora su korišćeni za prikupljanje podataka koji se odnose na NO<sub>2</sub> i PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> čestice, kao i meteorološke parametre – brzinu i smer vetra, vlažnost, pritisak i temperaturu. Rezultati merenja u realnom vremenu daju sliku stanja zagađenosti vazduha na gradilištu i povezanost sa građevinskim aktivnostima kojima se može upravljati u cilju smanjenja koncentracije zagađujućih gasova i suspendovanih čestica. Praćenjem gradilišta na licu mesta u gradu Beogradu, ova studija je utvrdila da je nivo prašine u građevinskim aktivnostima relativno visok. Upoređujući pravac vetra i koncentracije PM, može se zaključiti da je građevinska aktivnost imala značajan uticaj na kvalitet vazduha u okolini građevinskog područja. Što se tiče glavnih faktora koji utiču na emisiju građevinske prašine, korelacije pokazuju da emisija građevinske prašine nije u značajnoj korelaciji sa meteorološkim faktorima.

**Ključne reči:** konstrukcija; koncentracije PM; korelacija; meteorologija

**MONITORING AND ANALYSIS OF AIR QUALITY AND  
METEOROLOGICAL PARAMETERS ON THE CONSTRUCTION SITE BY  
IoT**

**ABSTRACT**

The construction industry is one of the main producers of dust, greenhouse gases and air pollutants. Effective operation and management of construction site operations can significantly reduce the project's carbon footprint and other environmental impacts. Through the cooperation of scientific and research institution and construction company, real-time monitoring of air quality at the construction site was implemented using IoT technologies. An IoT-based system framework that integrates a distributed sensor network to collect real-time data and demonstrate air quality at a construction site was implemented. Different types of sensors were used to collect data related to NO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> particles, as well as meteorological parameters – wind speed and direction, humidity, pressure and temperature. The results of real-time measurements provide a picture of the state of air pollution at the construction site and the connection with construction activities that can be managed in order to reduce the concentration of polluting gases and suspended particles. Through on-site monitoring of construction site in Belgrade City, this study found that the dust level of construction activities is relatively high. Comparing the wind direction and PM concentrations, it can be concluded that the construction activity had a significant impact on the air quality around the construction surrounding areas. Regarding the main factors affecting the building construction dust emission, the correlations show that building construction dust emission was not significantly correlated with meteorological factors.

**Key words:** construction; PM concentrations; correlation; meteorology

## POPIS SLIKA

Slika 1. Lokacija gradilišta na mapi Beograda

Slika 2. Skica gradilišta sa označenim pozicijama mernog uređaja, zone iskopa, kao i drugih potencijalnih izvora emisije

Slika 3. RS-MG111-WIFI-1 (Reinke) uređaj

Slika 4. CC-M12 meteorološka stanica

Slika 5. Grafik toka istraživanja

Slika 6a. Vremenska zavisnost koncentracije  $PM_{2,5}$  čestica u vazduhu na gradilištu tokom radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevni podaci)

Slika 6b. Vremenska zavisnost koncentracije  $PM_{2,5}$  čestica u vazduhu na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Slika 7a. Vremenska zavisnost koncentracije  $PM_{10}$  čestica u vazduhu na gradilištu tokom radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevni podaci)

Slika 7b. Vremenska zavisnost koncentracije  $PM_{10}$  čestica u vazduhu na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Slika 8. Prikazana je srednja koncentracija  $PM_{10}$  i  $PM_{2,5}$  u vazduhu (minimalna, 1. kvartil, medijana i srednja vrednost, 3. kvartil i maksimalna, kao i autlajeri) na

gradilištu tokom radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Slika 9a. Vremenska zavisnost koncentracije  $\text{NO}_2$  u vazduhu na gradilištu tokom radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevni podaci)

Slika 9b. Vremenska zavisnost koncentracije čestica  $\text{NO}_2$  u vazduhu na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Slika 10. Prikazana je srednja koncentracija  $\text{NO}_2$  u vazduhu (minimalna, 1. kvartil, medijana i srednja vrednost, 3. kvartil i maksimalna, kao i autlajeri) na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci iz radnog vremena)

Slika 11a. Vremenska zavisnost vazdušnog pritiska na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevni podaci)

Slika 11b. Vremenska zavisnost pritiska vazduha na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Slika 12. Atmosferski pritisak (prikazani su minimalni, 1. kvartil, medijana i srednja vrednost, 3. kvartil i maksimalni, kao i autlajeri) na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Slika 13a. Vremenska zavisnost temperature i vlažnosti na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevni podaci)

Slika 13b. Vremenska zavisnost temperature i vlažnosti na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Slika 14. Temperatura i vlažnost vazduha (minimalna, 1. kvartil, medijana i srednja vrednost, 3. kvartil i maksimum, kao i graničnici su prikazani) na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Slika 15a. Vremenska zavisnost brzine vetra na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevni podaci)

Slika 15b. Vremenska zavisnost brzine vetra na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Slika 16. Brzina vetra na gradilištu (prikazana je minimalna, 1. kvartil, medijana i srednja vrednost, 3. kvartil i maksimalna, kao i autlajeri) u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Slika 17. Zavisnost koncentracije PM<sub>10</sub> i PM<sub>2.5</sub> čestica na gradilištu u zavisnosti od pravca vetra

Slika 18. Ruže zagađenja za NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, i PM<sub>2.5</sub> (koncentracije u µg/m<sup>3</sup>)

Slika 19. CPF za NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> i PM<sub>2.5</sub> koncentracije iznad 75. percentila

Slika 20. Prikaz lejera ANN

Slika 21. Rezultati ANN modela

## **POPIS TABELA**

Tabela 1 Osnovna statistička analiza merenih parametara

Tabela 2 Vrednosti koeficijenta linearne korelacije između merenih parametara

Tabela 3 Vrednosti Spearmanovog koeficijenta korelacije između merenih parametara

Tabela 4 Rezime modela (R-koeficijent korelacije, R kvadratni koeficijent determinacije, Std.Error of the Estimate-standardna greška procene) za predviđanje NO<sub>2</sub>

Tabela 5 ANOVA tabela (Df-stepeni slobode, F- odnos između grupnih varijacija i varijacija unutar grupe, nivo značajnosti) za predviđanje NO<sub>2</sub>

Tabela 6 Koeficijenti modela (t-t-statistika; Sig.-značajnost) za predviđanje NO<sub>2</sub>

Tabela 7 Rezime modela (R-koeficijent korelacije, R kvadratni koeficijent determinacije, Std.Error of the Estimate-standardna greška procene) za predviđanje PM<sub>10</sub>

Tabela 8 ANOVA tabela (Df-stepeni slobode, F- odnos između grupnih varijacija i varijacija unutar grupe, nivo značajnosti) za predviđanje PM<sub>10</sub>

Tabela 9 Koeficijenti modela (t-t-statistika; Sig.-značajnost) za predviđanje PM<sub>10</sub>

Tabela 10 Rezime modela (R-koeficijent korelacije, R kvadratni koeficijent determinacije, Std.Error of the Estimate-standardna greška procene) za predviđanje PM<sub>2.5</sub>

Tabela 11 ANOVA tabela (Df-stepeni slobode, F- odnos između grupnih varijacija i varijacija unutar grupe, nivo značajnosti) za predviđanje PM<sub>2.5</sub>

Tabela 12 Koeficijenti modela (t-t-statistika; Sig.-značajnost) za predviđanje PM<sub>2,5</sub>

Tabela 13 Rezime modela

Tabela 14 Informacije o mreži

Tabela 15 Rezultati modela

# Sadržaj

|   |    |
|---|----|
| UVOD.....   | 17 |
| Glava I.....  | 20 |
| ODRŽIVA GRADNJA.....  | 20 |
| Kvalitet vazduha i građevinski radovi.....                                      | 22 |
| Mere prevencije .....   | 26 |
| Monitoring vazduha na gradilištima .....  | 29 |
| Glava II.....   | 32 |
| ZNAČAJ UPOTREBE INTERNETA STVARI (IoT) NA GRADILIŠTIMA.....                     | 32 |
| Predikcioni modeli kvaliteta vazduha i koncentracije zagađenja .....            | 38 |
| Glava III.....  | 43 |
| EKSPERIMENTALNI DEO-METODOLOGIJA.....   | 43 |
| Glava IV .....  | 50 |
| REZULTATI I DISKUSIJA .....   | 50 |
| Glava V .....   | 79 |
| PREDIKCIONI MODELI.....   | 79 |
| Model predviđanja koncentracija zagađujućih supstanci u vazduhu: MLR model..... | 79 |
| Model predviđanja koncentracija zagađujućih supstanci u vazduhu: ANN model..... | 85 |
| ZAKLJUČAK .....   | 92 |
| Literatura.....   | 94 |



## UVOD

Faze građevinskih projekata obuhvataju važne korake i procese od početka do završetka gradnje. Uobičajeno, gradilište prolazi kroz sledeće faze:

1. Planiranje: Ova faza uključuje istraživanje potreba, identifikovanje ciljeva i izradu detaljnog plana projekta. To obuhvata utvrđivanje budžeta, odabir lokacije, izradu projektnih dokumenata te dobijanje potrebnih dozvola i odobrenja.
2. Projektovanje: Tokom ove faze, inženjeri i arhitekta razrađuju tehničke detalje i specifikacije projekta. To uključuje izradu nacрта, planova, statičkih proračuna, te odabir materijala i opreme potrebnih za izgradnju.
3. Nabavka materijala: U ovoj fazi, materijali i oprema potrebni za gradnju se naručuju i dostavljaju na gradilište. Ovo je ključna faza jer pravilna nabavka osigurava da će radovi teći glatko.
4. Izvođenje radova: Ovo je faza gde počinje fizička gradnja. Građevinari izvode razne zadatke, poput temeljenja, zidarskih i armiračkih radova, instalacija električnih i vodovodnih sistema te postavljanja krova.
5. Kontrola kvaliteta: Tokom gradnje, vrše se redovne provere i testiranja kako bi se osigurala kvaliteta izvedenih radova i usklađenost sa projektom.
6. Završni radovi: Ova faza uključuje uređenje enterijera i eksterijera, završno bojenje, polaganje podnih obloga te ugradnju vrata i prozora.

7. Ispravke i dorade: Nakon što je projekat završen, vrši se završna inspekcija kako bi se otkrile moguće greške i nedostaci. Svaka pronađena nesukladnost se ispravlja.

8. Predaja projekta: Kada su svi radovi dovršeni i odobreni, projekat se predaje investitoru ili vlasniku.

Faze radova na gradilištu su ključni elementi uspešne gradnje, jer dobro planiranje, organizacija i saradnja svih aktera osiguravaju kvalitetnu izvedbu projekta. Upravljanje gradilištima podrazumeva koordinaciju i organizaciju resursa, ljudi i opreme kako bi se građevinski projekti izveli uspešno, u skladu s planovima i budžetom. To uključuje procenu rizika, planiranje, upravljanje vremenom i troškovima, kao i nadzor nad izvođenjem radova. Naučna osnova obuhvata primenu inženjerskih principa, ekonomske analize, tehnoloških inovacija i normi za bezbednost i kvalitet u građevinarstvu. Upravljanje građevinskim projektima može biti složen proces koji zahteva saradnju različitih stručnjaka iz oblasti inženjerstva, arhitekture, ekonomije i prava. Cilj je ostvariti efikasnost, smanjiti rizike i obezbediti da se radovi izvrše u skladu sa zahtevima naručioca i standardima industrije.

Jedan od ključnih elemenata upravljanja građevinskim poslovima je procena rizika i planiranje projekta kako bi se identifikovali mogući problemi i izazovi. Kvalitetan menadžment podrazumeva izradu detaljnog plana rada, raspoređivanje resursa, kontrolu troškova i nadzor nad izvođenjem radova. Sve to omogućava postizanje kvalitetnog izvršenja građevinskih projekata u zadatim rokovima i budžetima. (Novaković, 2003)

Upravljanje građevinskim poslovima i zaštita životne sredine su dva ključna aspekta modernog građevinarstva. Upravljanje građevinskim poslovima podrazumeva planiranje, organizaciju, kontrolu i koordinaciju resursa kako bi se postigao uspešan i

efikasan izvršetak građevinskih projekata. S druge strane, zaštita životne sredine u građevinskom sektoru odnosi se na primenu održivih praksi koje minimiziraju negativan uticaj na okolinu i prirodu. U kontekstu zaštite životne sredine, građevinski sektor ima značajan uticaj na prirodu i okolinu. Održivi razvoj postaje sve važniji, i kao odgovor na to, mnoge građevinske kompanije primenjuju "zelene" prakse kako bi smanjile negativni uticaj na okoliš. Ovo uključuje recikliranje građevinskog otpada, korišćenje ekološki prihvatljivih materijala, optimizaciju energetske efikasnosti, upravljanje vodom i upotrebu obnovljivih izvora energije. Upravljanje otpadom na gradilištu igra ključnu ulogu u smanjenju ekološkog opterećenja. Otpadni materijali, kao što su betonski ostaci, gips, drvo i ostali materijali, mogu se reciklirati i ponovo upotrebiti u novim projektima. Ovo smanjuje potrebu za odlaganjem otpada na deponije, što pozitivno utiče na zaštitu životne sredine. Takođe, upravljanje potrošnjom vode na gradilištu može biti ključno. Primena efikasnih sistema za sakupljanje, skladištenje i upotrebu kišnice i reciklaža vode mogu značajno smanjiti potrošnju i uticaj na lokalne vodne resurse. U cilju povećanja energetske efikasnosti, mogu se primeniti tehnologije kao što su solarni paneli, geotermalna energija ili energetski efikasni materijali za izgradnju. To ne samo da smanjuje potrošnju energije i troškove, već i smanjuje emisije stakleničkih gasova.

Upravljanje građevinskim poslovima i zaštita životne sredine neophodni su za održivi razvoj i bolju budućnost. Kombinovanjem efikasnog menadžmenta sa ekološki osvešćenim praksama, građevinski sektor može doprineti zaštiti životne sredine i stvaranju održivijeg sveta.

## Glava I

### ODRŽIVA GRADNJA

Održiva gradnja predstavlja pristup projektovanju, izgradnji i upravljanju građevinama na način koji minimizira negativan uticaj na životnu sredinu, promoviše kvalitet životne sredine i poboljšava zdravlje ljudi. Održiva gradnja počinje planiranjem i dizajnom građevinskih projekata. Važno je uzeti u obzir ekološke faktore kao što su energetska efikasnost, upotreba obnovljivih izvora energije i materijala sa niskim uticajem na životnu sredinu. Dizajn treba promovisati dobru ventilaciju, prirodno osvetljenje i upotrebu održivih materijala. Materijali koji se koriste u građevinskim projektima imaju značajan uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi. Održiva gradnja podstiče upotrebu materijala koji su ekološki prihvatljivi, poput recikliranih materijala, drveta iz održivih izvora i materijala sa niskim sadržajem štetnih supstanci. Takođe, treba izbegavati materijale koji emituju štetne hemikalije, kao što je formaldehid.

Upravljanje otpadom je važan aspekt održive gradnje. Građevinski otpad treba minimizirati kroz reciklažu i ponovnu upotrebu materijala. Takođe, važno je primeniti strategije za smanjenje otpada tokom faze izgradnje i održavanja.

Održiva gradnja stavlja naglasak na energetska efikasnost građevina. To uključuje korišćenje visokoeffikasnih izolacionih materijala, energetska efikasna sistema grejanja, ventilacije i hlađenja, kao i upotrebu obnovljivih izvora energije poput solarnih panela i vetrogeneratora. Upravljanje energijom tokom faze izgradnje i eksploatacije takođe je važno za smanjenje potrošnje energije.

Održiva gradnja promovira dobar kvalitet unutrašnjeg vazduha. To se postiže pravilnom ventilacijom, upotrebom materijala sa niskim emisijama i minimalnim sadržajem štetnih supstanci. Smanjenje zagađenja unutrašnjeg vazduha ima pozitivan uticaj na zdravlje ljudi, smanjujući rizik od respiratornih bolesti i alergija.

Upravljanje vodom igra važnu ulogu u održivoj gradnji. To uključuje efikasno korišćenje vode tokom faze izgradnje i održavanja, kao i primenu mera za smanjenje potrošnje vode u građevinama, poput upotrebe uređaja za štednju vode i sistema za prikupljanje kišnice. Takođe, važno je razmotriti upotrebu održivih metoda za tretman otpadnih voda.

Održiva gradnja promovira integraciju zelenih prostora u građevinske projekte. Zeleni krovovi, vertikalni vrtovi i unutrašnji vrtovi poboljšavaju kvalitet životne sredine pružajući dodatnu izolaciju, smanjujući urbani toplotni otok i pružajući prostor za rekreaciju. Zeleni prostori takođe imaju pozitivan uticaj na mentalno zdravlje ljudi, smanjujući stres i podstičući oporavak.

Postoje brojni sertifikati i standardi koji podržavaju održivu gradnju, poput LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) i BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method). Ovi sertifikati promoviraju integraciju održivih praksi i sistema tokom čitavog životnog ciklusa građevine.

Održiva gradnja predstavlja neophodan pristup u savremenom svetu, sa ciljem smanjenja negativnog uticaja na životnu sredinu i poboljšanja kvaliteta života ljudi. Upravljanje građevinskim radovima ima ključnu ulogu u postizanju održivosti, kroz planiranje, dizajn, izbor materijala, energetska efikasnost, upravljanje otpadom, kvalitet unutrašnjeg vazduha, upravljanje vodom, integraciju zelenih prostora, kao i sertifikaciju

i primenu standarda. Kombinacija ovih mera omogućava stvaranje građevina koje su ekološki prihvatljive, energetske efikasne, zdrave za ljude i podstiču kvalitet životne sredine. Ova disertacija će istražiti ključne aspekte održive gradnje, sa fokusom na upravljanje građevinskim radovima i njegov uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi kroz poboljšanje kvaliteta vazduha na gradilištu.

Kvalitet vazduha i građevinski radovi

Sa nadolazećim posledicama klimatskih promena, mere održivosti, uključujući kvantifikovanje količine zagađenja vazduha tokom različitih vrsta delatnosti, postale su važan cilj u svim granama privrede, uključujući i građevinsku industriju. Sva gradilišta stvaraju visok nivo zagađenja tokom dužeg vremenskog perioda. Građevinska industrija je jedan od glavnih proizvođača gasova sa efektom staklene bašte (GHG) sa učešćem od oko 12% u ukupnim svetskim emisijama. Prema zvaničnim podacima Komiteta za kontrolu zagađenja Delhija (DPCC), 30% zagađenja vazduha prašinom uzrokovano je emisijama sa gradilišta. Različite građevinske aktivnosti kao što su iskopavanje, rad dizel motora, rušenje, spaljivanje i rad sa toksičnim materijalima doprinose zagađenju vazduha. Glavni faktor koji doprinosi zagađenju vazduha oksidima azota i sumpora tokom građevinskih projekata je upotreba teške opreme, tj. mašine (bageri, utovarivači, buldožeri itd.) kao rezultat sagorevanja goriva koje koriste ove mašine. Zagađenje PM česticama uglavnom se pripisuje radovima na iskopavanju. Značajan izvor PM<sub>2,5</sub> čestica na gradilištima su izduvni gasovi iz dizel motora i dizel agregata, vozila i teške opreme. Zagađenju vazduha doprinose i štetne materije iz ulja, lepkova, rastvarača, boja, tretiranog drveta, plastike, sredstava za čišćenje i drugih opasnih hemikalija koje se široko koriste na gradilištima.

Srbija je na Balkanu lider u građevinskoj industriji, koja raste iz godine u godinu. U avgustu 2022. godine izdate su 2.562 građevinske dozvole. Ovaj trend izgradnje obećava dalje značajno povećanje koncentracije gasova staklene bašte i drugih zagađujućih supstanci. Iz ovih razloga je pre svega neophodno uvesti praćenje zagađujućih gasova i PM čestica u realnom vremenu kako bi se kroz uvid u količinu prisutnog zagađenja i zavisno od atmosferskih uslova predložile mere za smanjenje koncentracije zagađujućih gasova i PM čestica.

Povećanje obima građevinskih aktivnosti, uključujući izgradnju, rušenje objekata, ugradnju opreme, i tako dalje, ima uticaj na pogoršanje zagađenja čestičnim materijama. Većina građevinskih aktivnosti se odvijaju na licu mesta i organizovane su na otvorenom na samom gradilištu. Pored toga, transport materijala, utovar i istovar, formiranje zaliha materijala, zemljani radovi i skladištenje materijala za odvoz na deponiju uzrokuju velike i neizbežne emisije. Krupnije čestice nastale usled pomenutih emisija imaju tendenciju da se talože a površini gradilišta ubrzo nakon emisije. Međutim, male čestice imaju tendenciju da lebde nošene vetrom i ulaze u atmosferu te formiraju suspendovane čvrste materije koje su opšte poznata kao građevinska prašina.

Formiranje građevinske prašine je široko rasprostranjeno i dug niz godina proučavano od strane naučnika, što je uključivalo tehnike monitoringa prašine i ostalih zagađujućih supstanci, faktore emisije prašine, difuziju prašine, karakteristike zagađenja prašinom, procena opasnosti po zdravlje i prevenciju od prašine i mere kontrole.

Iako emisije štetnih materija u građevinarstvu postaju sve značajnije zbog ubrzanog trenda izgradnje u Srbiji, alat za praćenje emisija u realnom vremenu, koji je neophodan da pomogne građevinskim timovima da izbegnu prekomerne emisije štetnih materija,

još uvek nije razvijen i uveden na gradilišta u Republici Srbiji. Veliki značaj primene ovog sistema i sprovođenja ove vrste istraživanja bio bi evidentan kakad je u pitanju zdravlje zaposlenih na gradilištu koji zbog loših uslova rada, odnosno lošeg kvaliteta vazduha na gradilištima, često imaju zdravstvene probleme, što ponekad ugrožava živote radnika.

Čvrste čestice (PM) su jedan od najčešćih zagađivača vazduha u svetu, kao i oksidi azota (NO<sub>x</sub>), fotohemijski oksidanti uključujući ozon (O<sub>3</sub>), ugljen monoksid (CO), olovo (Pb) i sumpor dioksid (SO<sub>2</sub>) (EPA, 2021).

PM (čestice suspendovane u vazduhu) predstavljaju značajan problem na gradilištima i imaju ozbiljan uticaj na zdravlje radnika, kao i na okolinu. PM čestice su vrsta zagađenja vazduha koje dolaze iz različitih izvora, uključujući industrijske aktivnosti, saobraćaj, spaljivanje goriva i, naravno, građevinske radove.

Na gradilištima, PM čestice se često oslobađaju tokom različitih građevinskih aktivnosti, kao što su rušenje, kopanje, brušenje, sečenje, betoniranje i sušenje maltera. Ove čestice mogu biti posebno opasne jer su sitne i mogu dospovati duboko u respiratorni sistem kada se udišu. Takođe, čestice mogu sadržati različite štetne supstance kao što su teški metali, polutanti, organski spojevi i druge toksične materije.

Izlaganje PM česticama može izazvati niz zdravstvenih problema kod radnika na gradilištu, uključujući respiratorne tegobe kao što su kašalj, otežano disanje, bronhitis i astmu. Dugotrajna izloženost PM česticama može dovesti do ozbiljnijih problema sa plućima i srčano-krvnim sistemom, posebno kod osoba koje su već podložne respiratornim i kardiovaskularnim oboljenjima.



Pored negativnog uticaja na zdravlje radnika, PM čestice mogu imati štetan efekat na okolinu. One mogu kontaminirati tlo i vode, što može imati dalekosežne posledice na biljni i životinjski svet. Takođe, PM čestice mogu pridoneti zagađenju vazduha u okolini gradilišta, što može pogoršati kvalitet vazduha u urbanim područjima.

