

Multi-funkcijski merilni sistem za ovrednotenje mikro - okolij

Anton Novak, Rok Tavčar, Gaber Begeš

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
an4630@student.uni-lj.si, rok.tavcar@fe.uni-lj.si, gaber.beges@fe.uni-lj.si

Multipurpos measurement system for micro-environments

Abstract. *We have developed a system of devices for detailed monitoring of environmental parameters in indoor and outdoor environments. Designed for classrooms, our system monitors a variety of parameters that affect the well-being of users. Using digital sensors and an ESP32 microcontroller, we ensure real-time data transmission and storage. By selecting the appropriate sensors, our system also supports environmental research in urban, agricultural, peri-urban, rural and other locations, providing comprehensive data for developing environmental models and exploring correlations between different parameters.*

Povzetek. *Razvili smo sistem naprav za podrobno spremljanje okoljskih parametrov v notranjih in zunanjih okoljih. Naš sistem, namenjen učilnicam, spremlja različne parametre, ki vplivajo na dobro počutje uporabnikov prostorov. Z uporabo digitalnih senzorjev in mikrokontroler ESP32 zagotavljamo prenos in shranjevanje podatkov v realnem času. Z izbiro ustreznih senzorjev naš sistem podpira tudi okoljske raziskave v mestih, kmetijskih, primestnih, podeželskih in drugih krajih, saj zagotavlja vsestranske podatke za razvoj okoljskih modelov in raziskovanje korelacij med različnimi parametri.*

1 Uvod

V laboratoriju za merjenje in kakovost smo razvili sistem naprav za podrobno spremljanje okoljskih parametrov v prostoru. Sistem smo razvili konkretno za potrebe okoljskega monitoringa v učilnicah, in sicer kot orodje za iskanje vplivnih parametrov okolja, na počutje oseb, ki v prostoru so [1]. Slednji sistem se je izkazal kot dobro orodje za spremljanje in raziskovanje okoljskih parametrov.

Ko vstopamo v raziskovanje okolja, je zelo pomembno, da se dobro zavedamo njegovih lastnosti. Posebej v naravnih okoljih pa tudi sicer, so procesi, sistemi in mnogi parametri med seboj prepleteni, povezani in soodvisni [2]. Že osnovna okoljska parametra, kot sta temperatura in relativna vlaga, imata posebej v zaprtih prostorih pomembno korelacijo, toliko bolj kompleksni odnosi pa nastopajo med zaznavanjem oseb, biokemijskimi procesi in široko paleto veličin, ki nastopajo v okolju. V primeru, ko želimo o naravnem

okolju pridobiti čim bolj verodostojne podatke, je ključnega pomena, da ne omejujemo in spreminjamo naravnih pogojev in v splošnem čim manj posegamo v prostor. Poseg v prostor namreč lahko medsebojno odvisne lastnosti naravnega okolja spremeni, zajeti podatki, predvsem tisti, ki se nanašajo na žive organizme pa lahko slabo predstavljajo resnično naravno stanje [3, 4, 5].

Širšo sliko okolja in nekatere bistvene podatke v razmerama urbanih okoljih pokrijejo vremenske postaje in meteorološke opazovalnice. Vendar to večkrat ni dovolj za podrobno analizo okolja, ki ga želimo preučevati. Druge možnosti so namenske naprave, za spremljanje specifičnih okoljskih parametrov [6]. Te naprave so zelo zanesljive in dosegajo velike točnosti. Največja pomanjkljivost je le, da tak sistem zahteva svojo ceno, prostor, in lahko tudi določene dodatne zahteve za optimalno delovanje. Na drugi strani pa obstajajo cenene naprave in platforme, ki omogočajo široko paleto funkcionalnosti, kar je za merjenje okoljskih parametrov ugodno, seveda pa je treba zagotoviti ustrezno točnost in zanesljivost takšnega sistema.