Svest o problemu PM čestica na gradilištima postaje sve veća, a regulatorne agencije i građevinske kompanije preduzimaju korake kako bi smanjile ovu vrstu zagađenja. Korišćenje adekvatne zaštitne opreme (respiratora, naočara, zaštitnih odela itd.) je važno za zaštitu radnika od izlaganja PM česticama. Takođe, primena tehnologija koje smanjuju emisiju čestica tokom građevinskih radova, kao i usvajanje održivih praksi u građevinarstvu, mogu doprineti smanjenju negativnog uticaja na okolinu.

Ukupno, upravljanje PM česticama na gradilištima zahteva svest o problemu, adekvatne mere zaštite i primenu tehnologija koje smanjuju emisiju zagađujućih čestica, kako bi se zaštitilo zdravlje radnika i očuvala čistija i zdravija životna sredina. Poslednjih nekoliko godina rađena su istraživanja o uticaju na koncentraciju prašine na gradilištima, sa fokusom na  $PM_{10}$  i  $PM_{2,5}$  (Yan i sar., 2019; Hassan i sar., 2016; Moraes i sar., 2011). Utvrđeno je da postoji niz faktora koji utiču na koncentraciju PM čestica na gradilištu. Svakako, sama okolina gradilišta predstavlja izvor određenih emisija koje se transportuju i registruju na samom gradilištu, nezavisno od aktivnosti na gradilištu. To su takozvane pozadinske emisije. Kada je reč o meteorološkim faktorima, urađeno je više studija o povezanosti meteoroloških parametara i koncentracije zagađujućih materija (uključujući i PM čestice), a na tu temu postoje oprečni stavovi. Neki autori (Araújo i sar., 2014) smatraju da meteorologija ima izuzetno važan uticaj na koncentraciju PM čestica na gradilištu, iako zbog nedostatka podataka o koncentraciji nisu uspeali da razviju model zavisnosti koncentracije PM čestica od meteoroloških

parametara. Prema nekim drugim autorima (Zhang i sar., 2009), emisije prašine sa gradilišta imaju značajne sezonske promene, što su potvrdili i drugi istraživači u svojim istraživanjima (Zhao i sar., 2010). Ovo opet ukazuje na jaku vezu između koncentracije PM čestica i meteoroloških parametara. U nekim istraživanjima (Guo, 2010; Luo, 2017) koja su takođe proučavala vezu između građevinskih radova i meteoroloških parametara, zaključeno je da su PM čestice u visokoj pozitivnoj korelaciji sa brzinom vetra i relativnom vlažnošću vazduha, a slabo sa temperaturom. Pored radova na iskopavanju, određeni doprinos emisiji imaju i unutrašnji radovi na zgradama. Kinsey i sar. (2004) su otkrili da vozila koja napuštaju gradilište mogu da prenesu veliku količinu prašine i sedimenta na obližnje puteve, što dovodi do podizanja sekundarne prašine. Azarmi i sar. (2014) izvršili su detaljno praćenje pojedinih faza radova na gradilištu, kao što su mešanje betona, bušenje i sečenje. Koncentracije PM čestica tokom aktivnosti bušenja i sečenja bile su i do 14 puta veće od pozadinskih koncentracija. Moraes i sar. (2016) fokusirali su se na praćenje koncentracije čestica (PM10) nastalih od betona i zidarskih radova u građevinskim aktivnostima. Ova i slična istraživanja su pokazala da su određene faze i aktivnosti tokom rada na gradilištima važan faktor koji utiče na koncentraciju PM čestica. (Fan i sar., 2011)

#### Mere prevencije

Prašina koja nastaje prilikom izgradnje je naučno opisana kao emisija građevinske prašine (CDE) koja se dešava usled niza aktivnosti na licu mesta kao što su bušenje, utovar i istovar, iskopavanje, skladištenje materijala na otvorenom, sečenje i punjenje i transport rasutog materijala koji dovodi do štetnog uticaja na ljude. Na primer, u Kini,

gde je građevinska prašina 27% odgovorna za nanošenje štete ljudskom zdravlju usled drugih faktora građevinskog zagađenja.

Postoji nekoliko saveta pomoću kojih se može kontrolisati prašina na gradilištima:

### ***Voda***

Za kontrolu prašine može se koristiti voda koja se smatra najefikasnijim i odličnim rešenjem. Vodu treba nanositi nekoliko puta dnevno, u zavisnosti od atmosferskih uslova. Količina vode koja se nanosi treba pažljivo upravljati kako bi se sprečio višak vode koji može izazvati probleme erozije. Cisterna za vodu se vozi na licu mesta raspršujući vodu preko pogodnih područja sprečavajući da se prašina unese u vazduh.

### ***Čišćenje***

Skupljanje čestica prašine je važno, ali još jedan najvažniji savet je čišćenje mesta na kraju svakog dana. Međutim, tamo gde većina ljudi preferira metlu ili krpu za brisanje prašine, preporučuje se upotreba usisivača jer metlanje može da oduva čestice prašine iz pukotina u vazduhu.

### ***Obrada zemljišta***

Ova mera se pokazala kao jedna od najefikasnijih kada je u pitanju kontrola nad erozijom vetra. Za najbolji rezultat, treba da postavi najmanje 15 cm brazde normalno na smer vetra. Na taj način se može u velikoj meri smanjiti erozija vetra, a samim tim i kontrola prašine.

### ***Vegetacija i malčiranje***

Malčiranje je jedna od najistaknutijih metoda koje se koristi u poljoprivredi, a efikasno je 80% i na gradilištima. Budući da je najbolja alternativa vodi, ova „zelena“ metoda može pomoći u sprečavanju erozije tla i zaštiti rastresito tlo.

### ***Korišćenje barijera za kontrolu prašine***

Pravljenje ograde koja pokriva oblasti sečenja i mešanja stvari može sprečiti mnogo prašine koja lebdi u vazduhu. Ova metoda možda neće sprečiti prašinu u tolikoj meri kao druge metode, ali može pomoći u njenom zadržavanju.

### ***Način odlaganje peska i drugog materijala***

Odlaganje peska koji se koristi u građevinarstvu može biti veliki doprinos širenju prašine u vazduhu. Zbog toga, prilikom utovara ili istovara takvog materijala, držite ga blizu zemlje ili zadnjeg dela kamiona.

### ***Plastični zid***

Separacija unutrašnjeg prostora tankim plastičnim zidom se smatra najefikasnijim tokom renoviranja i unutrašnjih radova, jer ljudi koji žive u kući dobijaju svoj lični prostor, a ostatak kuće je zaštićen od prašine.

### ***Nanošenje polimera***

Nanesite polimer na vrh zemlje, a zatim poprskajte vodu da biste stvorili zaptivku preko rastresitog tla. Ova jednostavna metoda je, međutim, efikasna na lokacijama gde ima manje saobraćaja.

### ***Prevoz materijala***

Druga mera za kontrolu prašine je prevoženje cementa i peska, i ostalog prašinastog materijala u zatvorenim ili pokrivenim cisternama. Štaviše, skladištenje u silosima bi bilo savršeno jer će sprečiti razduvavanje materijala.

### ***Ograničenje brzine***

Smanjenje brzine vozila na neasfaltiranim putevima može biti od velike koristi. Ograničavanje brzine može smanjiti emisiju prašine do 25%.

### ***Upotreba hlorida***

Hlorid će obezbediti potrebnu količinu vlage da spreči probleme povezane sa prašinom. Njegova prirodna higroskopnost omogućava mu da upije i zadržava vlagu iz okoline. Ovo omogućava proizvodu da zadrži tlo vlažnim i kontroliše prašinu čak i usred leta tokom vrućih i suvih uslova. Pomaže u stabilizaciji neasfaltiranih puteva.

### ***Redovna kontrola***

Neophodno je pratiti efikasnost svih mera ublažavanja i analizirati njihove rezultate, što je obaveza rukovodioca gradilišta.

### **Monitoring vazduha na gradilištima**

Monitoring vazduha na gradilištima ima izuzetan značaj za zaštitu zdravlja radnika, okoline i javnog zdravlja uopšte. Ovaj proces podrazumeva praćenje prisustva različitih zagađujućih materija i čestica u vazduhu koji se nalazi na gradilištu. Kroz sistematično prikupljanje i analizu podataka, monitoring vazduha obezbeđuje relevantne informacije

o kvalitetu vazduha, omogućava identifikaciju potencijalnih opasnosti i doprinosi donošenju informisanih odluka u vezi sa zaštitom radnika i okoline.

Neki od ključnih razloga zbog kojih je monitoring vazduha na gradilištima od izuzetnog značaja su:

1. Zaštita zdravlja radnika: Građevinski radnici su izloženi različitim zagađujućim materijama tokom svojih aktivnosti, kao što su PM čestice, azbest, azot-dioksid, sumpor-dioksid i druge štetne supstance. Redovnim monitoringom vazduha može se identifikovati koncentracija ovih materija i pravovremeno reagovati kako bi se sprečila izloženost na nivou koji bi mogao ugroziti zdravlje radnika.

2. Praćenje usklađenosti sa zakonodavstvom i standardima: Mnoge zemlje imaju propise i standarde koji regulišu kvalitet vazduha na radnom mestu. Monitoring vazduha omogućava građevinskim kompanijama da obezbede da su u skladu sa relevantnim zakonodavstvom i pravilima o zaštiti životne sredine i zdravlju radnika.

3. Prevencija negativnih uticaja na okolinu: Gradilišta mogu biti izvori zagađenja vazduha koji mogu uticati na okolne zajednice. Redovno praćenje vazduha pomaže u identifikaciji izvora zagađenja i preduzimanju mera kako bi se smanjio uticaj na okolinu.

4. Ranjive populacije: Gradilišta se često nalaze u blizini naseljenih područja, škola i zdravstvenih ustanova. Monitoring vazduha pomaže u zaštiti osetljivih grupa stanovništva, kao što su deca, starije osobe i osobe sa respiratornim problemima, od štetnih uticaja zagađenja vazduha.

5. Procena efikasnosti mera kontrole zagađenja: Monitoring vazduha omogućava procenu efikasnosti implementiranih mera kontrole zagađenja. Na osnovu prikupljenih

podataka, mogu se prilagoditi strategije kako bi se postigla optimalna zaštita zdravlja radnika i očuvala čista životna sredina.

6. Transparentnost i odgovornost: Redovno izveštavanje o rezultatima monitoringa vazduha na gradilištu pruža transparentnost u vezi sa kvalitetom vazduha i naporima koje preduzimaju građevinske kompanije kako bi zaštitile zdravlje i okolinu.

Zaključno, monitoring vazduha na gradilištima ima ključan značaj za očuvanje zdravlja radnika, zaštitu okoline i zaštitu javnog zdravlja. Redovno praćenje kvaliteta vazduha omogućava prepoznavanje potencijalnih opasnosti, donošenje informisanih odluka i primenu mera koje doprinose održivijem i bezbednijem okruženju za sve uključene strane.

## Glava II

### ZNAČAJ UPOTREBE INTERNETA STVARI (IoT) NA GRADILIŠTIMA

Razvoj tehnologije Interneta stvari (IoT) donosi sa sobom niz novih mogućnosti i primena u različitim industrijama. Jedna od oblasti koja posebno može da profitira od IoT-a je građevinska industrija. Upotreba IoT uređaja na gradilištima donosi brojne prednosti u smislu povećanja efikasnosti, smanjenja troškova i unapređenja bezbednosti. U ovom radu će se, između ostalog, istražiti značaj upotrebe IoT-a na gradilištima i kako ova tehnologija može da transformiše način na koji se građevinski projekti izvode.

Jedna od ključnih prednosti upotrebe IoT-a na gradilištima je mogućnost praćenja i upravljanja resursima. Pomoću senzora i uređaja povezanih na internet, moguće je pratiti kretanje opreme, materijala i radnika na gradilištu. Ovo omogućava precizno praćenje inventara, smanjenje gubitaka i bolje planiranje resursa. Na primer, senzori mogu obavestavati nadzorne timove kada određeni materijal treba da se dopuni ili kada je potrebno izvršiti servisiranje opreme. Takođe, ova tehnologija omogućava automatizovano upravljanje resursima, što povećava efikasnost i smanjuje vreme potrebno za obavljanje određenih zadataka.

IoT tehnologija omogućava detaljno praćenje napretka projekta na gradilištu. Povezani senzori mogu beležiti podatke o vremenskim uslovima, temperaturi, vlažnosti vazduha, vibracijama i drugim faktorima koji mogu uticati na izgradnju. Ovi podaci se mogu automatski slati nadzornim timovima koji mogu pratiti napredak projekta u realnom vremenu i preduzeti odgovarajuće mere ukoliko se pojave odstupanja ili problemi. Ovo smanjuje rizik od kašnjenja u izvršenju projekta i omogućava brže reagovanje na eventualne izazove.



Bezbednost na gradilištima je od izuzetne važnosti, a IoT tehnologija može značajno doprineti unapređenju bezbednosti radnika. Pomoću pametnih nosivih uređaja, kao što su pametne kacige ili narukvice, moguće je pratiti vitalne funkcije radnika, kao i detektovati potencijalno opasne situacije poput pada ili prekomerne izloženosti štetnim materijama. U takvim situacijama, IoT uređaji mogu automatski slati upozorenja i pozive za pomoć nadležnim timovima, čime se brže reaguje i smanjuje vreme reakcije u hitnim situacijama. Ova tehnologija takođe omogućava efikasnije upravljanje evakuacijama i pružanje hitne medicinske pomoći.

IoT uređaji se mogu koristiti za optimizaciju upravljanja energetsom efikasnošću na gradilištima. Senzori koji mere potrošnju energije mogu identifikovati efikasnije načine korišćenja električne energije, što dovodi do smanjenja troškova. Na primer, osvetljenje na gradilištu može biti povezano sa senzorima pokreta, tako da se svetla automatski pale samo kada je to potrebno. Takođe, senzori mogu upozoriti na eventualne kvarove ili curenja energije, što omogućava brzo otklanjanje problema i smanjenje gubitaka.

IoT tehnologija omogućava praćenje kvaliteta građevinskih materijala i opreme na gradilištima. Povezani senzori mogu meriti parametre kao što su pritisak, temperatura, vibracije i drugi faktori koji mogu ukazivati na potencijalne probleme ili propuste. Na osnovu ovih podataka, nadzorni timovi mogu preduzeti preventivne mere kako bi obezbedili visok nivo kvaliteta u izgradnji. Takođe, IoT tehnologija omogućava efikasno održavanje opreme. Senzori mogu praćenjem performansi opreme predvideti moguće kvarove ili otkazivanje i pružiti informacije o potrebnim servisima ili zamenskim delovima.

Uvođenje IoT tehnologije na gradilištima ima značajan uticaj na efikasnost, bezbednost i održivost građevinskih projekata. Praćenje i upravljanje resursima, praćenje napretka projekta, unapređenje bezbednosti, optimizacija energetske efikasnosti, upravljanje kvalitetom i održavanje su samo neki od aspekata gde IoT donosi brojne prednosti. Implementacija ovih tehnologija zahteva odgovarajuću infrastrukturu i stručnost, ali dugoročno može dovesti do značajnih poboljšanja u građevinskoj industriji.

Kao rezultat toga, može se očekivati smanjenje troškova, povećanje produktivnosti i brže izvršenje projekata.

Međutim, kao i kod svake tehnološke implementacije, postoji nekoliko izazova i pitanja koja treba uzeti u obzir prilikom primene IoT-a na gradilištima. Jedan od njih je pitanje sigurnosti podataka. S obzirom na to da se velika količina podataka generiše i šalje preko mreže, neophodno je obezbediti adekvatnu zaštitu podataka od neovlašćenog pristupa ili hakovanja. Takođe, postavljanje senzora i IoT uređaja na gradilištima zahteva dodatne investicije u infrastrukturu i obuku radne snage kako bi se osigurala pravilna instalacija, održavanje i upravljanje ovim uređajima.

Drugi izazov je integracija IoT tehnologije sa postojećim sistemima i procesima na gradilištu. Građevinska industrija je poznata po korišćenju tradicionalnih metoda i otpornosti na promene. Implementacija IoT-a zahteva prilagođavanje i usvajanje novih pristupa i radnih procesa, što može biti izazovno. Potrebna je jasna strategija i planiranje kako bi se osigurala uspešna integracija IoT tehnologije na gradilištu.

Još jedan izazov je pitanje interoperabilnosti između različitih IoT uređaja i platformi. Postoji veliki broj proizvođača i dobavljača IoT uređaja, a svaki od njih može koristiti različite standarde i protokole. Ovo može stvoriti poteškoće prilikom povezivanja i

razmene podataka između različitih uređaja i sistema. Razvoj standardizovanih protokola i interoperabilnih platformi postaje ključan kako bi se prevazišli ovi izazovi.

Uprkos izazovima, upotreba IoT-a na gradilištima ima ogroman potencijal za transformaciju građevinske industrije. Efikasnije upravljanje resursima, praćenje napretka projekta, poboljšana bezbednost, optimizacija energetske efikasnosti i upravljanje kvalitetom su samo neke od mnogobrojnih prednosti koje ova tehnologija donosi. Implementacija IoT-a na gradilištima zahteva strategiju, investicije i stručnost, ali dugoročno može doneti brojne koristi za kompanije, investitore, izvođače radova i druge učesnike u građevinskoj industriji.

U zaključku, IoT tehnologija predstavlja veliku mogućnost za transformaciju građevinske industrije. Pravilna primena IoT-a na gradilištima omogućava efikasnije upravljanje resursima, praćenje napretka projekta, poboljšanje bezbednosti, optimizaciju energetske efikasnosti i upravljanje kvalitetom. Iako postoje izazovi koji treba prevazići, potencijalne prednosti koje IoT donosi čine ga vrednim ulaganjem za građevinsku industriju. U budućnosti možemo očekivati još veću primenu IoT-a na gradilištima i dalje unapređenje načina na koji se građevinski projekti izvode.

Internet of Things (IoT) za monitoring vazduha je inovativna tehnološka primena koja ima značajan potencijal za praćenje i analizu kvaliteta vazduha na globalnom nivou. IoT omogućava povezivanje različitih senzora i uređaja na internet, omogućavajući realno-vremensko praćenje i sakupljanje podataka o zagađenju vazduha na različitim lokacijama.

Ova tehnologija ima ključnu ulogu u borbi protiv zagađenja vazduha, što je postalo sve važnije pitanje za očuvanje životne sredine i zaštitu javnog zdravlja. Kroz primenu IoT-

a za monitoring vazduha, mogu se identifikovati izvori zagađenja, pratiti nivoi različitih zagađujućih materija i preduzeti adekvatne mere kako bi se smanjilo negativno dejstvo na ljude i prirodu.

Glavne prednosti primene IoT-a za monitoring vazduha su:

1. Realno-vremensko praćenje: IoT senzori za monitoring vazduha omogućavaju realno-vremensko praćenje koncentracije zagađujućih materija. Ovi podaci se mogu automatski prikupljati i prenositi na centralni sistem, omogućavajući brzo i precizno reagovanje u slučaju povećanja zagađenja.

2. Praćenje na različitim lokacijama: IoT omogućava postavljanje senzora za monitoring vazduha na različitim lokacijama, uključujući urbanim, ruralnim i industrijskim područjima. Ovo omogućava širok spektar pokrivenosti i sagledavanje različitih izvora zagađenja.

3. Automatizacija i efikasnost: IoT tehnologija omogućava automatizaciju procesa sakupljanja i analize podataka, smanjujući potrebu za ručnim intervencijama. Ovo povećava efikasnost i smanjuje mogućnost ljudskih grešaka.

4. Dostupnost podataka: IoT omogućava lako dostupne podatke o kvalitetu vazduha putem aplikacija i veb portala. Građani mogu pratiti nivo zagađenja u realnom vremenu i preduzeti preventivne mere kako bi zaštitili svoje zdravlje.

5. Integracija sa drugim sistemima: IoT za monitoring vazduha može biti integrisan sa drugim sistemima, kao što su sistemi za upravljanje gradskim saobraćajem ili sistemi za upravljanje energetsom efikasnošću, kako bi se postigla sinergija i optimizacija resursa.

6. Prediktivna analitika: Na osnovu podataka sakupljenih putem IoT senzora, mogu se primeniti algoritmi mašinskog učenja i veštačke inteligencije za prediktivnu analitiku. To omogućava identifikaciju uzoraka i trendova u zagađenju vazduha, što doprinosi boljem razumevanju problema i donošenju efikasnih mera za njegovo rešavanje.

7. Globalna mreža: IoT omogućava povezivanje senzora za monitoring vazduha širom sveta, stvarajući globalnu mrežu za praćenje i razmenu informacija o kvalitetu vazduha. Ovo je od suštinskog značaja za globalnu saradnju u borbi protiv zagađenja vazduha i zaštitu životne sredine.

Kako se IoT tehnologija i senzori za monitoring vazduha nastavljaju razvijati, očekuje se da će ova inovativna rešenja postati sve dostupnija i efikasnija. Uz kontinuiranu primenu IoT-a za monitoring vazduha, možemo se nadati poboljšanju kvaliteta vazduha, smanjenju zagađenja i stvaranju održivijeg okruženja za sadašnje i buduće generacije.

## Predikcioni modeli kvaliteta vazduha i koncentracije zagađenja

Modeliranje u građevinarstvu je ključni proces koji ima značajan uticaj na razvoj moderne infrastrukture i arhitekture. Modeliranje u građevinarstvu obuhvata korišćenje naprednih računarskih alata i softvera kako bi se stvorili trodimenzionalni modeli objekata ili konstrukcija. To pomaže u boljem razumevanju kompleksnosti projekta i prepoznavanju mogućih problema i grešaka. Jedna od glavnih prednosti modeliranja u građevinarstvu je veća preciznost. Korišćenjem digitalnih modela moguće je izbeći ljudske greške i poboljšati tačnost projekta. Osim toga, modeliranje omogućava brže i efikasnije projektovanje i planiranje, što rezultira uštedom vremena i resursa.

Druga važna prednost modeliranja je mogućnost simulacije različitih scenarija. Inženjeri mogu testirati različite materijale, konstrukcijske opcije i uslove opterećenja kako bi odabrali najoptimalnije rešenje za projekat. To pomaže u minimiziranju rizika tokom gradnje i poboljšava kvalitet i sigurnost objekata. (Ulnikovic i sar., 2020)

Modeliranje takođe olakšava komunikaciju među učesnicima projekta. Kroz trodimenzionalne vizualizacije, arhitekta, investitori i izvođači mogu bolje razumeti dizajn i specifikacije, što olakšava donošenje odluka i postizanje saglasnosti. Time se smanjuje mogućnost nesporazuma i povećava efikasnost projekta.

Primena modeliranja u građevinarstvu obuhvata različite faze projekta, uključujući konceptualno projektovanje, izradu tehničke dokumentacije, analize performansi objekta i vizualizaciju završnog proizvoda. Osim toga, modeliranje se koristi i u izgradnji pametnih gradova i infrastrukture, što doprinosi boljoj urbanizaciji i održivijem razvoju.

Modeli o zagađenju na gradilištu su analitički alati koji se koriste za procenu i predviđanje nivoa zagađenja životne sredine tokom građevinskih radova. Ovi modeli pomažu inženjerima i stručnjacima zaštite životne sredine da identifikuju potencijalne izvore zagađenja, procene uticaj na okolinu i predlože odgovarajuće mere za smanjenje negativnih uticaja. (Cirisan i sar., 2023)

Postoje različiti tipovi modela o zagađenju na gradilištu, uključujući modele za praćenje kvaliteta vazduha, vode i zemljišta. Ti modeli uzimaju u obzir faktore poput vrste građevinskih materijala koji se koriste, metoda gradnje, količine otpada i emisija vozila na gradilištu.

Modeli o zagađenju na gradilištu se često koriste za ispitivanje uticaja građevinskih aktivnosti na lokalnu zajednicu i prirodnu sredinu. Na osnovu rezultata tih modela, mogu se doneti odluke o smanjenju emisija, recikliranju otpada, primeni zaštitnih mera i uvođenju tehnologija za smanjenje zagađenja. (Wong i sar., 2023)

Ovi modeli su važni jer pomažu u očuvanju životne sredine i zdravlja ljudi koji žive u blizini gradilišta. Pravilna primena modela o zagađenju može doprineti održivijoj i ekološki odgovornijoj gradnji, koja minimizira negativne efekte na prirodu i okolinu. Takođe, modeli o zagađenju igraju ključnu ulogu u skladu sa zakonodavstvom i propisima koji regulišu zaštitu životne sredine na gradilištima.

Modeli emisije prašine na gradilištima su alati koji se koriste za procenu i predviđanje količine prašine koja se oslobađa tokom građevinskih aktivnosti. Ovi modeli pomažu inženjerima i stručnjacima zaštite životne sredine da identifikuju potencijalne izvore prašine na gradilištima, analiziraju faktore koji utiču na njeno oslobađanje i predlože odgovarajuće mere za smanjenje emisije prašine.

Postoje različiti faktori koji mogu doprineti emisiji prašine na gradilištima, kao što su: vrsta građevinskog materijala, metode rada (npr. rušenje, kopanje, transport), vremenski uslovi (npr. vetar), i upotreba građevinskih mašina i vozila. Modeli emisije prašine uzimaju u obzir ove faktore kako bi se procenila količina prašine koja će se emitovati tokom određenih aktivnosti.

Koristeći ove modele, inženjeri mogu predvideti područja sa najvećim potencijalom za emisiju prašine i usmeriti napore na primenu mera za smanjenje njenog oslobađanja. To može uključivati korišćenje vlaženja površina kako bi se sprečilo podizanje prašine, upotrebu posebnih prepreka i barijera, korišćenje manje prašnjavih materijala, i redovno održavanje opreme kako bi se smanjilo habanje i prašenje.

Osim što pomažu u zaštiti životne sredine, modeli emisije prašine takođe imaju značajnu ulogu u unapređenju radnih uslova za radnike na gradilištima. Smanjenje nivoa prašine može poboljšati kvalitet vazduha na radnom mestu, smanjiti izloženost radnika štetnim česticama i doprineti poboljšanju njihovog zdravlja.

Važno je naglasiti da pravilno korišćenje ovih modela za emisiju prašine može doprineti održivijoj i ekološki odgovornijoj građevinskoj industriji. Redovno praćenje emisije prašine i primena adekvatnih mera zaštite mogu imati pozitivan uticaj na zaštitu životne sredine, zdravlje radnika i održivost gradilišta.

Da bi se kvantifikovali podaci o prašini dobijeni monitoringom, neki istraživači su koristili određivanje emisionih faktora građevinske prašine pomoću tri najčešće korišćene metode: metoda profilisanja ekspozicije, četvorodimenzionalni fluks model i Fluks-FDM metoda.



Ukratko, istraživači su sveobuhvatno proučavali emisije prašine i karakteristike građevinskih radova, ali većina istraživanja se fokusirala na analizu ukupnog nivoa emisije prašine i karakteristike gradilišta. Ipak, istraživanje emisije prašine za karakteristične različite radne faze izgradnje je još nedostajuće. Proces izgradnje nije homogen, pa stoga različite faze rada stvaraju različitu vrstu prašine, različite koncentracije, a samim tim i različite opasnosti.

Proces izgradnje prolazi kroz tri izrazito jedinstvena faze: zemljani radovi, zidarski radovi i unutrašnji radovi.

Za razliku od prve dve faze, treća se uglavnom dešava u zatvorenom prostoru, dakle, prašina nastala tokom treće faze ne utiče na spoljašnje okruženje i karakteristike prašine značajno se razlikuju od onih kod prve dve etape. U međuvremenu, istraživači su takođe uradili brojna istraživanja o predviđanju koncentracija čestica građevinske prašine.

Uspostavljanjem modela predviđanja građevinske prašine, istraživači uglavnom koriste tradicionalnu višestruku linearnu regresiju, ali imaju velika ograničenja i ne mogu predvideti odnos između koncentracije prašine i faktora praćenja prašine, što rezultira činjenicom da predviđanja nisu tačna. Dok neuronska mreža može veoma dobro da prevaziđe ovo ograničenje, može izgraditi veoma složen nelinearni model, koji može dobro da odrazi nelinearni odnos između koncentracije čestica i faktora praćenja prašine.

Dakle, da bi se tačno prikazala emisija prašine zemljanih radova, ovo istraživanje uglavnom fokusira se na prvu fazu, odnosno zemljane radove. Model neuronske mreže je izgrađen na osnovu praćenih podataka. Model se koristi za obavljanje simulacione

analize koncentracije prašine i predviđanje koncentracije građevinske prašine pod različitim vremenskim uslovima.

Cilj ovog istraživanja je dublja i detaljnija analiza odnosa između koncentracija PM čestica na gradilištu koje se emituju usled radova na iskopu i meteoroloških parametara. Analiza podataka je urađena da bi se proverila mogućnost primene veštačke inteligencije na predviđanje koncentracije PM čestica u zavisnosti od vremenskih uslova.

## Glava III

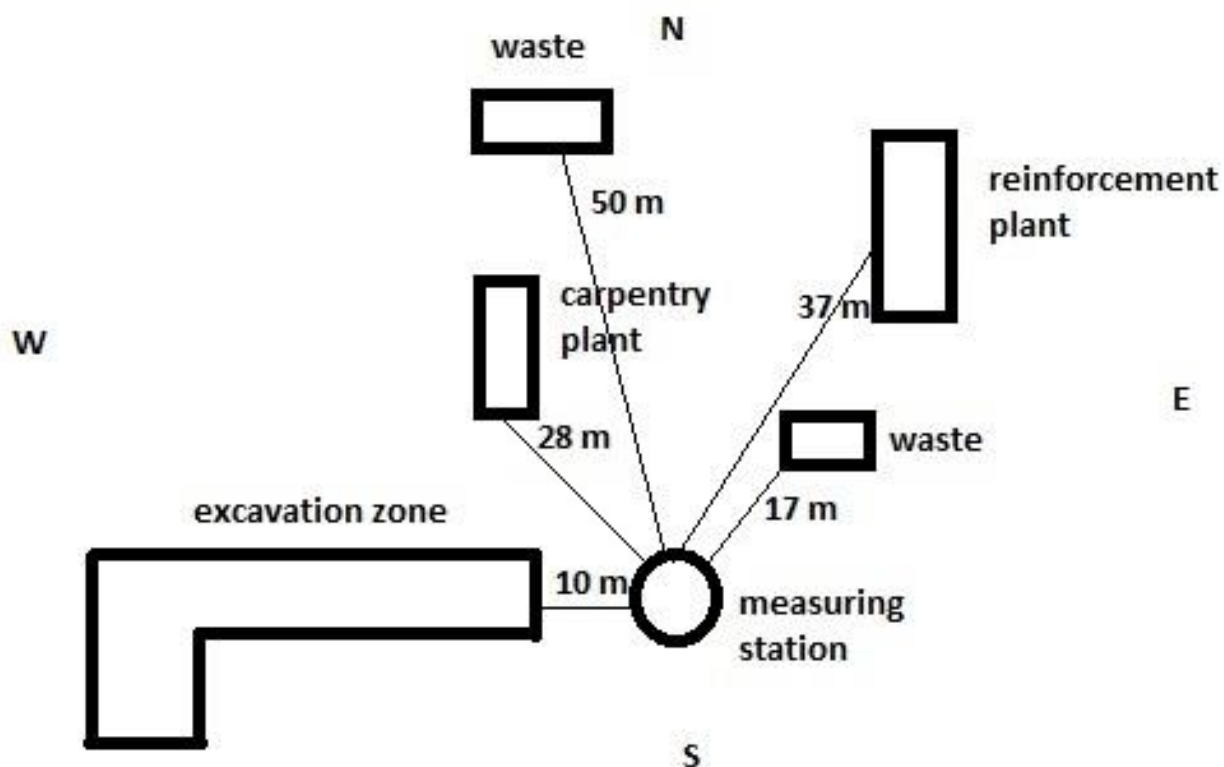
### EKSPERIMENTALNI DEO-METODOLOGIJA

Eksperiment koji se sastojao od merenja koncentracija suspendovanih čestica  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$ , zatim  $NO_2$ , kao i meteoroloških parametara (pritisak, temperatura, vlažnost, brzina i smer vetra) izveden je na jednom gradilištu u Beogradu (slika 1.) tokom 15 dana u julu 2022. godine, od 1. do 15. jula. Zona iskopa se nalazi zapadno i jugozapadno od lokacije merne stanice, dok su dodatni izvori emisija na gradilištu, kao što su stolarski i armaturni radovi, postavljeni na severnoj i severozapadnoj strani od uređaja za nadzor na gradilištu. Na slici 2 prikazane su udaljenosti pojedinačnih izvora emisije od merne stanice. Emisije iz drugih izvora dolaze iz pravca juga i istoka i mogu se tretirati kao pozadinske emisije. Tokom čitavih petnaest dana na području iskopa radile su dve mašine na električni pogon. Svim danima osim nedelje radilo se od 13 do 17 časova. Otpad se svakodnevno odvezio kamionima.



Slika 1

Lokacija gradilišta na mapi Beograda



Slika 2

Skica gradilišta sa označenim pozicijama mernog uređaja, zone iskopa, kao i drugih potencijalnih izvora emisije

Korišćeni su uređaji senzorskog tipa i rezultati su se snimali svakih 5 minuta.

RS-MG111-WI-FI-1 je predajnik sa više elemenata u vazдушnom okruženju (Slika 3). Koristi se za detekciju  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  i  $\text{PM}_{10}$ . Predajnik usvaja originalni uvezeni senzor i kontrolni čip, koji ima karakteristike visoke preciznosti, visoke rezolucije i dobre stabilnosti. Koristeći WI-FI mrežni prenos, direktno je povezan sa WI-FI mrežom na licu mesta. Sa besplatnim softverom platforme za praćenje ili besplatnom IoT

platformom u oblaku, direktno je formirao onlajn integrisani sistem za praćenje vazdušnog okruženja. Široko se koristi u izgradnji HVAC-a, uštedi energije u zgradama, pametnim kućama, školama, bolnicama, aerodromskim stanicama i drugim mestima.

Drugi uređaj je CC-M12 meteorološka stanica: anemometar (WD, WS), temperatura, preitisak i vlažnost sa RH&T i 4G komunikacijom (Slika 4).



**Slika 3.** RS-MG111-WIFI-1 (Renke) uređaj



Slika 4. CC-M12 meteorološka stanica

Uređaji su prenosivi (sa mogućnošću ugradnje na otvorenom i u zatvorenom prostoru). Takav sistem omogućava rukovodiocu gradilišta i kompaniji da u realnom vremenu imaju detaljan uvid u kvalitet životne sredine. Pri tome se identifikuju izvori emisije štetnih gasova iz tri glavne delatnosti u građevinarstvu: zemljani radovi, transport i unutrašnji radovi. Različiti tipovi senzora su korišćeni za prikupljanje podataka koji se odnose na čestice  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ , kao i meteorološke parametre – brzinu i smer vetra, vlažnost, pritisak i temperaturu. Veb i mobilna aplikacija pružaju vizuelizaciju podataka (mapa, lista, grafikon), obaveštenja/alarme kada su vrednosti van definisanog opsega, algoritme za obradu podataka, izvoz u csv datoteku.

Senzori su kalibrisani u odnosu zvanične podatke sa državne mreže za merenje kvaliteta vazduha kako bi se dokazao kvalitet podataka, a tačnost je bila veća od 0,98.

Kalibracija je urađena metodom kolokacije na terenu, odnosno uređaj je kolociran sa javnom stanicom za praćenje kvaliteta vazduha na 15 dana (skup podataka je sadržao prosečne vrednosti po satu i sa uređaja i sa javne stanice za praćenje). Za potrebe kalibracije korišćena je jedna od najčešćih metoda (pogodna i zbog jednostavnosti implementacije) metoda najmanjih kvadrata (LSM). (Engelhardt, 2000)

Za analizu podataka u ovoj studiji korišćen je statistički softver SPSS 23.0. Za modeliranje podataka (višestruka linearna regresija (MLR) i neuronske mreže (ANN) korišćen je softver Statistica v.13 (StatSoft).

MLR model je pripremljen na osnovu fitovanja linearne jednačine dobijenim podacima. Glavna prednost ove statističke metode je njena sposobnost da pokaže odnose između varijabli, iako nije naznačen uzročni mehanizam. MLR model je od suštinskog značaja u određivanju kako meteorološki faktori utiču na koncentracije zagađujućih supstanci u vazduhu. Stoga se koncentracije NO<sub>2</sub> i PM mogu tretirati kao odgovor na meteorološke varijable kao prediktore.

Veštačka neuronska mreža (ANN) je jedna od dobro poznatih prognostičkih metoda koja se koristi za pronalaženje rešenja kada druge statističke metode nisu primenljive. Prednosti ovog alata, kao što su mogućnost učenja iz primera, tolerancija grešaka, rad u okruženju u realnom vremenu i predviđanje nelinearnih podataka, čine ga široko korišćenim statističkim alatom. Štaviše, ANN se tačno uklapa u nelinearne varijable, što je prednost u poređenju sa multivarijantnom linearnom analizom zasnovanom na linearnim varijablama. ANN modeli su pokušaj da se imitiraju i simuliraju funkcije neurona u ljudskom mozgu putem matematičkih funkcija. Višeslojna percepcija (MLP) se sastoji od ulaznog sloja na kome se nalaze veštački neuroni koji odgovaraju ulaznim



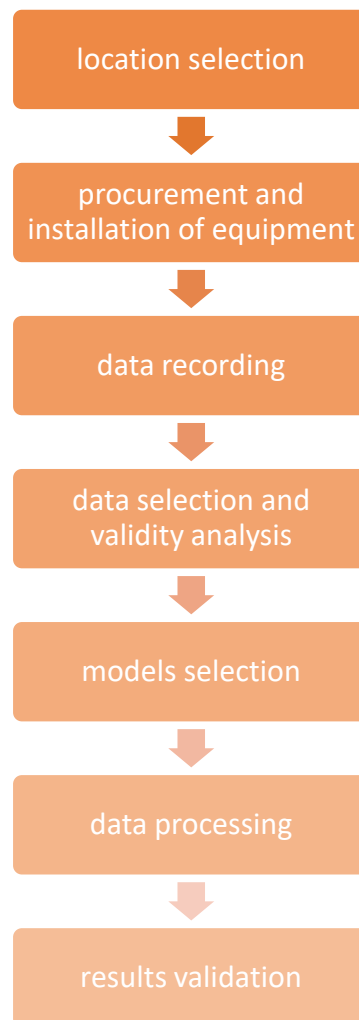
podacima (inputima). Posle ulaznog sloja postoji jedan ili više skrivenih slojeva sa jednim ili više veštačkih neurona. Svaki veštački neuron na svakom od skrivenih slojeva je povezan i razmenjuje informacije sa svim ostalim neuronima i prethodnog i sledećeg sloja. Konačno, sledi izlazni sloj na kome se nalaze veštački neuroni „mete“.

Koeficijent determinacije ( $R^2$ ) je bio jedan od indikatora koji se koristio da bi se utvrdilo da li podaci pružaju dovoljno dokaza koji ukazuju na to da su ukupni modeli doprineli dovoljno informacija za predviđanje koncentracija. Takođe deluje kao indikator za merenje u kojoj meri se modeli predviđanja uklapaju u podatke. Vrednosti koeficijenta se kreću od nula do jedan. Što je vrednost bliža jedinici, to je predviđanje bolje i tačnije.

## Glava IV

### REZULTATI I DISKUSIJA

Na Slici 5 je prikazan grafik toka istraživanja.



**Slika 5.** Grafik toka istraživanja

Rezultati merenja su prikazani na graficima na Slikama 6-16 i u Tabeli 1. Rezultati su dati kao celodnevni rezultati (FD-full day), pri čemu su na grafikonima prikazani rezultati merenja tokom ukupnog vremena, 24 sata dnevno, za svih 15 dana, kao i rezultati radnog vremena (WH-work hours) koji prikazuju odvojeno radno vreme od 7 do 17 časova, radnim danima (od ponedeljka do subote).

Tabela 1 Osnovna statistička analiza merenih parametara

|               | <b>PM2.5</b><br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | <b>PM10</b><br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | <b>NO2</b><br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | <b>p</b><br>(kapa) | <b>T</b><br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | <b>hum</b><br>(%) | <b>v</b><br>(m/s) |
|---------------|--|---|--|--------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|
| <b>FD av</b>  | 15.301                                       | 16.811                                      | 94.243                                     | 1004.78            | 25.192                             | 51.030            | 0.354             |
| <b>FD SD</b>  | 9.5752                                       | 11.155                                      | 131.989                                    | 2.618              | 6.401                              | 18.534            | 0.698             |
| <b>FD min</b> | 1  | 1   | 0  | 999                | 12.4                               | 18.1              | 0                 |
| <b>FD max</b> | 133  | 143   | 510  | 1010               | 46.2                               | 98.3              | 17.8              |
| <b>WH av</b>  | 14.660                                       | 16.0597                                     | 167.741                                    | 1004.977           | 28.600                             | 20.2              | 0.467             |
| <b>WH SD</b>  | 9.147  | 10.577                                      | 144.859                                    | 2.835              | 5.556                              | 13.749            | 0.574             |
| <b>WH min</b> | 1  | 2   | 0  | 999                | 15.2                               | 91.1              | 0                 |
| <b>WH max</b> | 71   | 82  | 510  | 1010               | 41.1                               | 40.696            | 3.2               |

Praćenjem koncentracije zagađujućih materija dobijena su tri seta podataka, uključujući  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{NO}_2$ .

Kao što je prikazano na slikama 6-10, ova tri skupa podataka su ucrtana u linijski grafikon box-plot grafikon.

Iz prikazanih rezultata može se videti da su se koncentracije  $\text{PM}_{2,5}$  kretale od 1 do 133  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  tokom celog dana, odnosno u periodu od 24 časa dnevno, dok su se tokom radnog vremena kretale od 1 do 71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Prosečna vrednost koncentracije  $\text{PM}_{2,5}$  za svih 15 dana iznosila je 15.301  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  tokom celodnevnog posmatranja, dok je tokom

radnog vremena iznosila  $14.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Prosečne dnevne koncentracije  $\text{PM}_{2.5}$  bile su po danu, za svih 15 dana: 26.46, 14.69, 21.06, 26.87, 27.09, 15.76, 15.16, 16.55, 11.66, 7.26, 5.75, 9.38, 8.36, 10.20,  $15.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Koncentracije  $\text{PM}_{10}$  su se kretale od 1 do  $143 \mu\text{g}/\text{m}^3$  tokom celog dana, odnosno u periodu od 24 časa dnevno, dok su se tokom radnog vremena kretale od 2 do  $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Prosečna vrednost koncentracije za svih 15 dana iznosila je  $16.811 \mu\text{g}/\text{m}^3$  tokom celog dana posmatranja, dok je tokom radnog vremena iznosila  $16,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Prosečne dnevne koncentracije  $\text{PM}_{10}$  bile su respektivno dnevno, za svih 15 dana: 29.18, 16.22, 23.05, 30.21, 30.15, 16.97, 16.04, 17.50, 12.69, 7.98, 6.48, 10.55, 9.11, 11.08,  $16.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

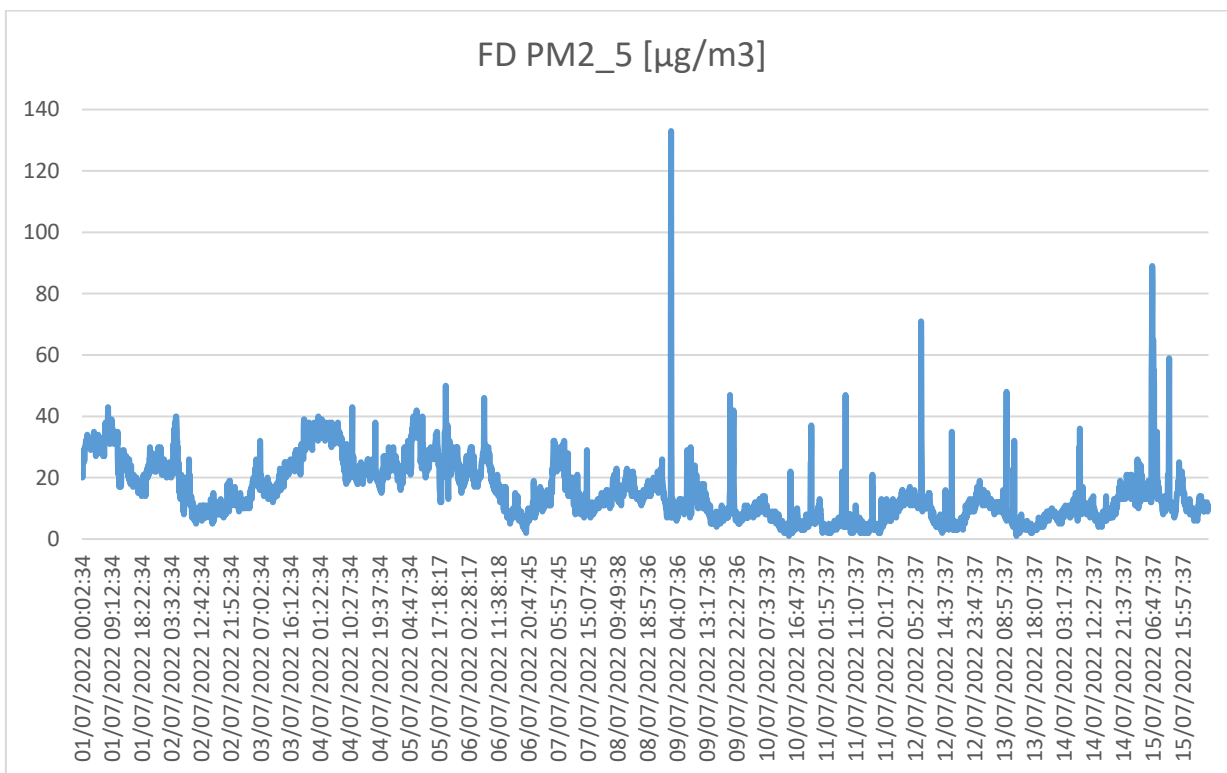
Može se primetiti da su najveće vrednosti koncentracije čestica  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{PM}_{2.5}$  bile tokom noćnih sati, što se može pripisati stabilizaciji atmosfere prema (Ling i sar., 2015).

Prema граниčnim vrednostima SZO,  $\text{PM}_{2.5}$  ne bi trebalo da prelazi  $5 \text{ mg}/\text{m}^3$  godišnje srednje vrednosti, ili  $15 \text{ mg}/\text{m}^3$  24-časovne srednje vrednosti; i da  $\text{PM}_{10}$  ne bi trebalo da prelazi  $15 \text{ mg}/\text{m}^3$  godišnje srednje vrednosti, odnosno  $45 \text{ mg}/\text{m}^3$  24-časovne srednje vrednosti. Analizirajući prosečne 24-časovne vrednosti za  $\text{PM}_{2.5}$  i  $\text{PM}_{10}$ , može se zaključiti da  $\text{PM}_{2.5}$  predstavlja daleko veću opasnost po zdravlje zbog daleko viših vrednosti u odnosu na propisane dnevne granice. Može se primetiti da više od 50% dana, uključujući i neradne dane,  $\text{PM}_{2.5}$  premašuje dozvoljenu 24-časovnu vrednost prema standardima SZO, što nije slučaj sa  $\text{PM}_{10}$ .