Idealna tehnološka rešitev za zajemanje okoljskih parametrov bi združevala obe prej opisani modalnosti. Po eni strani točne, sledljive in zanesljive meritve, kot jih omogočajo specialni merilniki, hkrati pa sposobnost merjenja več parametrov, nezahtevno uporabo in čim manjše posege v prostor tako pri umestitvi, med merjenjem in med vzdrževanjem. Veliko možnosti za slednjo rešitev omogočajo vse bolj uveljavljeni digitalni senzori, ki za zajemanje meritev ne zahtevajo veliko podpornih sistemov, saj se A/D pretvorba zgodi že znotraj senzorja. Tako lahko sistem velikega števila senzorjev podpira že skoraj vsak nekoliko bolj zmogljiv mikrokontroler. S tem dosežemo željeno enostavnost, majhnost in široko paleto možnosti za zajemanje okoljskih parametrov. Kljub dobrim lastnostim pa s takim sistemom naredimo kompromis, saj digitalni senzori v kompaktnih sistemih zaenkrat ne omogočajo primerljivo kakovostnih meritev kot posebna merilna oprema.

Razlogov, zakaj je slednji sistem kljub slabšim merilnim specifikacijam, vseeno uporaben za široko paleto aplikacij, kjer želimo pridobiti podrobno predstavo o dogajanju v opazovanem okolju, je več [7]. Eden je ta, da je naravno okolje, če vanj posebej ne posegamo nehomogeno in se ne preneha spreminjati, tako že samo po sebi vnaša v meritve razmeroma velike

negotovosti. V prostoru imamo na primer več virov vlage, toplote, VOC ... (rastline, grelna telesa, dišave, čistila, človek), zaradi katerih ti parametri po prostoru niso enakomerno razporejeni. Že manjši premiki zraka v okolici senzorskega sistema pomenijo zaznavno spremembo parametrov tudi v primeru digitalnih senzorjev. Drug razlog pa je, da nam v naravi dostikrat bolj kot točen podatek specifične veličine koristi podatek o spremembah in medsebojni odvisnosti parametrov v opazovanem okolju.

Kratice VOC označuje hlapljive organske spojine (ang. volatile organic compounds), ki so prisotne v zraku. Gre za široko paleto organskih spojin (temeljijo na ogljikovodikovih strukturah), ki se sproščajo iz gradbenih materialov, lakov, barv, dišav, kozmetičnih izdelkov, čistil, hrane in drugih virov. Nekatere od njih, zlasti v večjih količinah, lahko vonjamo, drugih ne. Običajno v prostoru ne merimo prisotnosti vsakega posebej, ampak skupno prisotnost VOC. Njihov vpliv na človeka ni popolnoma jasen, izkaže pa se, da so lahko vzrok draženja dihal, glavobolov in slabega počutja v prostoru. [1]

2 Primer realnega okolja

V našem konkretnem primeru je bil sistem namenjen za raziskovanje vpliva okolijskih parametrov na osebe v zaprtem prostoru. V sodobnem načinu življenja povprečen človek velik del dneva preživi v zaprtem prostoru, zato je pomembno razumeti, katere veličini in kako vplivajo na naše počutje v prostoru, sposobnost opravljanja nalog ter predvsem dolgoročno homeostazo in zdravje [1].

Raziskovanje v realnem prostoru ima veliko mero izzivov. V primeru življenjskih prostorov je ključnega pomena, da ohranimo vse funkcionalnosti prostora. Če želimo opazovati vpliv na delovanje drugih subjektov v prostoru, na primer počutje oseb, moramo paziti, da sistem ni preveč moteč, saj bi s tem popačili rezultate meritev. Hkrati pa moramo ohraniti vse tehnološke zahteve za izvedbo merilnega sistema.

Zastavljena problematika spremljanja okolijskih parametrov tako vzpostavlja tehnološke zahteve, h katerim mora slednji sistem stremeti. Te lastnosti so naslednje.

Zajemanje potencialno vplivnih okolijskih parametrov glede na raziskovalno vprašanje.

Ustrezno razpršenost zajemanja parametrov v opazovanem okolju, da pridobimo čim boljšo predstavo o dogajanju v prostoru.

Opazovanje posredno pomembnih informacij o okolici.

Beleženje in shranjevanje meritev skupaj z ustreznimi metapodatki (čas, lokacija zajema) za nadaljnjo obdelavo.

Glede na razpoložljive vire zagotoviti zahtevano napajanje in branje podatkov z naprave.