Koncentracije  $\text{NO}_2$  su se kretale od 0 do  $510 \mu\text{g}/\text{m}^3$  tokom celog dana, odnosno tokom 24-časovnog perioda, kao i tokom radnog vremena. Prosečna vrednost za svih 15 dana iznosila je  $167.741 \mu\text{g}/\text{m}^3$  tokom celog dana posmatranja, dok je tokom radnog vremena iznosila  $94.243 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Na gradilištu se tokom radnog vremena može uočiti značajan

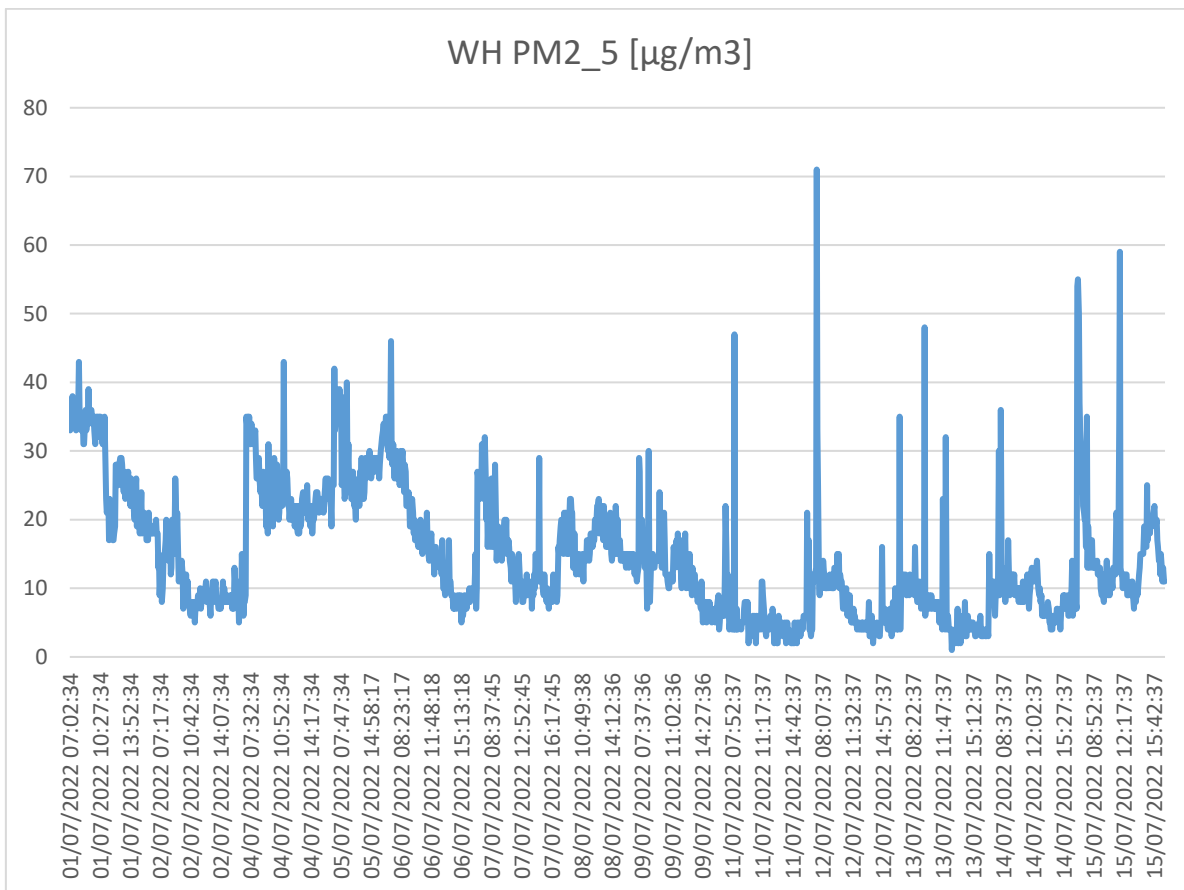
porast koncentracije NO<sub>2</sub>. Oko 70% je veća prosečna dnevna vrednost tokom 10 radnih sati u odnosu na sva 24 sata.

Uticaj na koncentraciju NO<sub>2</sub> može se objasniti transportom otpada koji je svakodnevno kamionima odvožen do deponije građevinskog otpada, ali i uticajem saobraćaja sa obližnjih puteva.



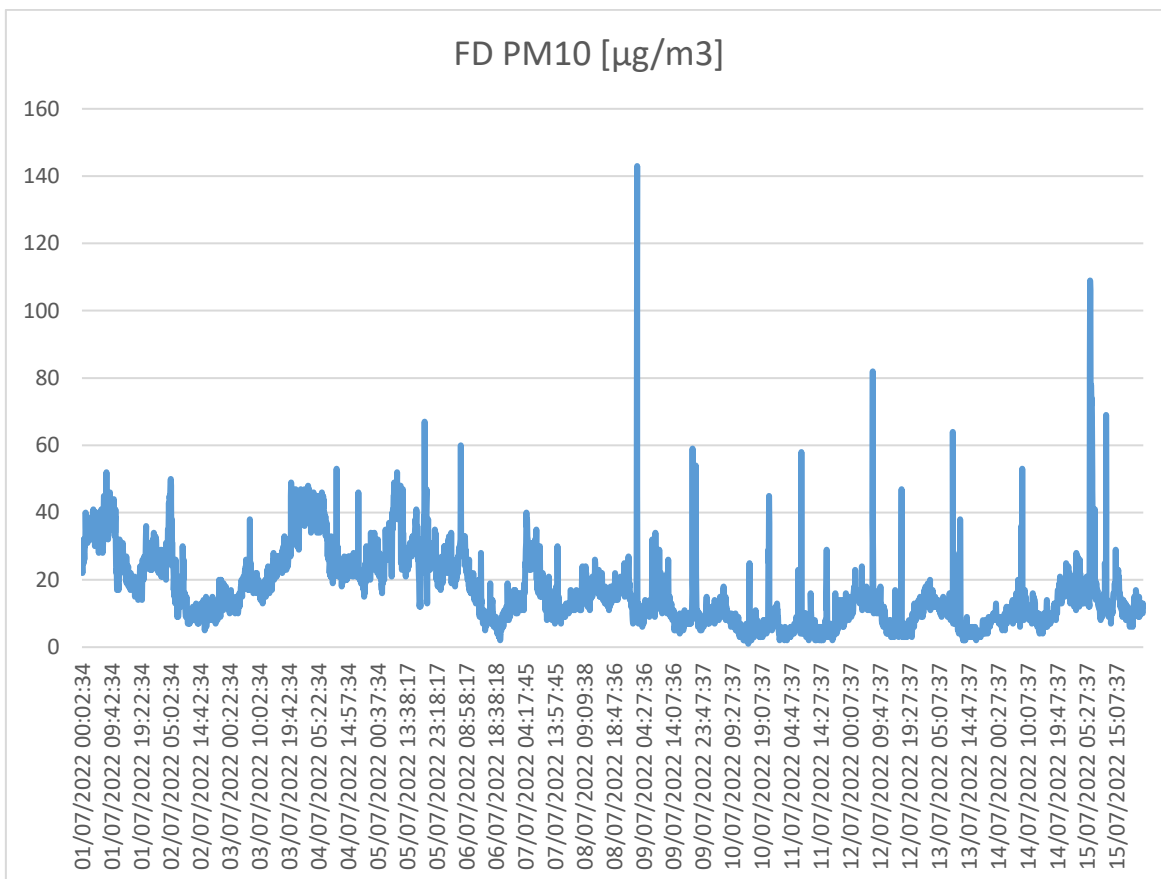
Slika 6a

Vremenska zavisnost koncentracije PM<sub>2,5</sub> čestica u vazduhu na gradilištu tokom radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevni podaci)



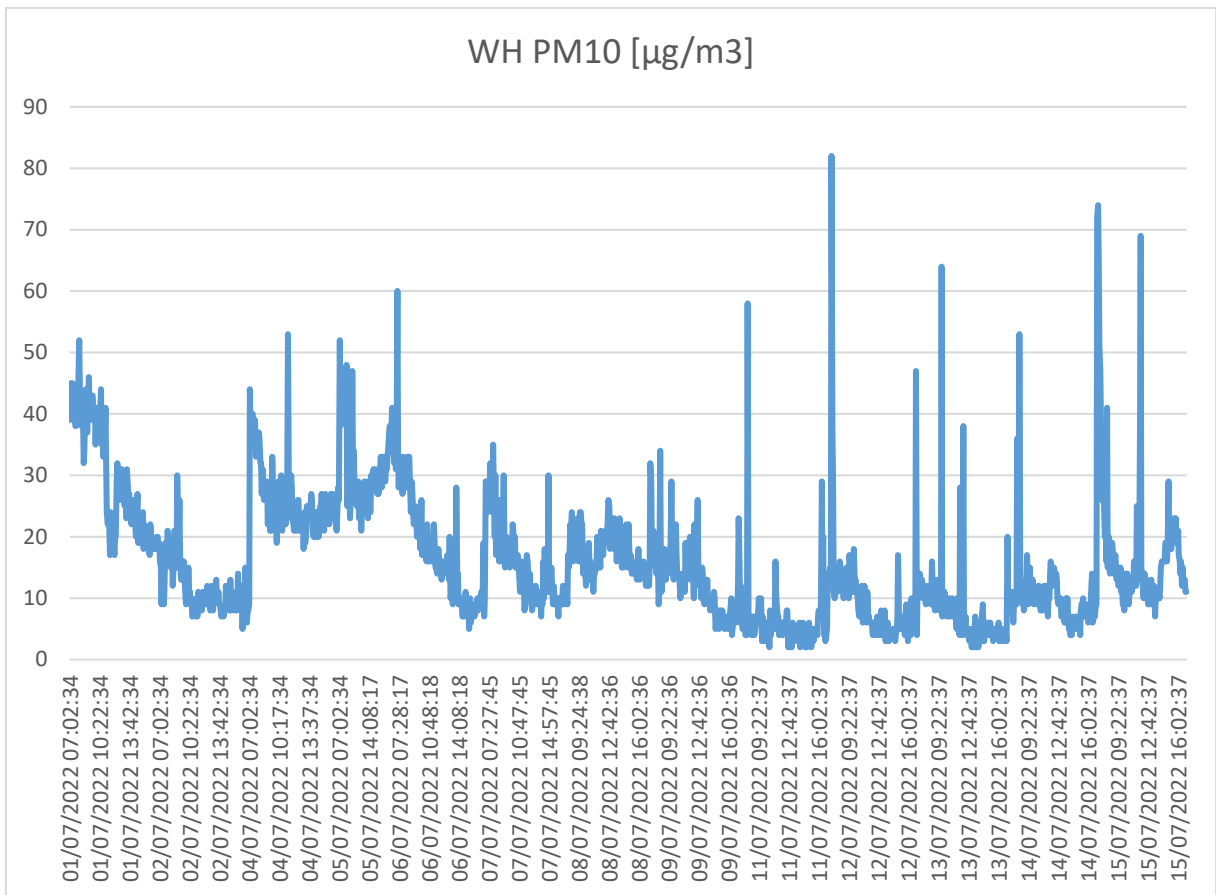
Slika 6b

Vremenska zavisnost koncentracije PM<sub>2,5</sub> čestica u vazduhu na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)



Slika 7a

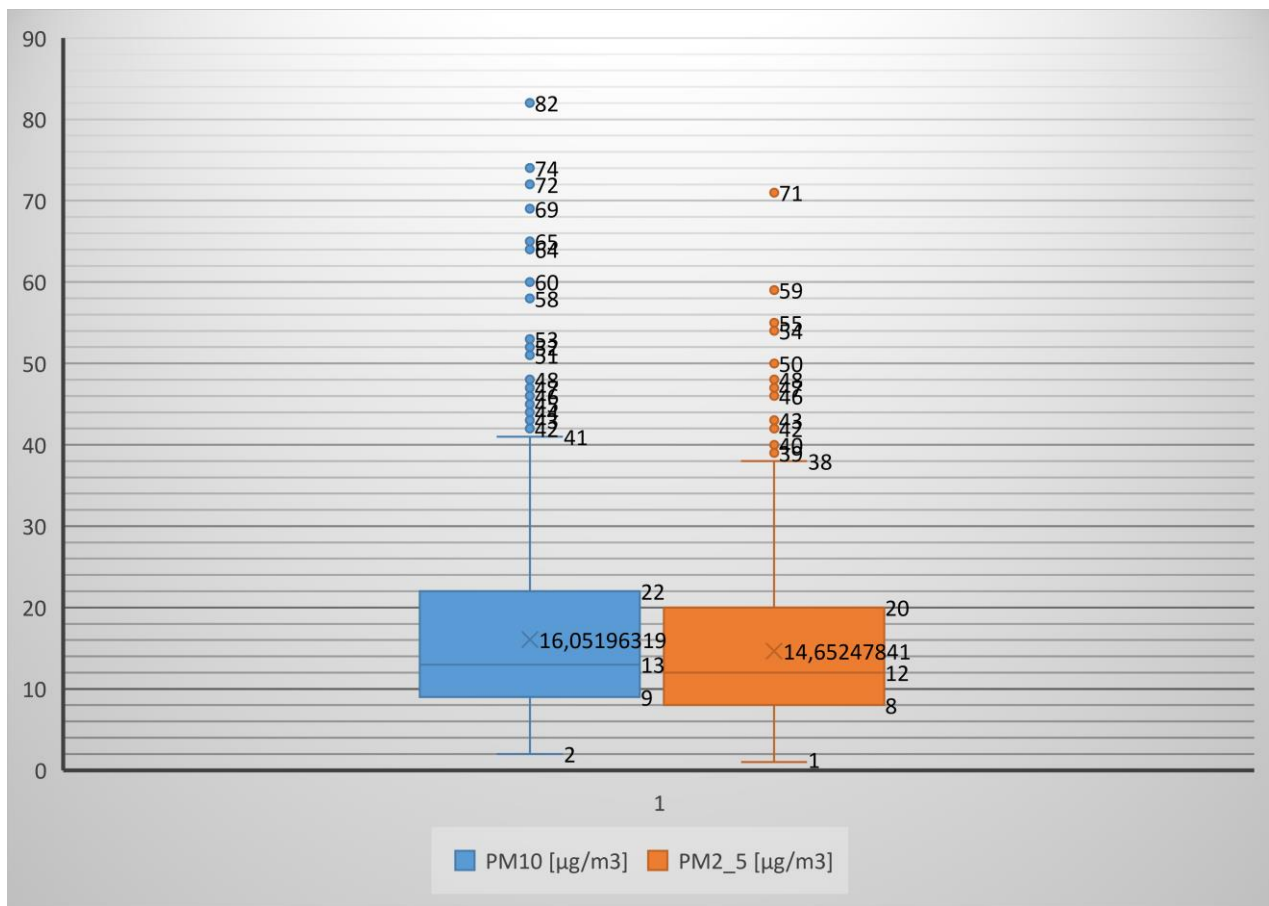
Vremenska zavisnost koncentracije  $\text{PM}_{10}$  čestica u vazduhu na gradilištu tokom radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevni podaci)



Slika 7b

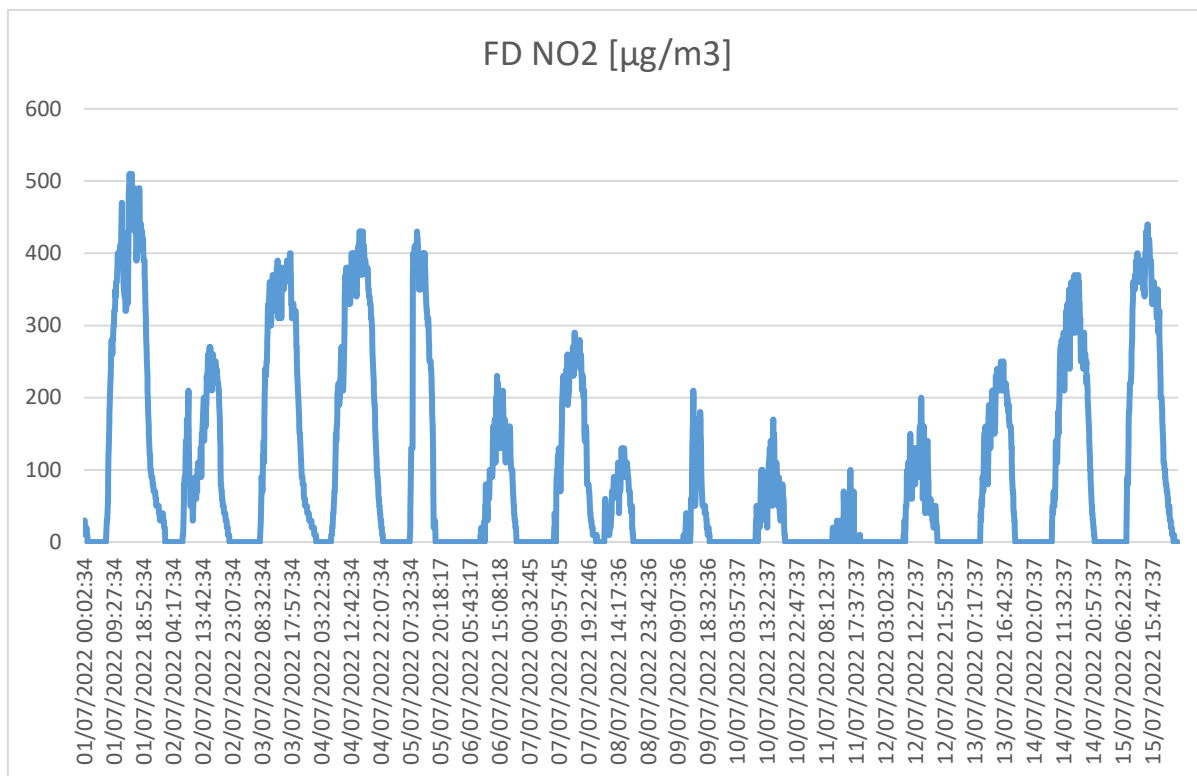
Vremenska zavisnost koncentracije PM<sub>10</sub> čestica u vazduhu na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)





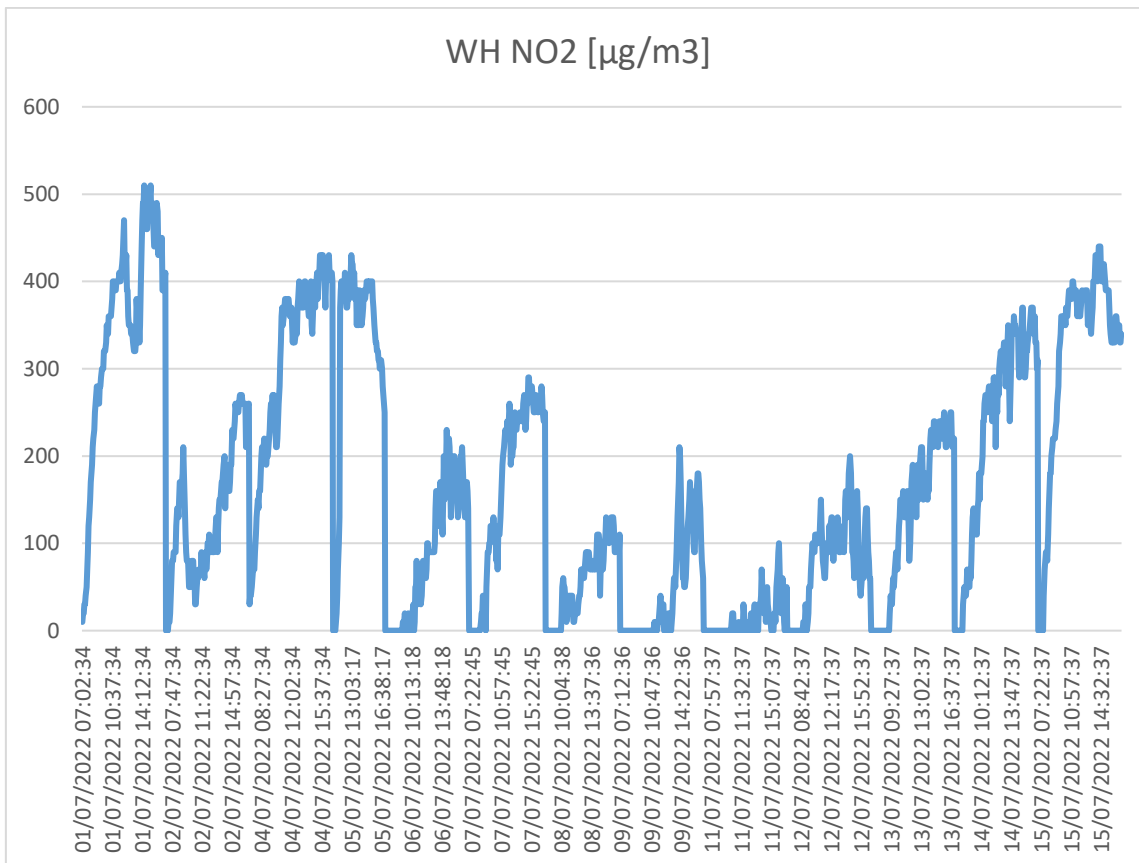
Slika 8

Prikazana je srednja koncentracija  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{PM}_{2,5}$  u vazduhu (minimalna, 1. kvartil, medijana i srednja vrednost, 3. kvartil i maksimalna, kao i autlajeri) na gradilištu tokom radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)



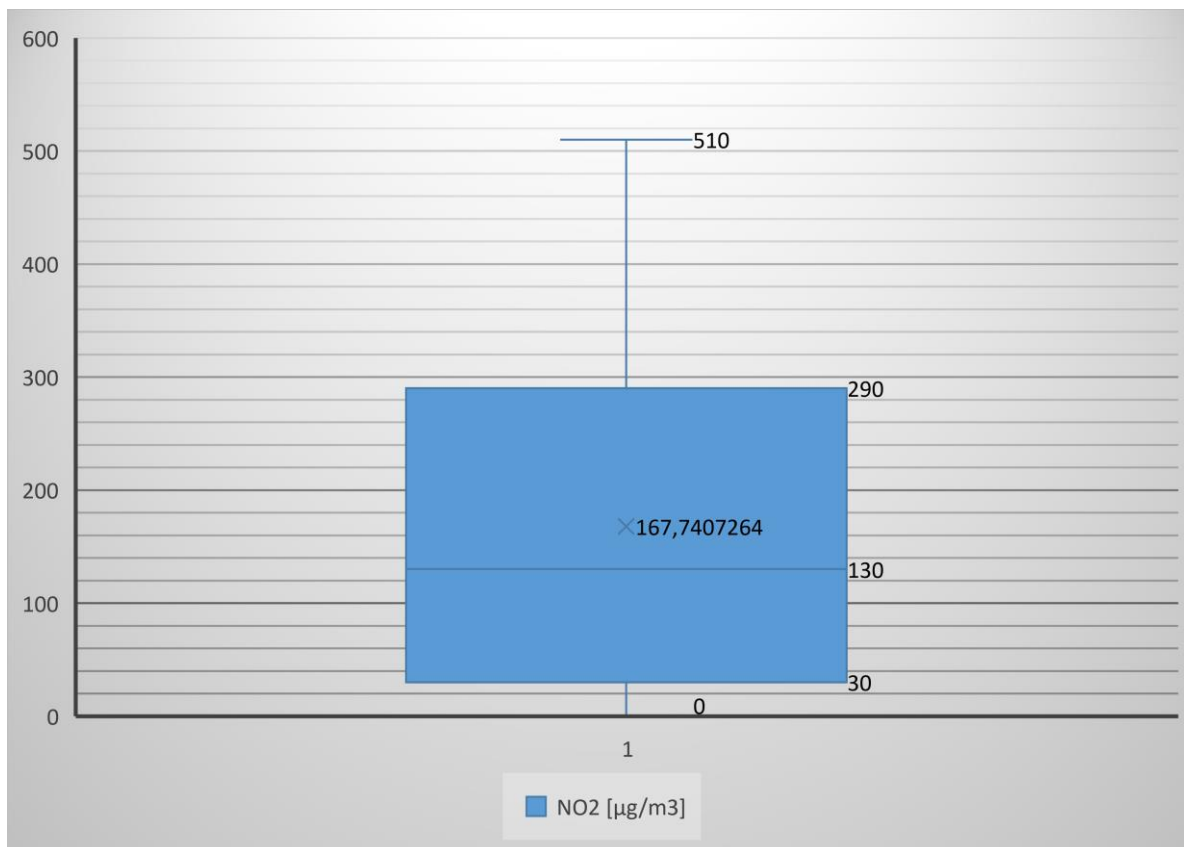
Slika 9a

Vremenska zavisnost koncentracije NO<sub>2</sub> u vazduhu na gradilištu tokom radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevni podaci)



Slika 9b

Vremenska zavisnost koncentracije čestica NO<sub>2</sub> u vazduhu na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)



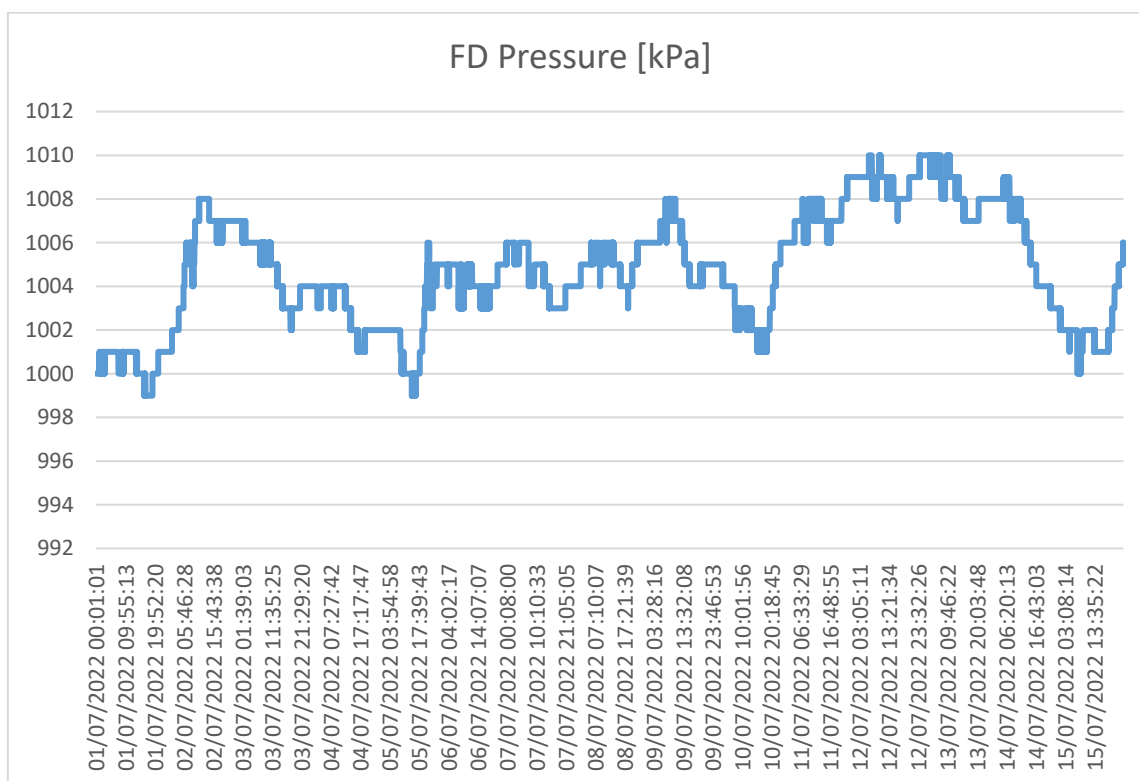
Slika 10

Prikazana je srednja koncentracija NO<sub>2</sub> u vazduhu (minimalna, 1. kvartil, medijana i srednja vrednost, 3. kvartil i maksimalna, kao i autlajeri) na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci iz radnog vremena)

Praćenjem meteoroloških parametara dobijeno je 5 setova meteoroloških podataka, uključujući brzinu i smer vetra, temperaturu, vlažnost i atmosferski pritisak.

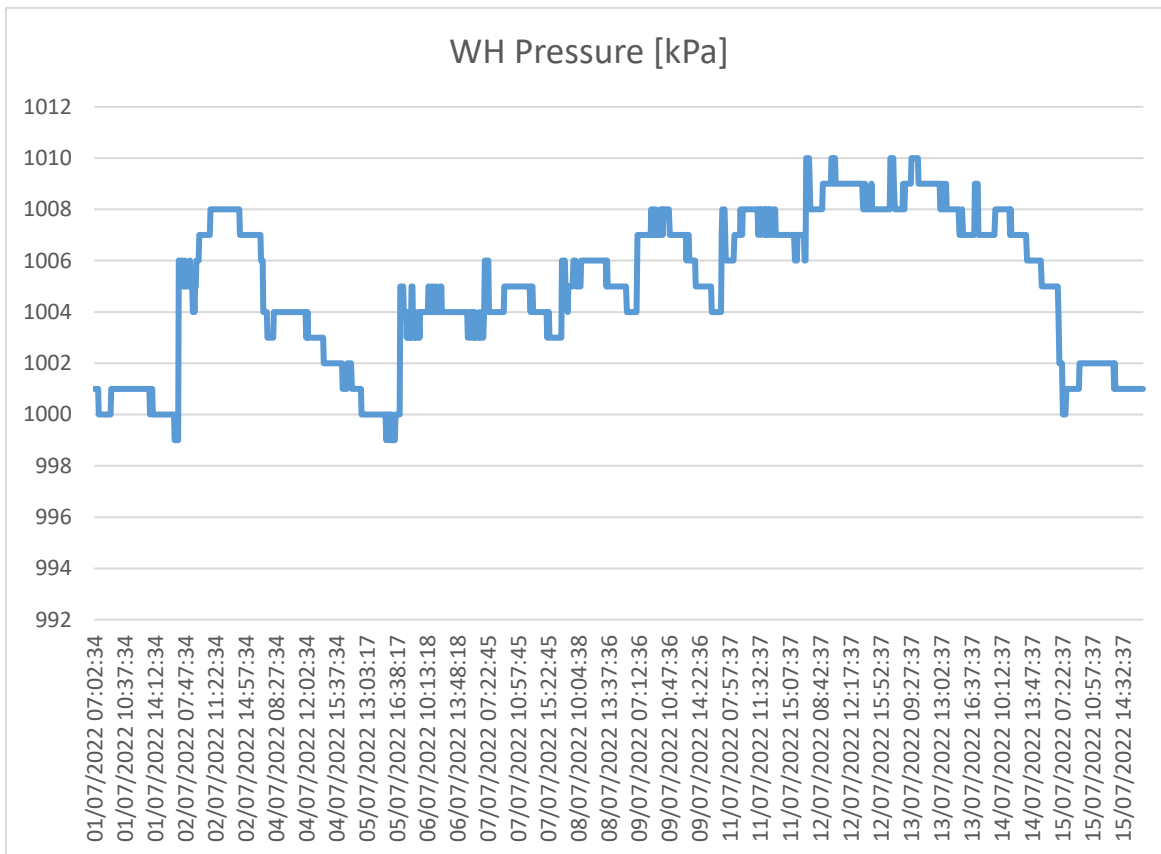
Kao što je prikazano na slikama 11-16, 4 skupa podataka su ucrtana u linijski grafikon.

Pritisak se kretao od 999 do 1010 kPa tokom celog dana, odnosno u periodu od 24 časa dnevno, kao i tokom radnog vremena. Prosečna vrednost za svih 15 dana bila je 1004,977 kPa tokom celodnevnog posmatranja, dok je tokom radnog vremena iznosila 1004,78 kPa.



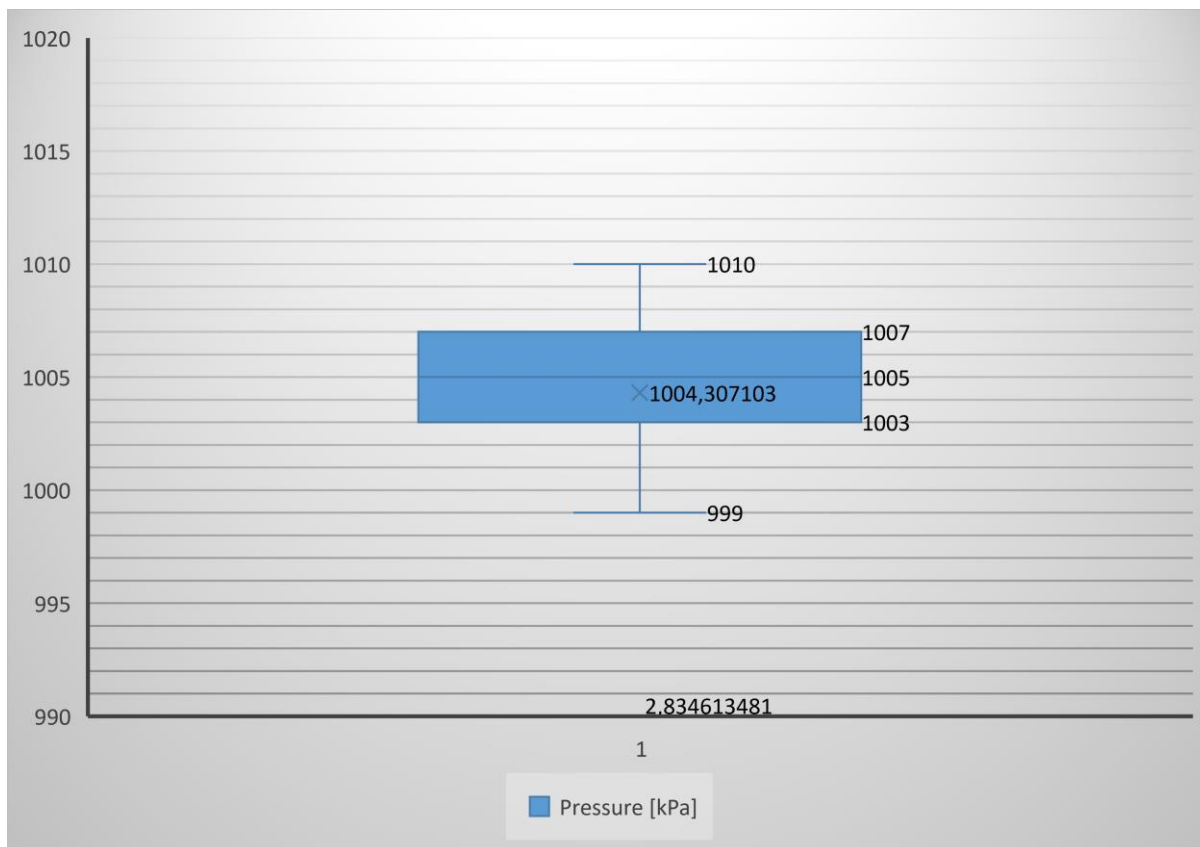
Slika 11a

Vremenska zavisnost vazdušnog pritiska na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevni podaci)



Slika 11b

Vremenska zavisnost pritiska vazduha na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

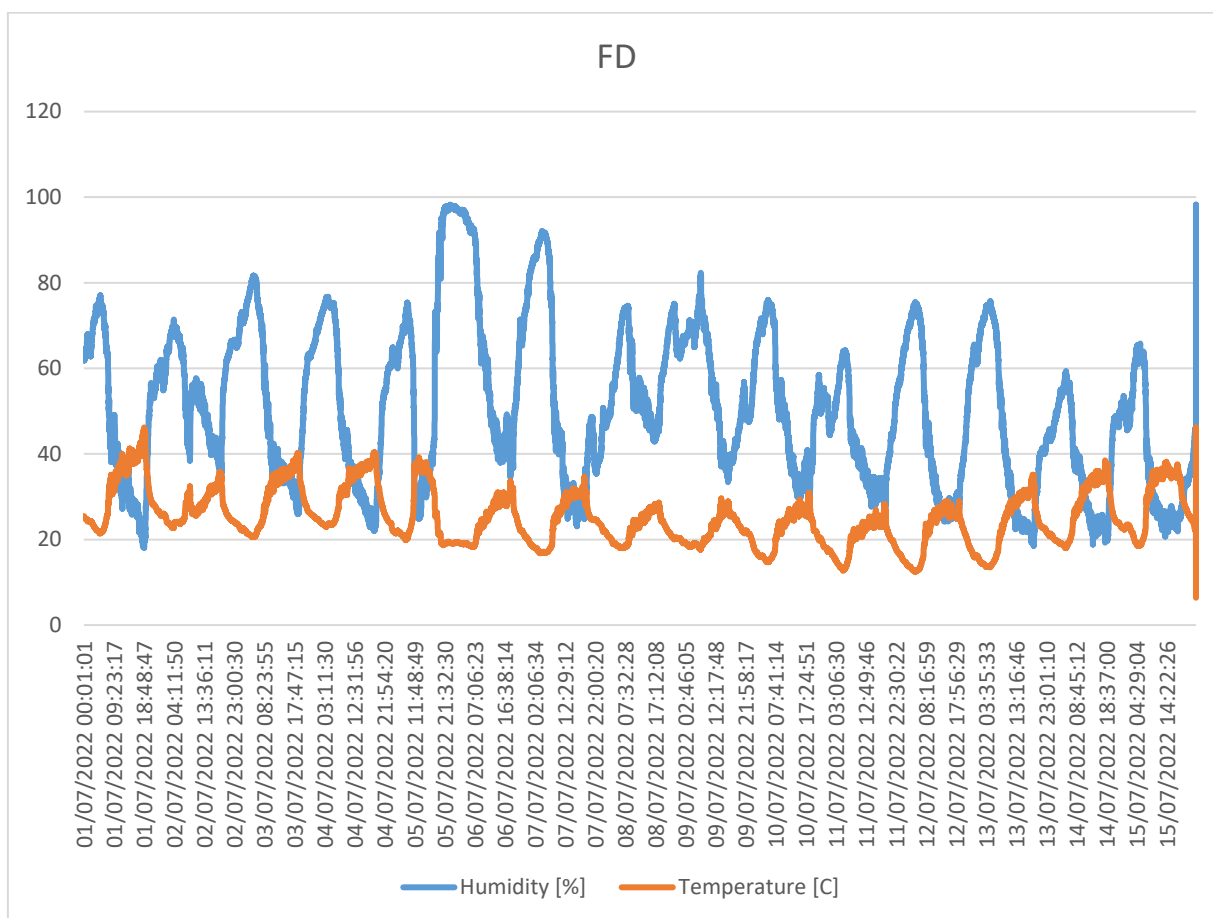


Slika 12

Atmosferski pritisak (prikazani su minimalni, 1. kvartil, medijana i srednja vrednost, 3. kvartil i maksimalni, kao i autlajeri) na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Vlažnost vazduha se kretala od 18,1 do 98,3% tokom celog dana, odnosno u periodu od 24 časa dnevno, dok se tokom radnog vremena kretala od 40,696 do 91,1%. Prosečna vrednost za svih 15 dana iznosila je 51,03% tokom celog dana posmatranja, dok je tokom radnog vremena iznosila 20,2%.

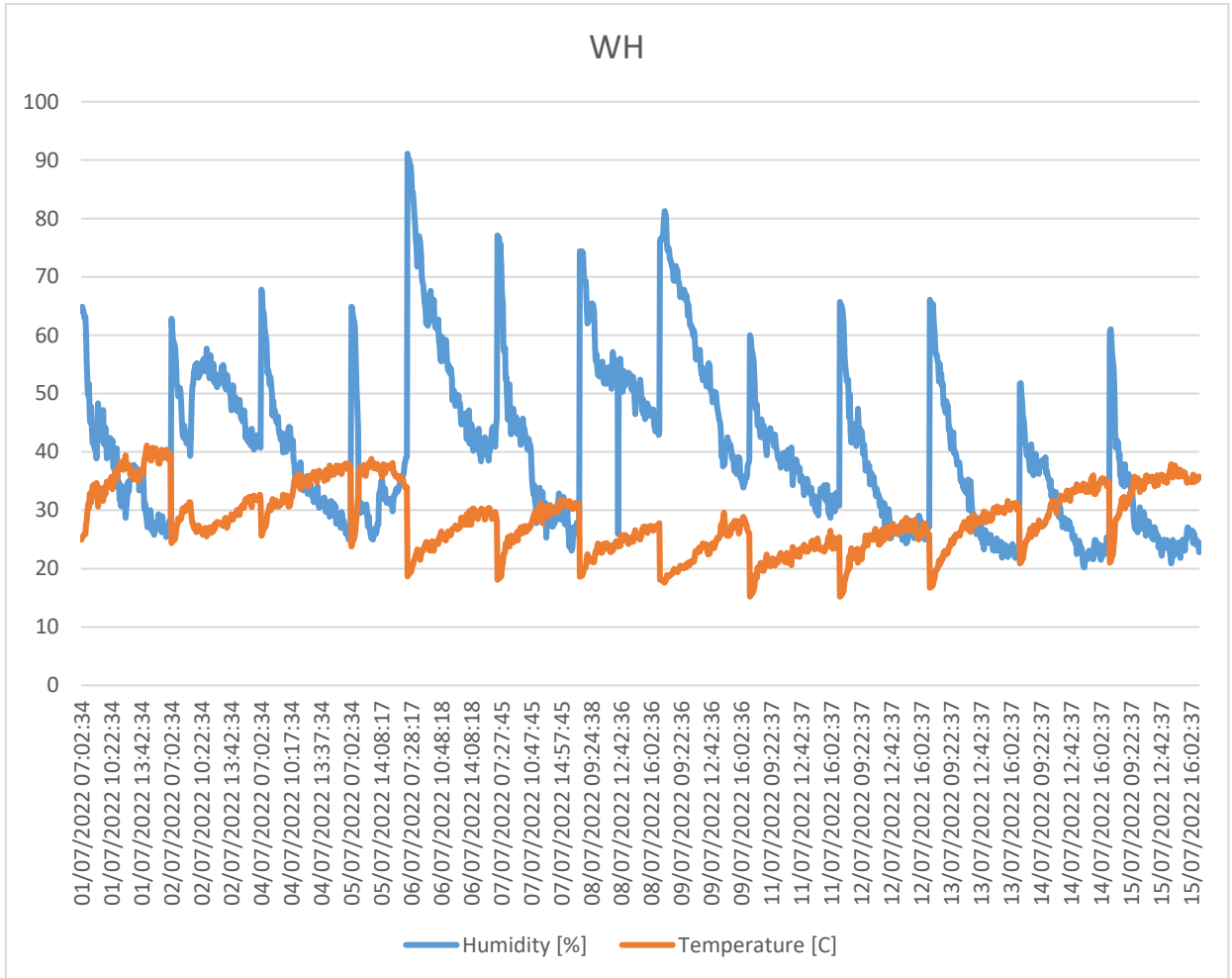
Temperatura se kretala od 12,4 do 46,2°C tokom celog dana, odnosno u periodu od 24 časa dnevno, dok su se tokom radnog vremena kretale od 15,2 do 41,1°C. Prosečna vrednost za svih 15 dana bila je 25.192 °C, tokom celodnevnog posmatranja, dok je tokom radnog vremena pokazivala 28,6°C.



Slika 13a

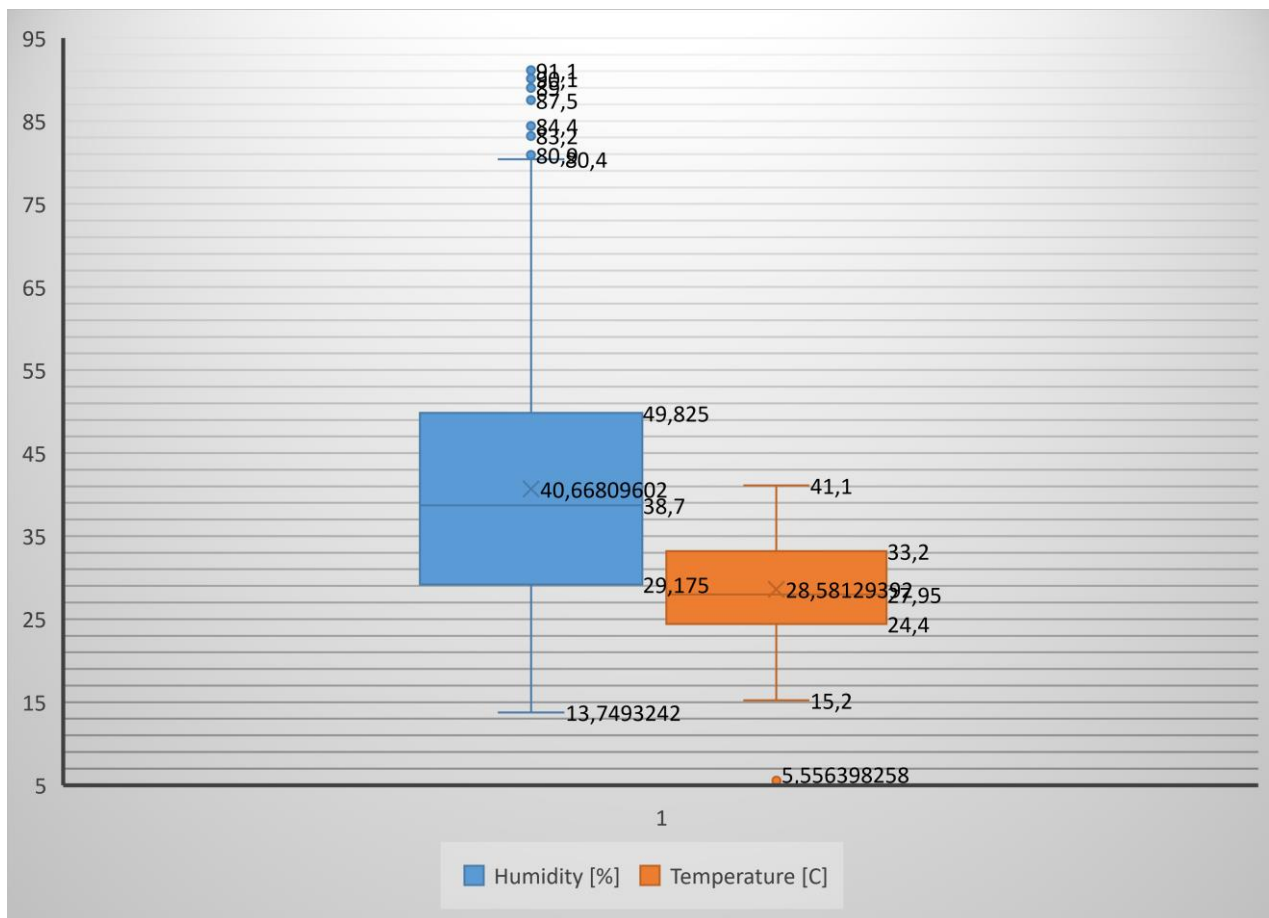
Vremenska zavisnost temperature i vlažnosti na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevnih podaci)