Zagotoviti ustrezno ohišje, tako z vidika vpliva na merjenje kot z vidika vklapljanja v kontekst okolja.

3 Sistem

3.1 Predstavitev sistema

Sistem za spremljanje okolijskih parametrov smo zasnovali v obliki 10 naprav, namenjenih za razporeditev po prostoru in ene zunanje naprave. Deset notranjih naprav je namenjenih spremljanju nehomogenosti predvsem osnovnih okolijskih parametrov. V primeru zaprtih bivalnih prostorov so to temperatura, relativna vlažnost zraka, CO₂, hrup, osvetljenost in prašni delci. To so tudi parametri, ki smo jih z digitalnimi senzorji sposobni zajemati z ustrezno točnostjo, da tudi v relativno majhnem prostoru 10-krat 10 metrov zaznamo razlike, če so te zaznavno prisotne. Namen zunanje enote je zajemanje podatkov, ki posredno vplivajo na okolje v prostoru. To so tako temperatura, vlaga, hrup kot tudi podatki o sončnem obsevanju in plinski sestavi zraka. To so parametri, ki ne nujno neposredno vplivajo na opazovan prostor, a so lahko pomemben vpliven dejavnik tekom uporabe prostora. (Na primer med zračenjem, v vročih ali deževnih dneh, uporabi naravne svetlobe v prostoru ...).

3.2 Arhitektura



Slika 1. Izgled merilne naprave (levo zunanji prikaz, desno notranji).

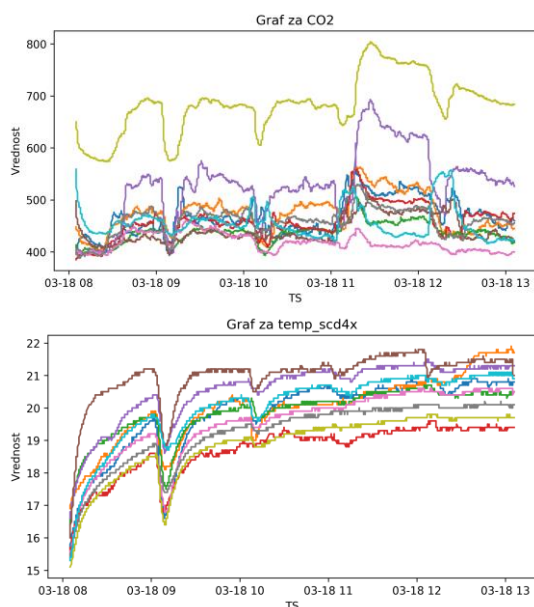
Sistem temelji na mikrokontrolerjih ESP32, ki omogočajo digitalno komunikacijo (SPI, I2C), A/D pretvorbo (v našem primeru ni uporabljena), ter brezžično komunikacijo preko Wi-Fi in Bluetooth tehnologije.

Vse naprave sistema so generično zasnovane. To omogoča lažjo nadomestljivost ter univerzalnost. V primeru odpovedi katere koli od naprav se jo enostavno nadomesti z novo ali drugo napravo. Za zagotavljanje sledljivosti je zagotovljeno z dvema fizično nastavljivima preklopnikoma, ki omogočata 256 kombinacij fizičnih ID števil naprave, znotraj sistema.

Vezje ima 6 konektorjev namenjeni komunikaciji preko I2C vodila, 1 konektor za komunikacijo preko SPI vodila in 4 konektorje za analogne senzorje, ki so vezani preko zunanjega 16 bitnega A/D pretvornika na mikrokontrolnik. Ti vhodi so namenjeni za različne tipe senzorjev.

Izvedeni so s standardnimi konektorji *JST_XH_B6B-XH-A*, kar omogoča enostavno pripravo in povezovanje digitalnih senzorjev na matično vezje.

Napajanje vezja je izvedeno v dveh oblikah, eno je avtonomno baterijsko napajanje, ki ima kapaciteto delovanja okvirno za 20 ur delovanja. Realizirano je s tremi polnilnimi *Li-ion* baterijami. Drug način napajanja je preko *USB-C* priključka, ki omogoča tako polnjenje in napajanje kot tudi serijsko komunikacijo in programiranje mikrokrmilnika.

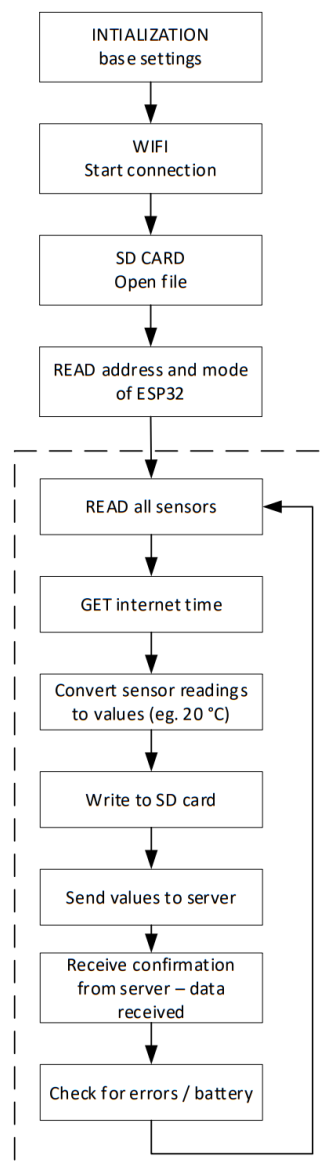


Slika 2. Vizualizacija meritev sistema za senzor CO2 (zgoraj) in temperaturo (spodaj) zajeto med predavanji 18.3.2024. Vsaka črta prikazuje odčitke ene od naprav sistema, razporejenega v prostoru v odvisnosti od časa. Odstopanja v odčitkih nakazujejo na nehomogenost okolja v prostoru.

3.3 Shranjevanje meritev, pridobljenih na merilnih enotah

Vsi prejeti podatki se shranjujejo na treh lokacijah. To omogoča implementacijo različnih nivojev zaščite podatkov in dostopa do njih.

Ko posamezna merilna postaja zaključi en cikel meritev, shrani vse pridobljene podatke na svojo spominsko kartico. S tem je zagotovljeno, da noben izmerjen parameter ni izgubljen, razen če pride do okvare merilne postaje. Ta način shranjevanja deluje tudi, če se izgubi internetna povezava. Pomanjkljivost tega načina shranjevanja je zelo slaba dostopnost do podatkov, saj je treba vsako spominsko kartico posebej prebrati in obdelati podatke, shranjene na njej.



Slika 3. Diagram poteka programa za zajemanje meritev

Druga lokacija, kjer se shranjujejo podatki, je lokalni strežnik, na katerega pošiljajo izmerjene podatke vse merilne postaje na tem lokalnem omrežju. Na lokalnem strežniku se shranjujejo vsi surovi podatki v lokalno podatkovno bazo. Ta način shranjevanja ima izboljšano dostopnost, saj so vsi podatki shranjeni na enem mestu, prav tako pa omogočajo hitrejšo obdelavo podatkov, ker jih ni treba pretvoriti iz tekstovnega tipa podatkov.

Lokalni strežnik vse pridobljene izmerjene podatke pošilja na strežnik, ki je dostopen preko spleta. Na ta strežnik je mogoče dostopati iz kjerkoli in pridobiti okrnjene zadnje izmerjene podatke. Ta dostop je zaščiten z geslom in omogoča, da zunanje aplikacije lahko dostopajo do trenutnih podatkov in da se lahko enostavno preveri delovanje merilnih postaj. Popoln dostop do podatkov na tem strežniku je mogoč samo iz fakultetnega omrežja s SSH (Ang. Secure shell protocol) dostopom ali zunaj njega s SSH in VPN (ang. Virtual private network).