Slika 13b

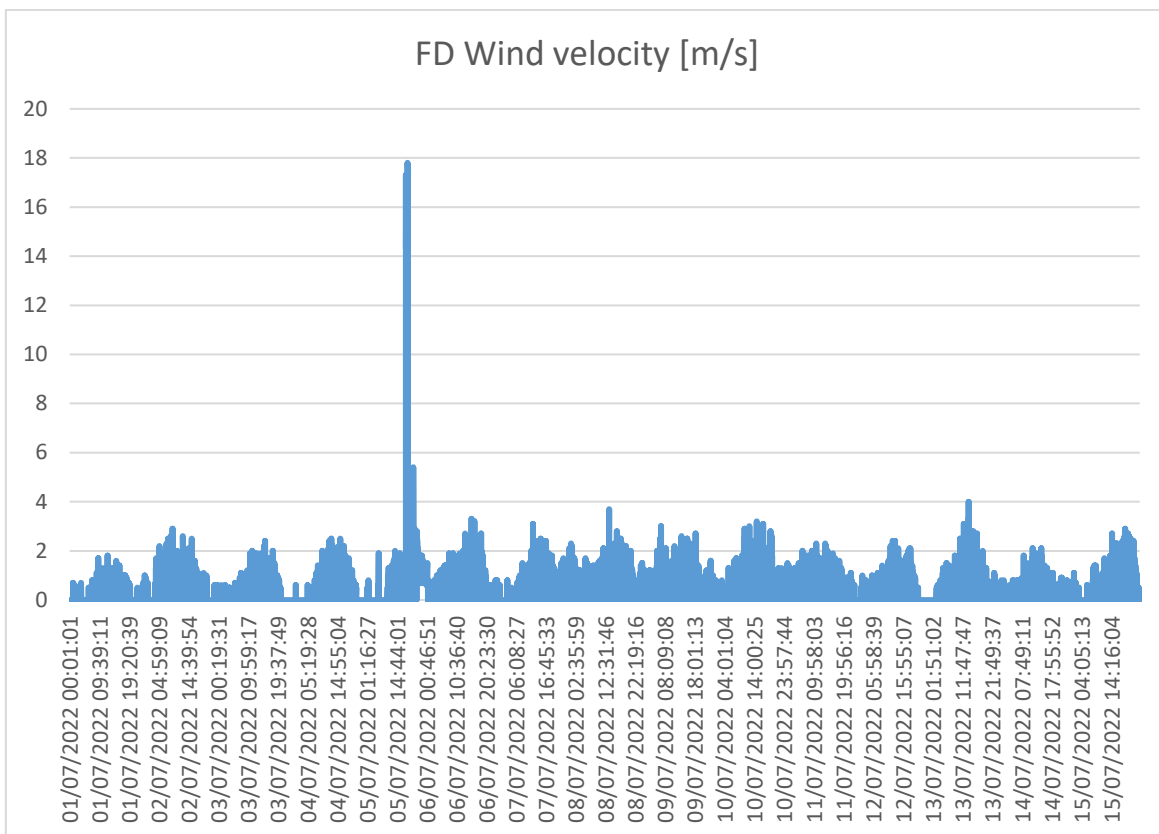
Vremenska zavisnost temperature i vlažnosti na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)



Slika 14

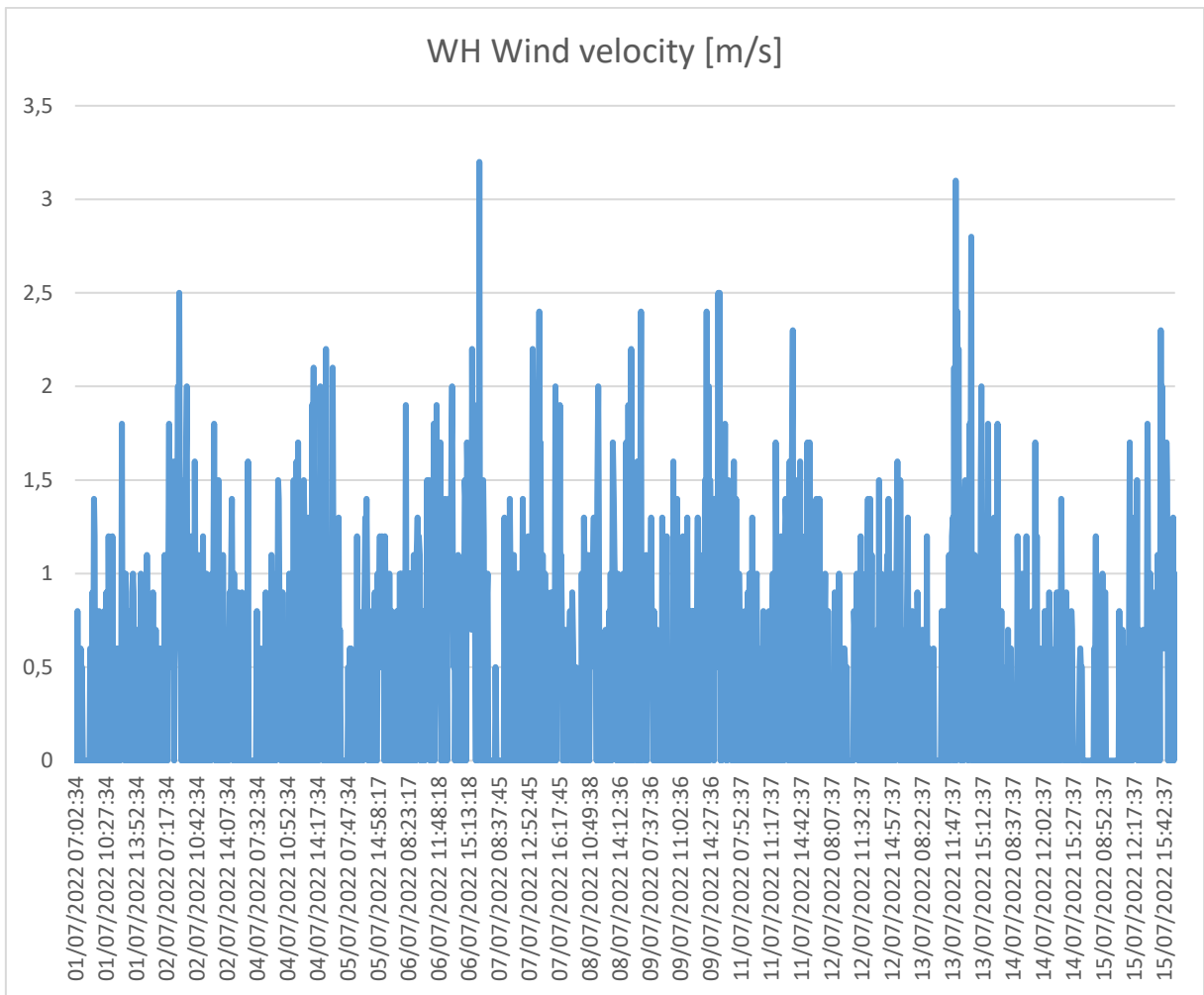
Temperatura i vlažnost vazduha (minimalna, 1. kvartil, medijana i srednja vrednost, 3. kvartil i maksimum, kao i graničnici su prikazani) na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Brzina vetra se kretala od 0 do 24,8 m/s tokom celog dana, odnosno u periodu od 24 časa dnevno, dok su se tokom radnog vremena kretale od 0 do 3,2 m/s. Prosečna vrednost za svih 15 dana bila je 0,354 m/s tokom celog dana posmatranja, dok je tokom radnog vremena iznosila 0,467 m/s.



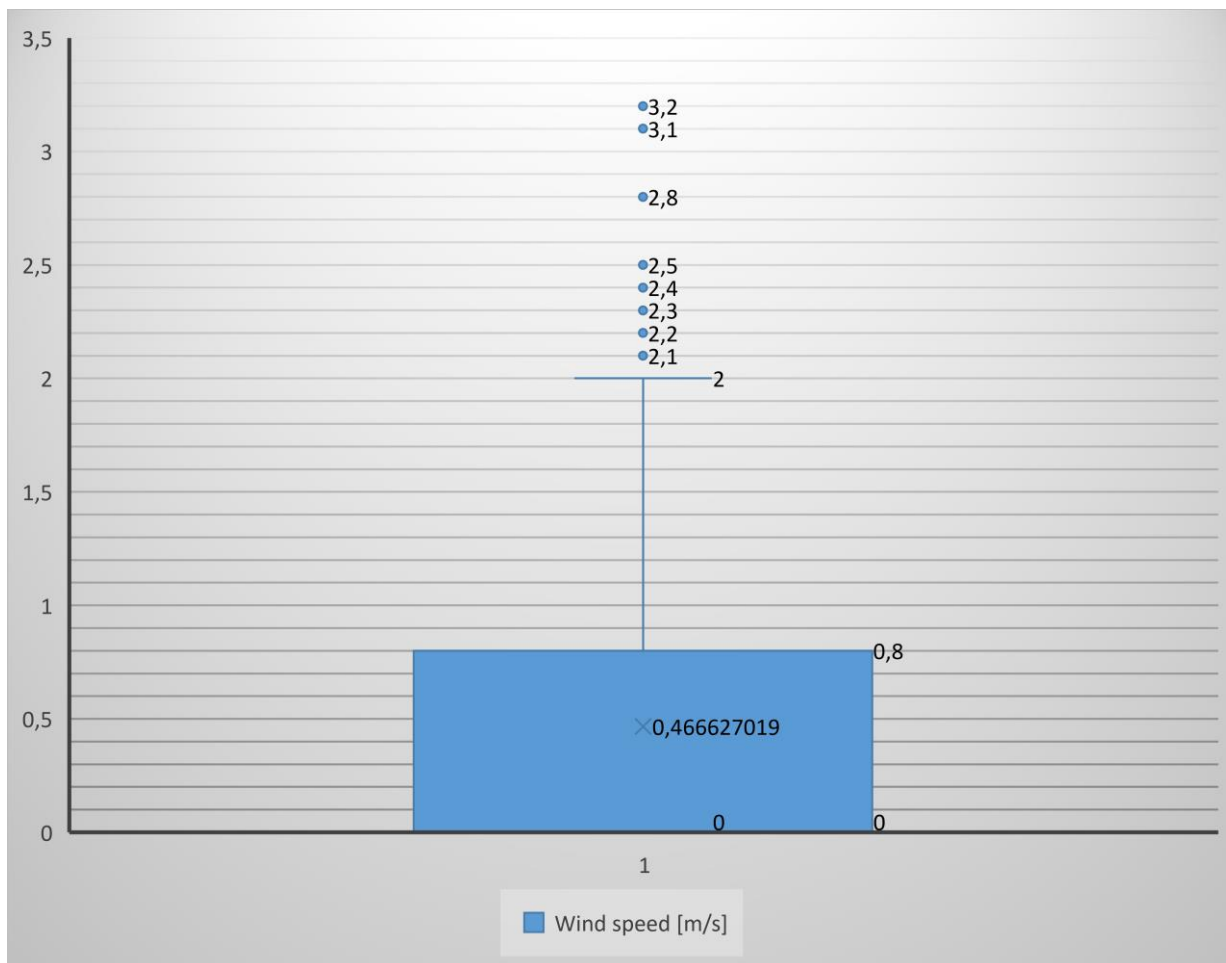
Slika 15a

Vremenska zavisnost brzine vetra na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (celodnevnii podaci)



Slika 15b

Vremenska zavisnost brzine vetra na gradilištu u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)



Slika 16

Brzina vetra na gradilištu (prikazana je minimalna, 1. kvartil, medijana i srednja vrednost, 3. kvartil i maksimalna, kao i autlajeri) u toku radova na iskopu u periodu od 15 dana (podaci u toku radnog vremena)

Pored osnovne statističke analize, u tabeli 1, urađena je i korelaciona analiza koncentracije PM i meteoroloških podataka. Tabela 2 pokazuje da koncentracije PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> nisu bile u značajnoj korelaciji ni sa jednim meteorološkim faktorom.

Može se primetiti veoma visoka korelacija između  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$ . Korelacija između PM čestica i meteoroloških parametara pokazuje malu vrednost. Najveća korelacija, iako niža od 0,3, je između PM čestica, vlažnosti i temperature.

Tabela 2 Vrednosti koeficijenta linearne korelacije između merenih parametara

|       | PM2.5 | p      | hum   | T      | v      |
|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| PM10  | 0.987 | -0.092 | 0.299 | 0.201  | 0.003  |
| PM2.5 | 1     | -0.103 | 0.297 | 0.236  | 0.008  |
| p     |       | 1      | 0.053 | -0.416 | -0.989 |
| hum   |       |        | 1     | -0.660 | -0.030 |
| T     |       |        |       | 1      | 0.326  |
| v     |       |        |       |        | 1      |

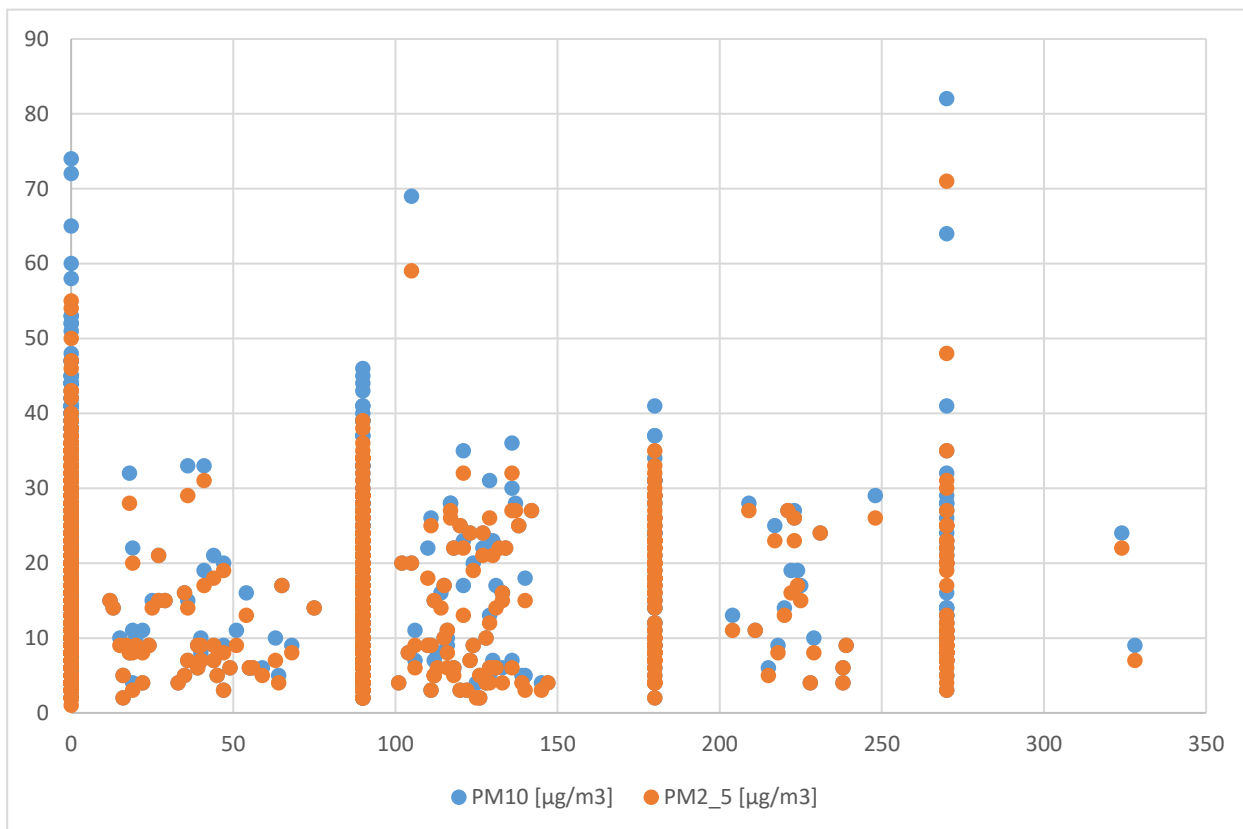
Razlozi koji su doveli do ovakvog rezultata mogli bi biti da na građevinsku prašinu utiču mnogi faktori. Građevinske aktivnosti su direktan faktor koji stvara građevinsku prašinu i imaju veliki uticaj (Fan i sar., 2011) na građevinsku prašinu mnogo više od meteoroloških faktora. Tokom perioda monitoringa meteorološki faktori se nisu previše menjali; na ovaj način može donekle eliminisati uticaj meteoroloških faktora na građevinsku prašinu. Padavine su glavni faktor koji utiče na prašinu (Chen i sar., 2015). Stoga se može smatrati da emisija građevinske prašine nije značajno povezana ni sa jednim meteorološkim faktorom kada se ne menja previše. U izvesnoj meri, to je u skladu sa zaključcima urbanog istraživanja  $PM_{10}$  i  $PM_{2,5}$  (Ge, 2018).

U tabeli 3 prikazane su vrednosti Spearmanovih koeficijenata korelacije za merene parametre, iz čega se može zaključiti da koncentracije  $PM_{10}$  i  $PM_{2,5}$  nisu bile u značajnoj korelaciji ni sa jednim meteorološkim faktorom. Uočena je veoma visoka korelacija između  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$ .

Tabela 3 Vrednosti Spearmanovog koeficijenta korelacije između merenih parametara

|                         | <b>NO<sub>2</sub></b> | <b>PM<sub>10</sub></b> | <b>PM<sub>2.5</sub></b> | <b>Pritisak</b> | <b>Vlažnost</b> | <b>Temperatura</b> | <b>Smer vetra</b> | <b>Brzina vetra</b> |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| <b>NO<sub>2</sub></b>   | 1                     | 0.239763               | 0.253295                | 0.051102        | -0.37261        | 0.957658           | 0.333358          | 0.269198            |
| <b>PM<sub>10</sub></b>  |                       | 1                      | 0.986733                | -0.07757        | 0.165151        | 0.194665           | 0.177881          | 0.14115             |
| <b>PM<sub>2.5</sub></b> |                       |                        | 1                       | -0.10016        | 0.149039        | 0.2059             | 0.17116           | 0.134286            |
| <b>Pritisak</b>         |                       |                        |                         | 1               | 0.763782        | -0.02965           | 0.576633          | 0.668878            |
| <b>Vlažnost</b>         |                       |                        |                         |                 | 1               | -0.44567           | 0.402222          | 0.520197            |
| <b>Temperatura</b>      |                       |                        |                         |                 |                 | 1                  | 0.271544          | 0.195947            |
| <b>Smer vetra</b>       |                       |                        |                         |                 |                 |                    | 1                 | 0.819766            |
| <b>Brzina vetra</b>     |                       |                        |                         |                 |                 |                    |                   | 1                   |

Na slici 17 prikazan je odnos koncentracije PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> čestica i pravca vetra. Na slici je prikazan smer vetra u stepenima od 0 do 360° na k-osi. Na i-osi su predstavljene sa dve različite boje PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub>. Uočava se visok stepen korelacije između pm čestica, ali i da se koncentracije PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> čestica povećavaju kada vetar poprimi pravac od 0°, odnosno duva sa juga, zatim 90° sa zapada, dok ostale pravce vetra prate niže koncentracije PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> čestica. Ove činjenice se poklapaju sa položajem zone iskopa.

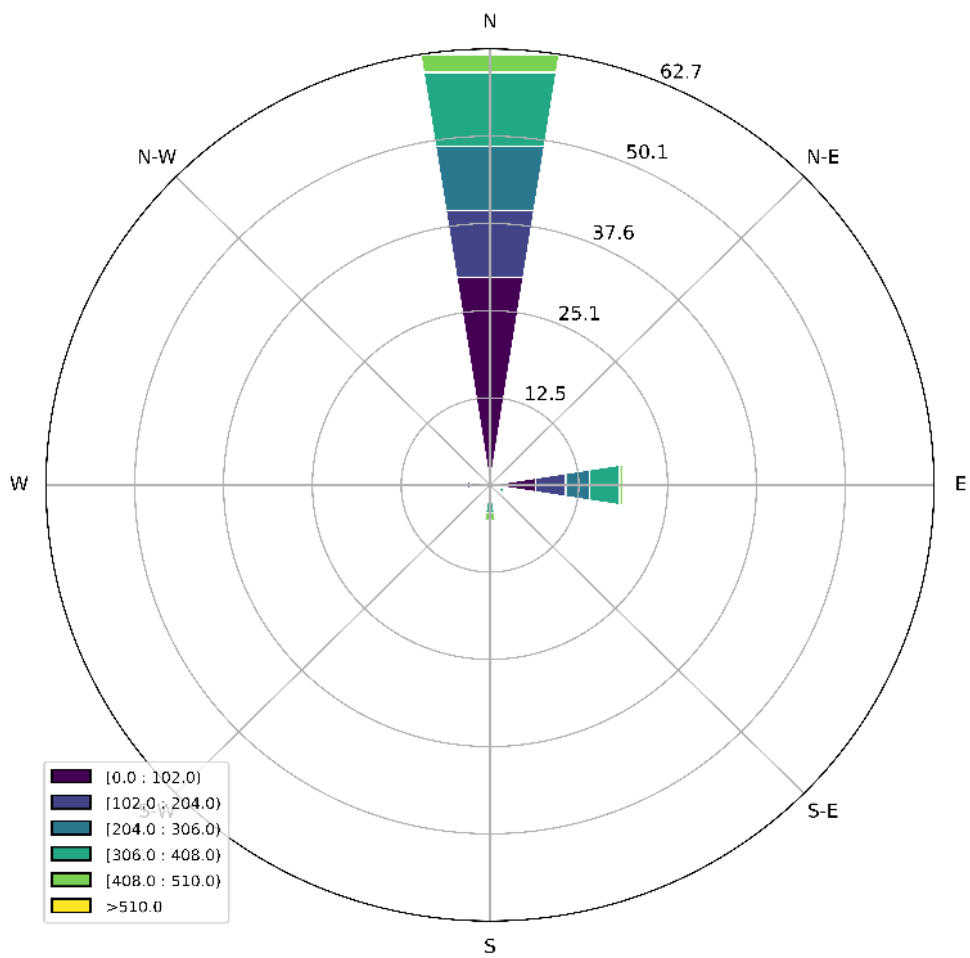


Slika 17

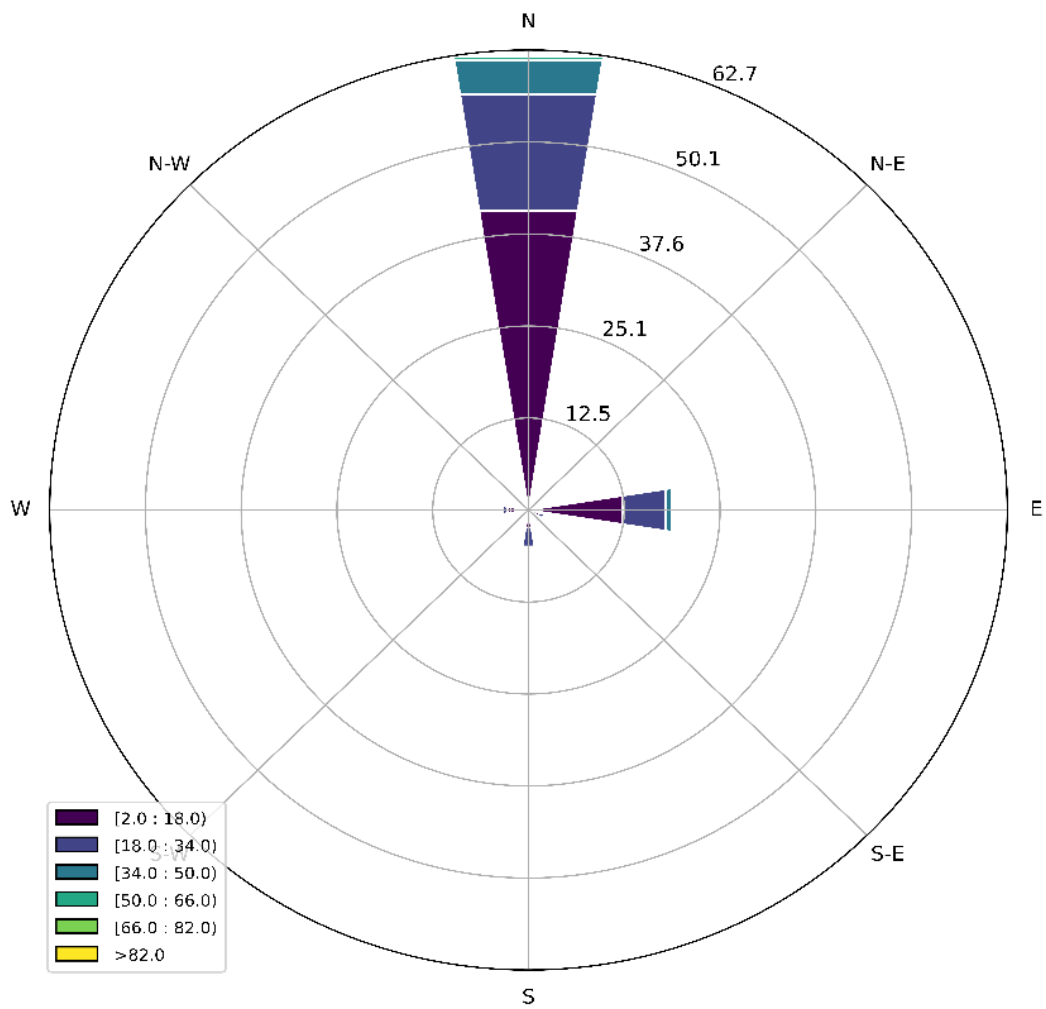
Zavisnost koncentracije  $PM_{10}$  i  $PM_{2,5}$  čestica na gradilištu u zavisnosti od pravca vetra

Na slici 18 prikazane su ruže zagađenja za  $NO_2$ ,  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$ , ukazujući na odnos između koncentracija zagađivača i pravca vetra. Jasno je da je preovlađivao južni I jugoistočni vetar, koji je imao najveći doprinos koncentraciji zagađivača vazduha, a ne vetrovi iz drugih pravaca. Ovo je verovatno zbog obližnjeg položaja iskopa (Slika 2).

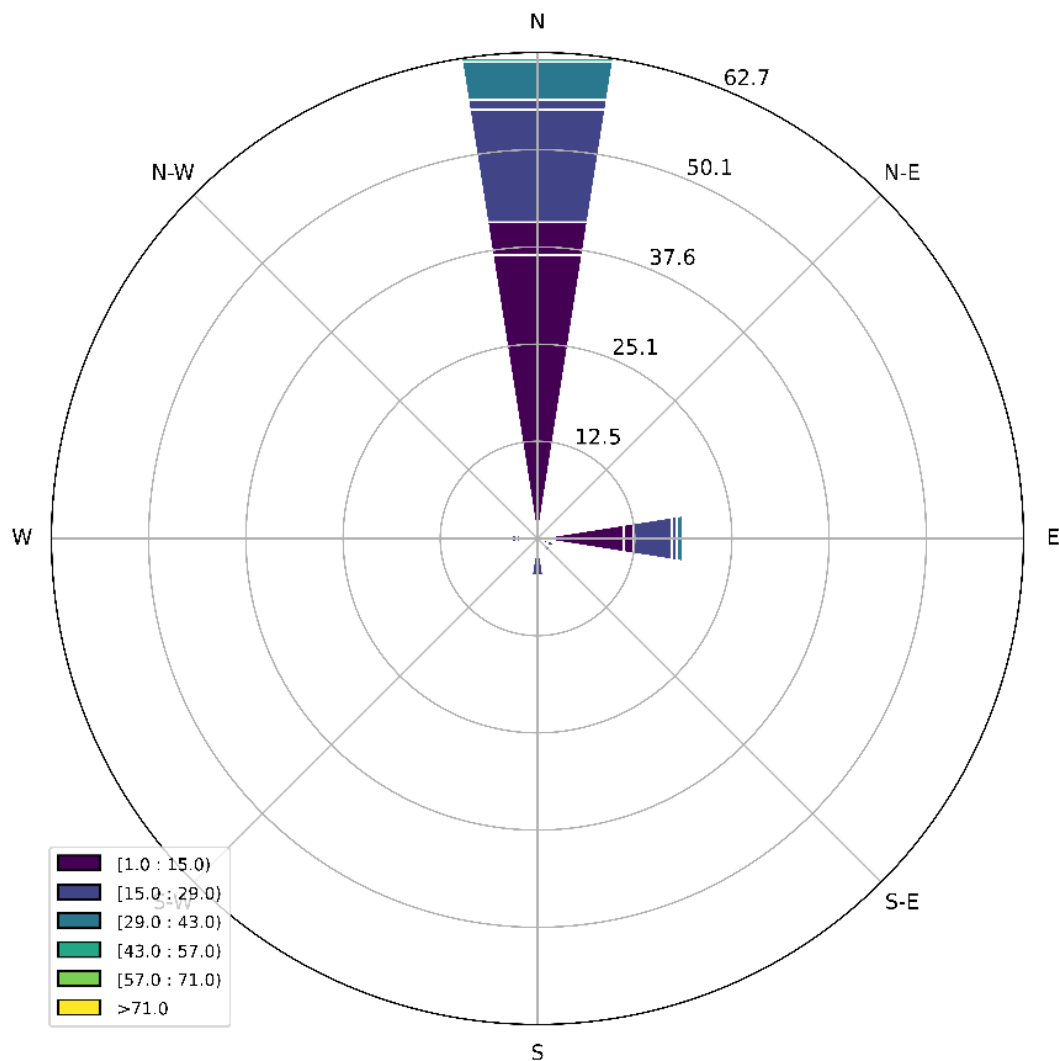




a) Ruža zagađenja za NO<sub>2</sub>



b) Ruža zagađenja za PM<sub>10</sub>



c) Ruža zagađenja za  $\text{PM}_{2.5}$

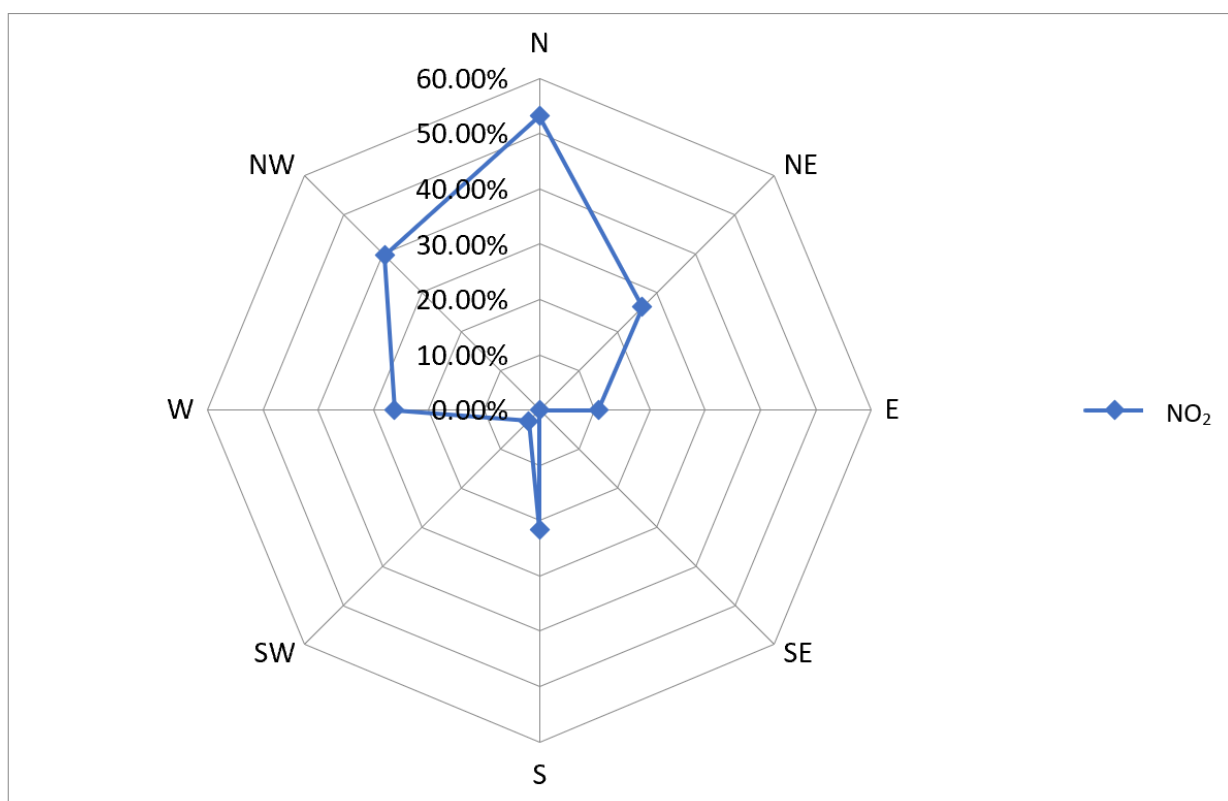
Slika 18

Ruže zagađenja za  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ , i  $\text{PM}_{2.5}$  (koncentracije u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

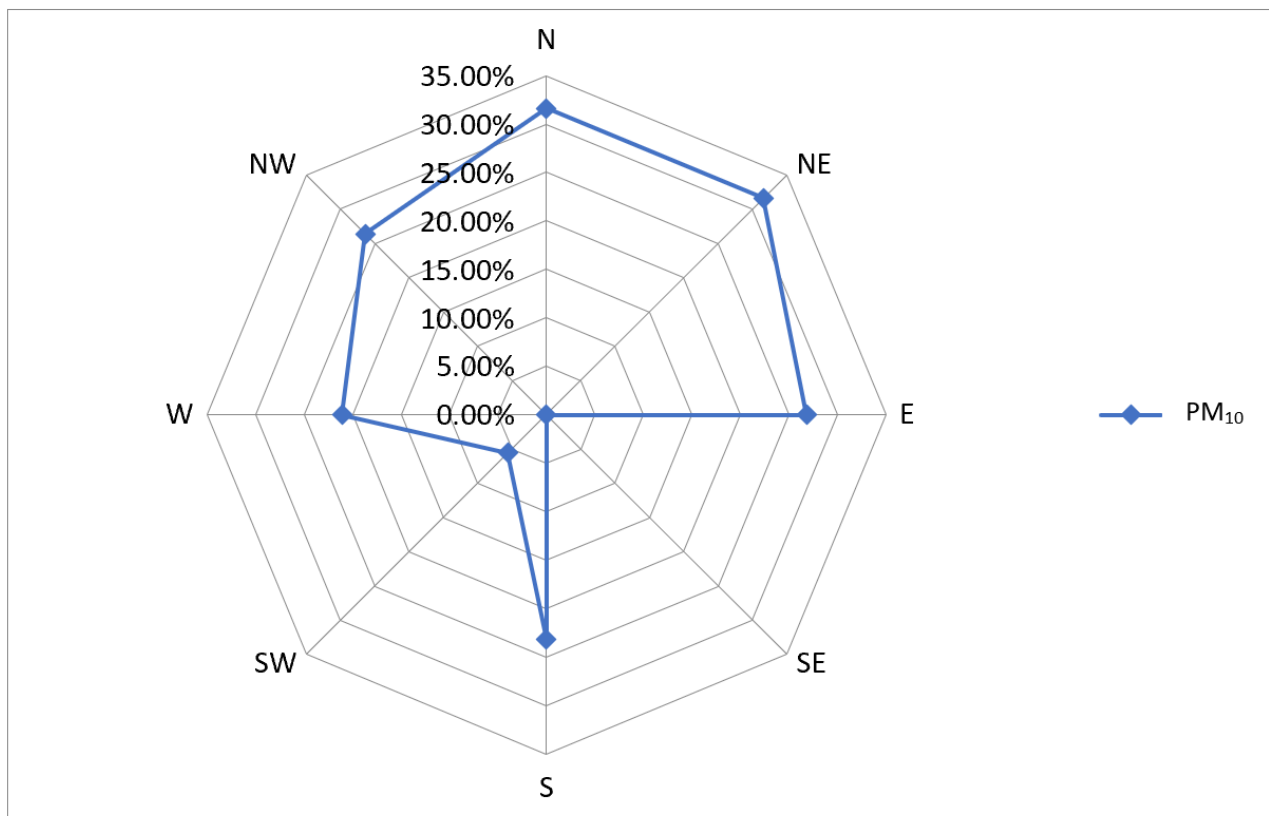
Funkcija uslovne verovatnoće (CPF) izračunava verovatnoću da se izvor nalazi unutar određenog sektora pravca vetra (slika 11). CPF je koristan u određivanju pravca izvora

sa mesta receptora. Međutim, ne može utvrditi stvarnu lokaciju izvora. Zagađenje u ovom slučaju, za koncentracije  $\text{NO}_2$ , dolazi pretežno sa juga (Slika 19a).

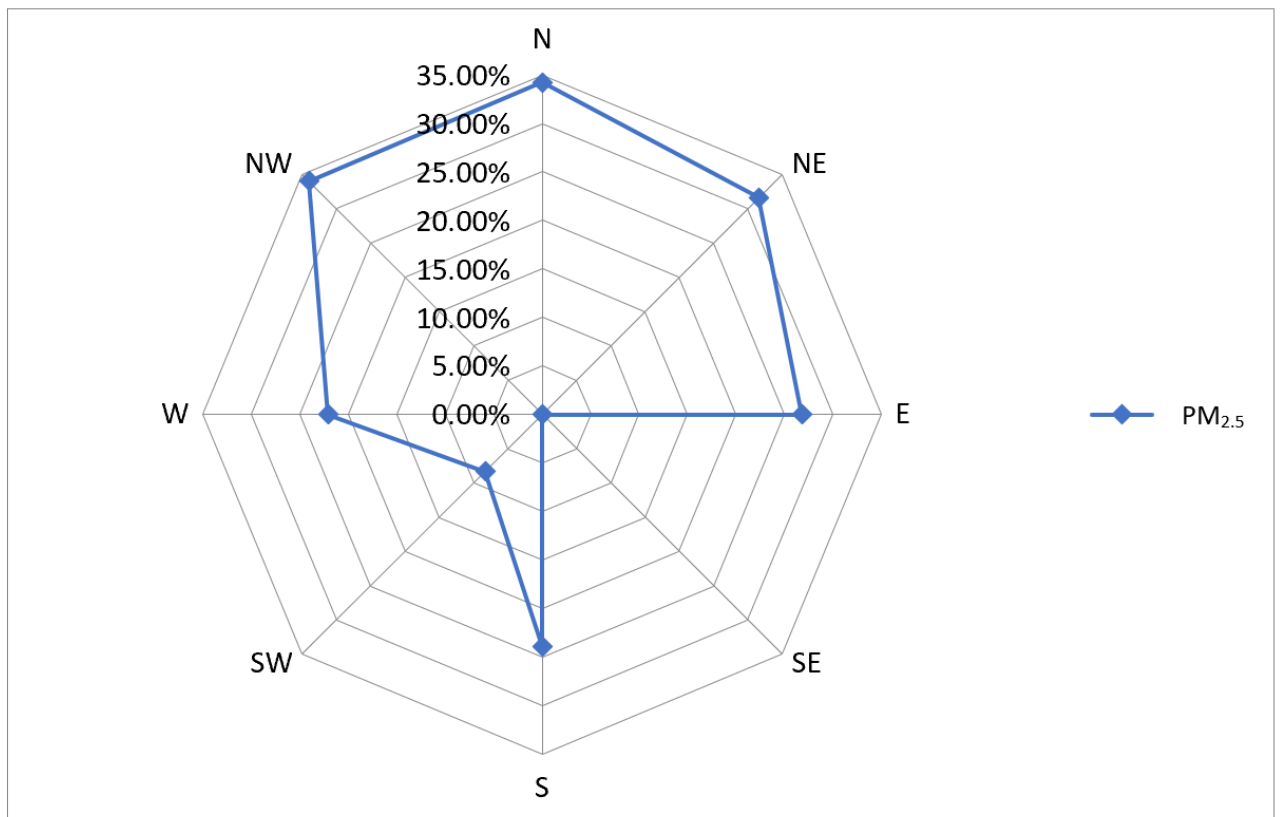
Zagađenje  $\text{PM}_{10}$  dominantno dolazi sa juga, jugozapada i zapada (Slika 19b). Lokacija zone iskopa je zapadno od merne stanice, što je u skladu sa rezultatom. Slični rezultati su prikazani za  $\text{PM}_{2,5}$  (Slika 11c).



a) CPF za  $\text{NO}_2$  koncentracije iznad 75. percentila



b) CPF za PM<sub>10</sub> koncentracije iznad 75. percentila



c) CPF za PM<sub>2.5</sub> koncentracije iznad 75. Percentila

Slika 19. CPF za NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> i PM<sub>2.5</sub> koncentracije iznad 75. percentila

## Glava V

### PREDIKCIONI MODELI

Model predviđanja koncentracija zagađujućih supstanci u vazduhu: MLR model

Prediktori za model za predviđanje NO<sub>2</sub> bili su brzina vetra (m/s), pritisak (kPa), vlažnost (%), smer vetra (°) i temperatura (°C). Zavisna varijabla je bila NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>).

Rezultati modela za NO<sub>2</sub> su prikazani u tabelama 4-6.

Tabela 4 Rezime modela (R-koeficijent korelacije, R kvadratni koeficijent determinacije, Std.Error of the Estimate-standardna greška procene) za predviđanje NO<sub>2</sub>

| R     | R Square | Adjusted R Square | Std.Error of the Estimate |
|-------|----------|-------------------|---------------------------|
| 0.958 | 0.917    | 0.917             | 41.700                    |

Tabela 5 ANOVA tabela (Df-stepeni slobode, F- odnos između grupnih varijacija i varijacija unutar grupe, nivo značajnosti) za predviđanje NO<sub>2</sub>

| <b>Model</b>      | <b>Sum of Squared</b> | <b>Df</b> | <b>Mean Square</b> | <b>F</b> | <b>Sig.</b> |
|-------------------|-----------------------|-----------|--------------------|----------|-------------|
| <b>Regression</b> | 28724409.308          | 5         | 5744881.862        | 3303.797 | 0.000       |
| <b>Residual</b>   | 2583964.619           | 1486      | 1738.873           |          |             |
| <b>Total</b>      | 31308373.928          | 1491      |                    |          |             |

Tabela 6 Koeficijenti modela (t-t-statistika; Sig.-značajnost) za predviđanje NO<sub>2</sub>

| <b>Model</b>              | <b>Unstandardized Coefficients</b> |                   | <b>Standardized Coefficients</b> | <b>t</b> | <b>Sig.</b> |
|---------------------------|------------------------------------|-------------------|----------------------------------|----------|-------------|
|                           | <b>B</b>                           | <b>Std. Error</b> | <b>Beta</b>                      |          |             |
| <b>Konstanta</b>          | -899.221                           | 633.401           |                                  | -1.420   | 0.156       |
| <b>Pritisak (kPa)</b>     | 0.380                              | 0.618             | 0.007                            | 0.615    | 0.539       |
| <b>Vlažnost (%)</b>       | -0.361                             | 0.129             | -0.034                           | -2.791   | 0.005       |
| <b>Temperatura (°C)</b>   | 24.464                             | 0.429             | 0.938                            | 57.070   | 0.000       |
| <b>Pravac vetra (°)</b>   | 0.017                              | 0.018             | 0.008                            | 0.949    | 0.343       |
| <b>Brzina vetra (m/s)</b> | -1.368                             | 2.227             | -0.005                           | -0.614   | 0.539       |



Prediktori za model za predviđanje PM<sub>10</sub> bili su brzina vetra (m/s), pritisak (kPa), vlažnost (%), smer vetra (°) i temperatura (°C). Zavisna varijabla je bila PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>). Rezultati modela za PM<sub>10</sub> prikazani su u tabelama 7-9.

Tabela 7 Rezime modela (R-koeficijent korelacije, R kvadratni koeficijent determinacije, Std.Error of the Estimate-standardna greška procene) za predviđanje PM<sub>10</sub>

| <b>R</b> | <b>R Square</b> | <b>Adjusted R Square</b> | <b>Std. error of the Estimate</b> |
|----------|-----------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 0.726    | 0.527           | 0.525                    | 7.290                             |

Tabela 8 ANOVA tabela (Df-stepeni slobode, F- odnos između grupnih varijacija i varijacija unutar grupe, nivo značajnosti) za predviđanje PM<sub>10</sub>

| <b>Model</b>      | <b>Sum of Squares</b> | <b>df</b> | <b>Mean Square</b> | <b>F</b> | <b>Sig.</b> |
|-------------------|-----------------------|-----------|--------------------|----------|-------------|
| <b>Regression</b> | 87955.640             | 5         | 17591.128          | 331.014  | 0.000       |
| <b>Residual</b>   | 78970.743             | 1486      | 53.143             |          |             |
| <b>Total</b>      | 166926.383            | 1491      |                    |          |             |

Tabela 9 Koeficijenti modela (t-t-statistika; Sig.-značajnost) za predviđanje PM<sub>10</sub>

| Model                     | Unstandardized Coefficients |           | Standardized Coefficients | t       | Sig.  |
|---------------------------|-----------------------------|-----------|---------------------------|---------|-------|
|                           | B                           | Std.Error | Beta                      |         |       |
| <b>Konstanta</b>          | 1948.335                    | 110.731   |                           | 17.595  | 0.000 |
| <b>Pritisak (kPa)</b>     | -1.951                      | 0.108     | -0.523                    | -18.068 | 0.000 |
| <b>Vlažnost (%)</b>       | 0.418                       | 0.023     | 0.543                     | 18.479  | 0.000 |
| <b>Temperatura (°C)</b>   | 0.432                       | 0.075     | 0.227                     | 5.771   | 0.000 |
| <b>Smer vetra (°)</b>     | 0.007                       | 0.003     | 0.048                     | 2.276   | 0.023 |
| <b>Brzina vetra (m/s)</b> | -1.971                      | 0.389     | -0.107                    | -5.063  | 0.000 |

Prediktori za model za predviđanje PM<sub>2,5</sub> bili su brzina vetra (m/s), pritisak (kPa), vlažnost (%), smer vetra (°) i temperatura (°C). Zavisna varijabla je bila PM<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>). Rezultati modela za PM<sub>2,5</sub> prikazani su u tabelama 10-12.

Tabela 10 Rezime modela (R-koeficijent korelacije, R kvadratni koeficijent determinacije, Std.Error of the Estimate-standardna greška procene) za predviđanje PM<sub>2.5</sub>

| <b>R</b> | <b>R Squared</b> | <b>Adjusted R Square</b> | <b>Std. Error of the Estimate</b> |
|----------|------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 0.765    | 0.586            | 0.584                    | 5.900                             |

Tabela 11 ANOVA tabela (Df-stepeni slobode, F- odnos između grupnih varijacija i varijacija unutar grupe, nivo značajnosti) za predviđanje PM<sub>2.5</sub>

| <b>Model</b>      | <b>Sum of Squares</b> | <b>df</b> | <b>Mean Square</b> | <b>F</b> | <b>Sig.</b> |
|-------------------|-----------------------|-----------|--------------------|----------|-------------|
| <b>Regression</b> | 73093.861             | 5         | 14618.772          | 419.966  | 0.000       |
| <b>Residual</b>   | 51726.752             | 1486      | 34.809             |          |             |
| <b>Total</b>      | 124820.613            | 1491      |                    |          |             |

Tabela 12 Koeficijenti modela (t-t-statistika; Sig.-značajnost) za predviđanje PM<sub>2,5</sub>

| Model                     | Unstandardized Coefficients |           | Standardized Coefficients | t       | Sig.  |
|---------------------------|-----------------------------|-----------|---------------------------|---------|-------|
|                           | B                           | Std.Error | Beta                      |         |       |
| <b>Konstanta</b>          | 1730.920                    | 89.617    |                           | 19.315  | 0.000 |
| <b>Pritisak (kPa)</b>     | -1.736                      | 0.087     | -0.538                    | -19.858 | 0.000 |
| <b>Vlažnost (%)</b>       | 0.384                       | 0.018     | 0.577                     | 20.989  | 0.000 |
| <b>Temperatura (°C)</b>   | 0.453                       | 0.061     | 0.275                     | 7.477   | 0.000 |
| <b>Smer vetra (°)</b>     | 0.006                       | 0.002     | 0.048                     | 2.409   | 0.016 |
| <b>Brzina vetra (m/s)</b> | -1.570                      | 0.315     | -0.099                    | -4.984  | 0.000 |

Iz primenjenog modela (Tabele 4-12), MLR modeli su pokazali veće slaganje sa izmerenim koncentracijama zagađivača vazduha za NO<sub>2</sub> (R>0,9) nego za PM čestice (R>0.7).

Model predviđanja koncentracija zagađujućih supstanci u vazduhu: ANN model

Tabela 13 Rezime modela

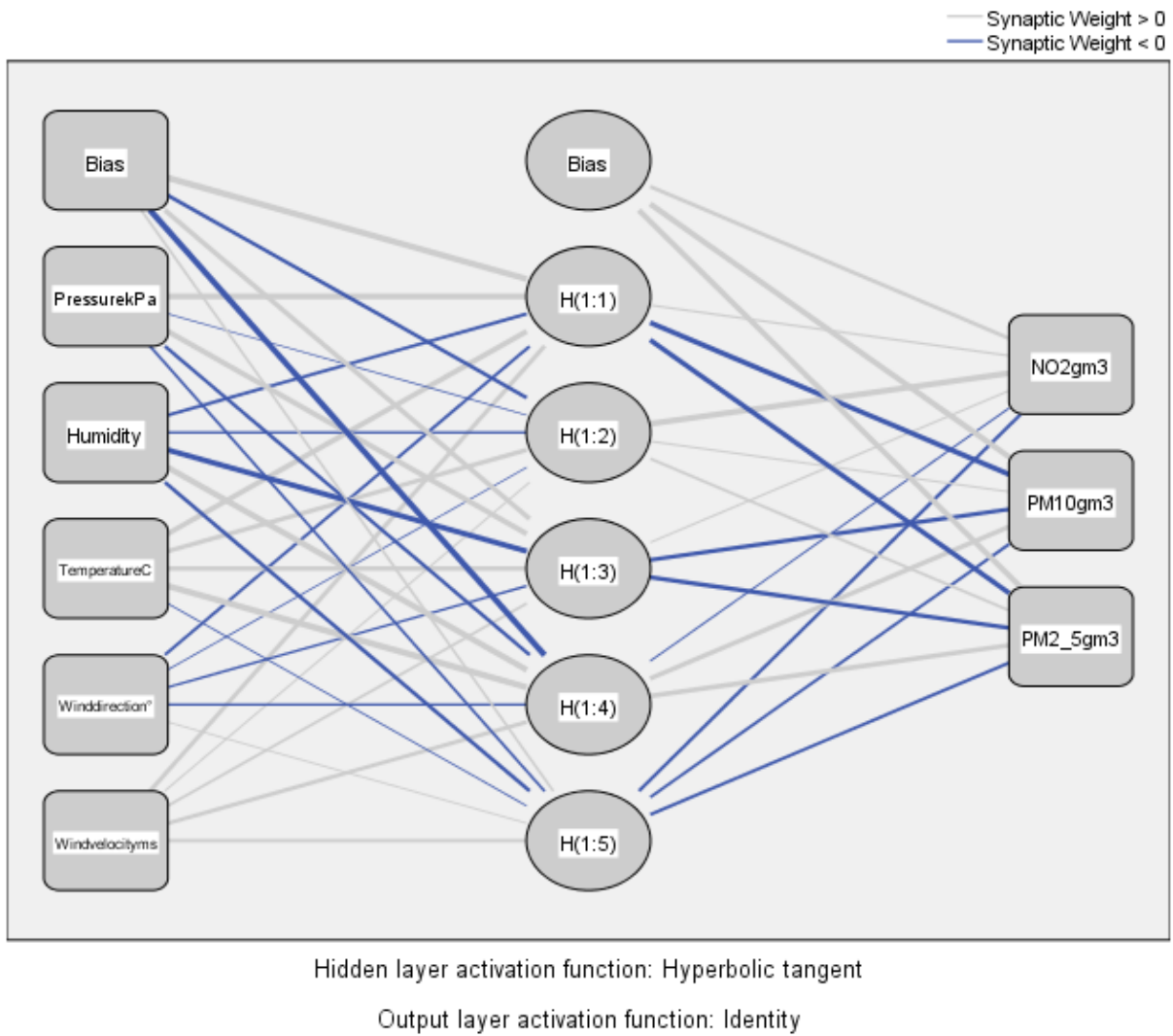
|                 | N    | Percent |
|-----------------|------|---------|
| Sample Training | 1040 | 69.7%   |
| Testing         | 452  | 30.3%   |
| Valid           | 1492 | 100.0%  |
| Excluded        | 0    |         |
| Total           | 1492 |         |

Tabela 14 Informacije o mreži

|             |                                 |   |                    |
|-------------|---------------------------------|---|--------------------|
| Input Layer | Covariates                      | 1 | Pressure [kPa]     |
|             |                                 | 2 | Humidity [%]       |
|             |                                 | 3 | Temperature [C]    |
|             |                                 | 4 | Wind direction [°] |
|             |                                 | 5 | Wind velocity      |
|             |                                 |   | [m/s]              |
|             | Number of Units <sup>a</sup>    |   | 5                  |
|             | Rescaling Method for Covariates |   | Standardized       |
| Hidden      | Number of Hidden Layers         |   | 1                  |

|              |  |                                    |
|--------------|--|------------------------------------|
| Layer(s)     | Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup> | 5                                  |
|              | Activation Function                            | Hyperbolic tangent                 |
| Output Layer | Dependent Variables                            | NO2 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]   |
|              |  | PM10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]  |
|              |  | PM2.5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] |
|              | Number of Units                                | 3                                  |
|              | Rescaling Method for Scale Dependents          | Standardized                       |
|              | Activation Function                            | Identity                           |
|              | Error Function                                 | Sum of Squares                     |

a. Excluding the bias unit



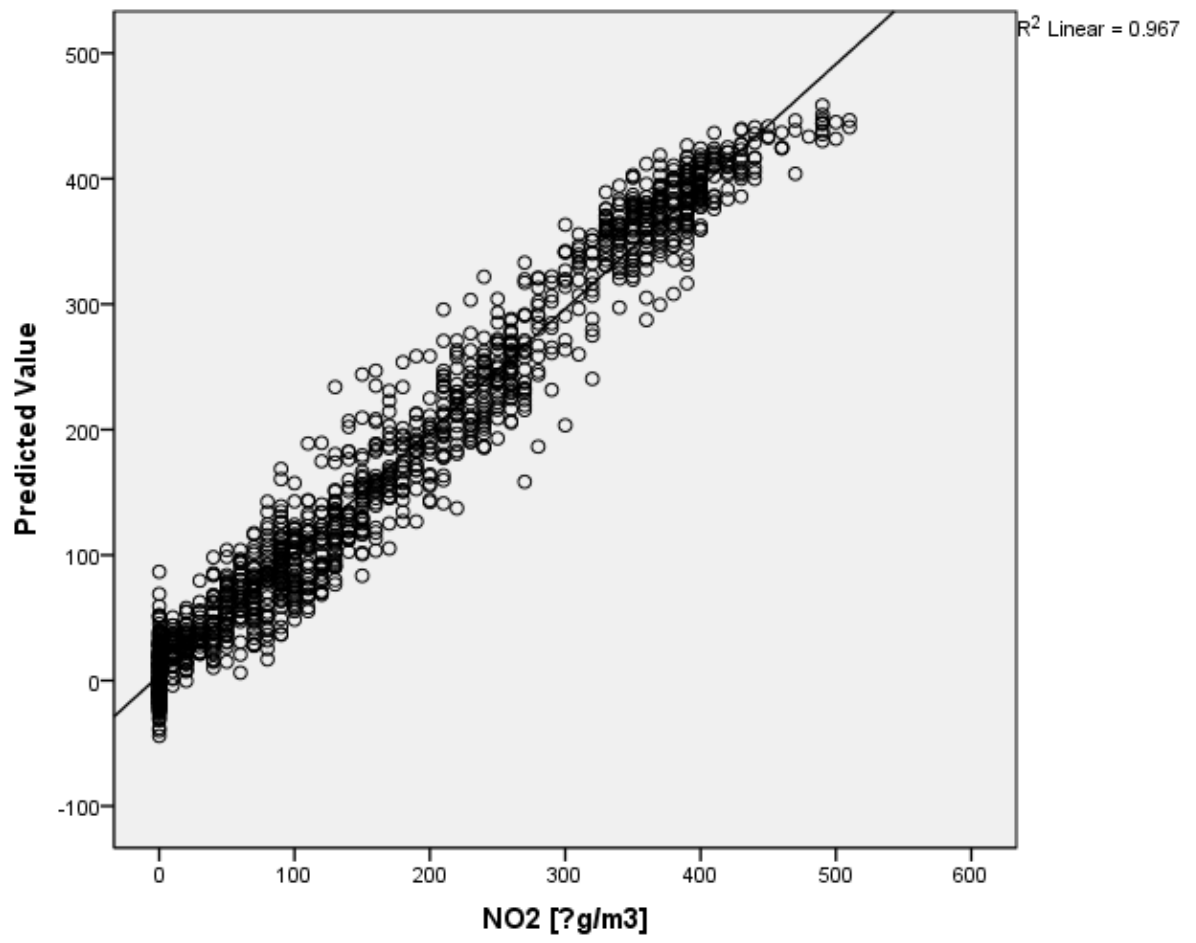
Slika 20. Prikaz lejera ANN

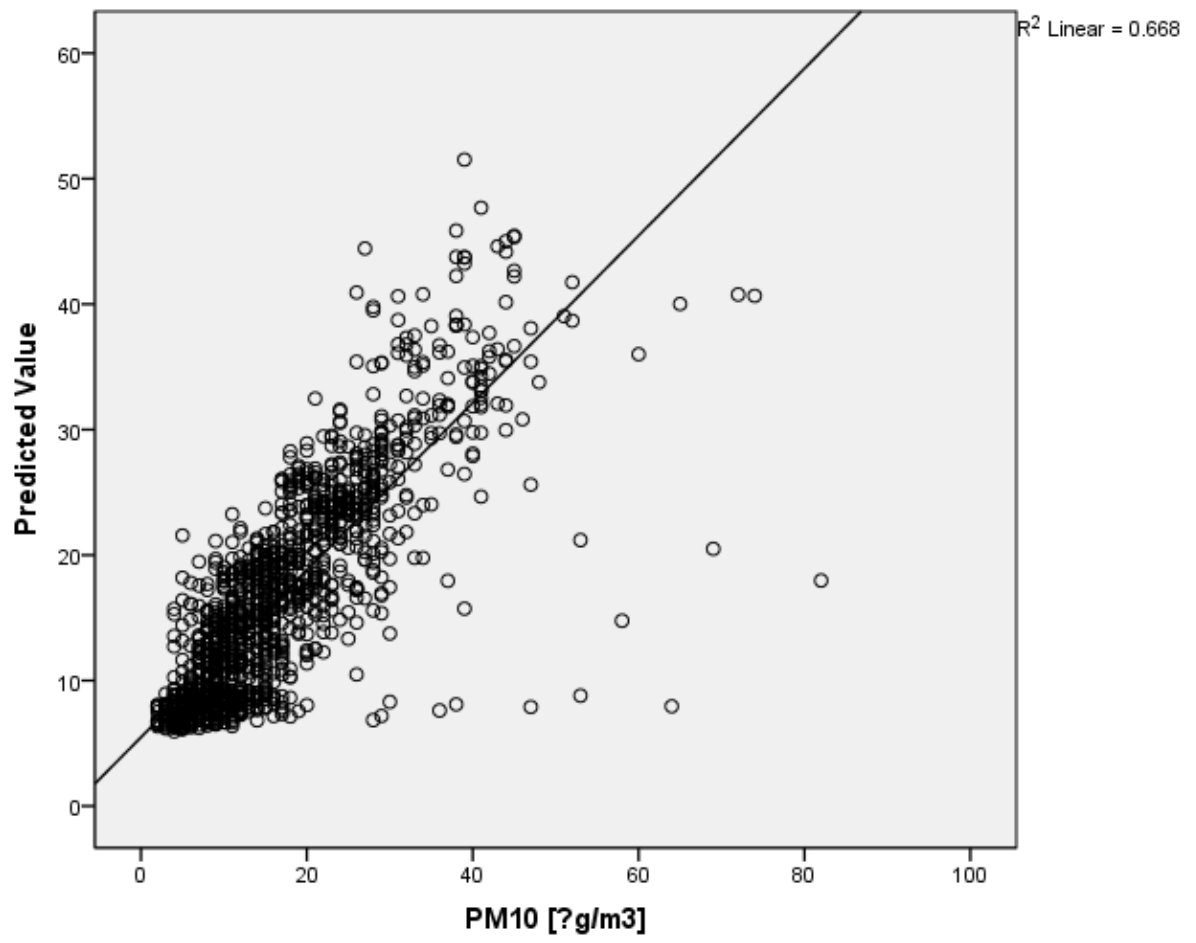
Tabela 15 Rezultati modela

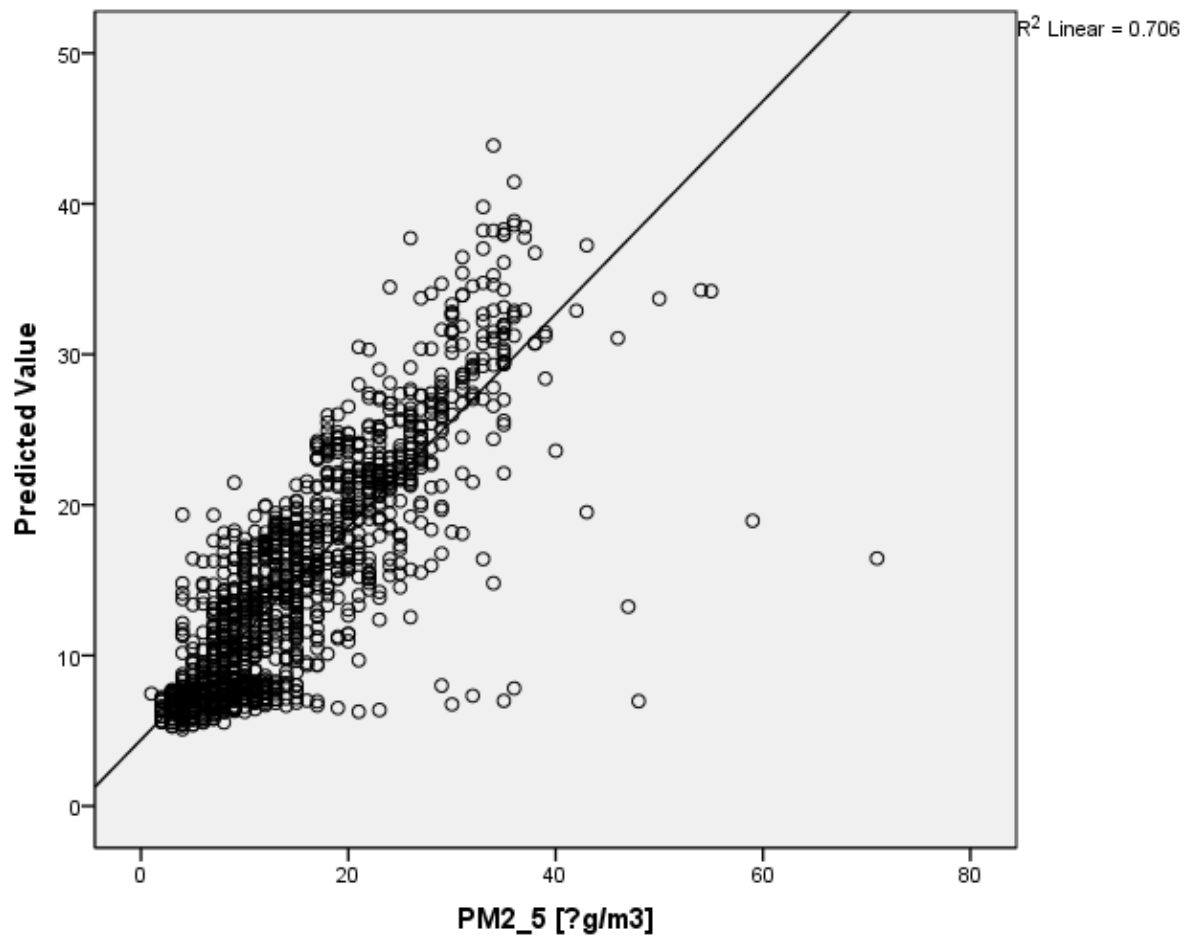
|          |   |   |
|----------|---|---|
| Training | Sum of Squares Error  | 351.995   |
|          | Average Overall Relative Error  | .226  |
|          | Relative Error for Scale NO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] | .033  |
|          | Dependents PM <sub>10</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]              | .342  |
|          | PM <sub>2.5</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]                        | .303  |
|          | Stopping Rule Used  | 1 consecutive step(s) with no decrease in error |
|          | Training Time   | 00:00:00.318                                    |
| Testing  | Sum of Squares Error  | 106.071   |
|          | Average Overall Relative Error  | .186  |
|          | Relative Error for Scale NO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] | .034  |
|          | Dependents PM <sub>10</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]              | .302  |
|          | PM <sub>2.5</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]                        | .268  |
|          |   |   |

a. Error computations are based on the testing sample.









Slika 21. Rezultati ANN modela

## ZAKLJUČAK

Podaci o meteorološkom i građevinskom intenzitetu su prikupljeni da bi se utvrdili glavni faktori koji utiču na emisiju građevinske prašine, što može biti osnova za smanjenje uticaja prašine nastale građevinskim aktivnostima na okolinu. Glavni zaključci disertacije su sledeći:

Praćenjem gradilišta na licu mesta u gradu Beogradu, ova studija je utvrdila da je nivo emisije prašine iz građevinskih aktivnosti relativno visok. Prosečna koncentracija  $PM_{10}$  bila je  $16,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a koncentracija  $PM_{2,5}$   $8,37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Analizirajući prosečne 24-časovne vrednosti za  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$ , može se zaključiti da  $PM_{2,5}$  predstavlja daleko veću opasnost po zdravlje zbog daleko viših vrednosti u odnosu na propisane dnevne granice. Pored toga, u poređenju sa koncentracijom uz vetar, gradilište pravi niz vetar, koncentracija  $PM_{10}$  i  $PM_{2,5}$  povećana je za oko 70% i 35%, respektivno, što ukazuje da je građevinska aktivnost imala značajan uticaj na kvalitet vazduha u okolini.

Što se tiče glavnih faktora koji utiču na emisiju građevinske prašine, rezultati pokazuju da emisija građevinske prašine nije bila u značajnoj korelaciji ni sa jednim meteorološkim faktorom kada se nije previše menjao.

Zbog složenosti, kontinuiteta i vremenski promenljivog karaktera emisije građevinske prašine, tradicionalni modeli predviđanja zasnovani na regresiji ne mogu tačno predvideti koncentracija prašine na gradilištu. Da bi simulirali građevinsku prašinu

usled više izvora zagađenja, pratili smo emisije prašine tokom veoma važne faze projekta stambene izgradnje, odnosno zemljanih radova iskopavanja.

Prikupljeni su podaci o zagađujućim supstancama i meteorološkim parametrima u periodu intenzivnih radova. Identifikovan je trening set i set za proveru predikcije iz uzorka za neuronsku mrežu. Na osnovu algoritma izgrađena je neuronska mreža- model koji odražava koncentracije PM čestica i NO<sub>2</sub> u ovoj fazi rada na gradilištu. Na osnovu rezultata simulacije predviđanje, izlazni podaci modela neuronske mreže demonstrirali povoljnu i idealnu korelaciju u poređenju sa tradicionalnim regresionim modelom, koncentracija.

Ovaj predikcioni model pomoću neuronskih mreža je pokazao mogućnost upotrebe za predviđanje promena koncentracije prašine u različitim radnim područjima i pod različitim klimatskim uslovima, što pruža naučnu osnovu za kontrolu zagađenja.

## Literatura

Araújo, I.P.S.; Costa, D.B.; Moraes, R.J.B.D. Identification and Characterization of Particulate Matter Concentrations at Construction Jobsites. *Sustainability* 2014, 6, 7666–7688.

Azarmi, F.; Kumar, P.; Mulheron, M. The exposure to coarse, fine and ultrafine particle emissions from Concrete mixing, drilling and cutting activities. *J. Hazard. Mater.* 2014, 279, 268–279. [CrossRef] [PubMed]

Chen, H.; Wu, D.; Yu, J. Comparison of characteristics of aerosol during rainy weather and cold air-dust Weather in Guangzhou in late March 2012. *Theor. Appl. Climatol.* 2016, 124, 451–459.

Ćirišan, A., Podračanin, Z., Bujanović, L.N. et al. Trend Analysis Application on Near Surface SO<sub>2</sub> Concentration Data from 2010 to 2020 in Serbia. *Water Air Soil Pollut* 234, 186 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06111-3>

Engelhardt, M.; Bain, L. Introduction to Probability and Mathematical Statistics;  
Duxbury Press: London, UK, 2000; ISBN 978-053-438-020-5.

EPA. Criteria Air Pollutants. Available online: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants#sel> (accessed on 9 June 2021).

Fan, S.B.; Li, G.; Tian, G. Fugitive dust emission characteristics from construction site by field measure. *Environ. Sci. Technol.* 2011, 34, 209–211.

Ge, H.Y. Characteristics of Particulate Matter Concentrations and Their Relationship with Meteorological Factors in Turpan. *Desert Oasis Meteorol.* 2018, 12, 78–83.

Guo, M. Construction Fugitive Dust Quantification Modeling Based on BP Neural Network; Lanzhou University: Gansu, China, 2010.

Hassan, H.A.; Kumar, P.; Kakosimos, K.E. Flux estimation of fugitive particulate matter emissions from loose Calcisols at construction sites. *Atmos. Environ.* 2016, 141, 96–105.

Kinsey, J.S.; Linna, K.J.; Squier, W.C.; Muleski, G.E.; Chatten, C., Jr. Characterization of the Fugitive Particulate Emissions from Construction Mud/Dirt Carry out. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2004, 54, 1394–1404.

Ling Yao, Ning Lu, Xiafang Yue, Jia Du, and Cundong Yang (2015) Comparison of Hourly PM<sub>2.5</sub> Observations Between Urban and Suburban Areas in Beijing, China *Int J Environ Res Public Health.*; 12(10): 12264–12276. Doi: 10.3390/ijerph121012264

Luo, Y. Study on Dust Emission Characteristics of Typical Construction Site in Chongqing; Southwest University: Chongqing, China, 2017.

Moraes, R.J.B.D.; Costa, D.B.; Araújo, I.P.S. Particulate Matter Concentration from Construction Sites: Concrete and Masonry Works. *J. Environ. Eng.* 2016, 142, 05016004.

Moraes, R.J.B.; Costa, D.B.; Priscylla, I.; Araújo, S. Particulate Matter Concentration from Construction Sites: Concrete and Masonry works; ASCE: Reston, VA, USA, 2011; pp. 1–11.

Novaković, V. Menadžment u savremenom građevinarstvu. Stručna knjižara 2003. Beograd.



Ulniković, V.P., Kurilić, S.M. & Staletović, N. Air Quality Benefits From Implementing Best Available Techniques in Copper Mining and Smelting Complex Bor (Serbia). *Water Air Soil Pollut* 231, 160 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04520-2>

Wong, Y. J., Yeganeh, A., Chia, M. Y., Shiu, H. Y., Ooi, M. C. G., Chang, J. H. W., Shimizu, Y., Ryosuke, H., Try, S., Ahmed Elbeltagi, (2023) Quantification of COVID-19 impacts on NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>: Systematic model selection and hyperparameter optimization on AI-based meteorological-normalization methods, *Atmospheric Environment*, 301,119677,ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119677>

Zhang, W.T.; Wang, X.S.; Liu, Z.R.; Zhang, Y.H.; Shao, M.; Cheng, Q.; Wu, D.G.; Tian, W. Construction Fugitive PM<sub>10</sub> Emission and Its Influences on Air Quality in Guiyang. *Acta Scientiarum Nat. Univ. Pekin.* 2009, 46, 258–264.

Zhao, Y.; Li, Y.; Zhang, C.H.; Wang, Q.; Jian, T.; Chen, Z. Spatial dispersion laws of particulate matter from Construction work site of municipal engineering. *Ecol. Environ. Sci.* 2010, 19, 2625–2628.

Yan, H.; Ding, G.; Li, H.; Wang, Y.; Zhang, L.; Shen, Q.; Feng, K. Field Evaluation of the Dust Impacts from Construction Sites on Surrounding Areas: A City Case Study in China. *Sustainability* 2019, 11, 1906. <https://doi.org/10.3390/su11071906>