To omogoča varno shranjevanje izmerjenih podatkov in

TABELA 1. PRISOTNOST SENZORJEV V NAPRAVI

Senzor	ID	Prisotnost v napravi										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11*
Temp, RH, VOC, NOC, PM	SEN55											
Osvetljenost	VEML3235											
Zračni tlak	MS583702BA01-50											
TVOC	ZMOD4410											
CO ₂	SCD40											
Hrup	Teensy											
Pospeškometer	ICM42688											
SO ₂ senzor	01-ES1-SO2-100											
O ₃ senzor	01-ES1-O3-100											
NO ₂ senzor	01-ES1-NO2-1000											
CO senzor	01-ES1-CO-100											
Obsevanost	ML-01											

* Zunanja enota

Legenda:

	Je prisoten
	Ni prisoten

dostop do njih.

Podatkovni bazi shranjujeta 34 različnih podatkov (Izmerjeni podatki in metapodatki) za vsako meritev vsake merilne postaje. S tem je omogočena enostavna obdelava podatkov, saj je mogoče podatke hitro razvrstiti glede na čas, lokacijo, merilno postajo itd. Primer vizualizacije meritev za nekaj parametrov prikazuje slika 2.

3.4 Programska oprema in uporabniški vmesnik

Programska koda temelji na mikrokrmilniku ESP32 prilagojeni različici programskega jezika C++. Zaenkrat opravlja predvsem ključne funkcionalnosti za delovanje sistema. Procesi so shematsko prikazani v sliki 3.

Na tej stopnji ni izveden noben dodaten uporabniški vmesnik, ki bi omogočal enostavnejšo komunikacijo in upravljanje z napravo. Slednje je mogoče zgolj neposredno prek spreminjanja programa in reprogramiranja naprave.

Dostop do meritev s spletnega strežnika je mogoča preko vmesnika *Putty*, ki vzpostavi povezavo med računalnikom in strežnikom. Podatki se lahko urejajo in pregleduje neposredno v programu *Excel* lahko pa se jih uvozi v *Python* skripto, ali kateri drugi zelen program za

obdelavo podatkov. Zaenkrat je sistem omejen na lokalno omrežje, in sicer se lahko podatke v strežniku dostopa samo z domačega omrežja strežnika, med tem, ko za pošiljanje v strežnik to ni pomembno.

3.5 Ohišje in uporabljeni senzorji

Za konkreten primer učilnice je ohišje iz plastike, s čimer posnema obliko komunikacijskih naprav, kot so usmerjevalniki in modemi. Na take naprave smo se ljudje že privadili, da so prisotne v naših prostorih. S tem smo želeli zmanjšati poseg v prostor. Vse naprave razen zunanje so enake oblike, razlikujejo pa se po vsebovanih senzorjih

Senzorji so pritrjeni na zunanji del ohišja, in imajo vsak svojo tiskanino, ločeno od krmilniškega vezja. Nanj so povezani z žično povezavo. S tem je zmanjšan vpliv lokalnega gretja vezja na elementih, na katerih se troši večja moč (DC / DC pretvorniki, močnostni tranzistorji ter mikrokrmilnik). Seznam uporabljenih senzorjev in njihovo prisotnost v napravi prikazuje tabela 1.

4 Ovrednotenje

4.1 Prednosti in slabosti

Senzorski sistem razvit za namene okoljskega monitoringa in raziskovanje vplivnih parametrov v okolju omogoča uporabo široke palete digitalnih ter v manjšem obsegu analognih senzorjev. Sistem ne predstavlja vira za meritve velikih točnosti in natančnosti, nam pa podaja dobro sliko izbranih parametrov v okolju, če so izbrani ustrezni senzorji, in je sistem v opazovano okolje ustrezno umeščen.

Sistem z večjim številom naprav omogoča boljše pokritost opazovanega okolja in informacijo o mikrolokacijah okolja. Omogoča tudi različno opremljenost naprav glede na potrebe in lastnosti mikrolokacij. Podatki, pridobljeni s sistemom, so dobro izhodišče za razvijanje okolijskih modelov, iskanja korelacij in drugih operacij na velikem številu podatkov, kar omogoča pridobivanje znanj, ki morda niso vidna na prvi pogled.

Iz tehničnega vidika so pomanjkljivosti relativno majhna kapaciteta baterij glede na porabo naprav, kar za merjenje v naravnem okolju pomeni omejen čas merjenja. Kompaktno ohišje naprav povečuje neželeno segrevanje naprave ter posledično senzorjev, kar vnaša sistematično napako (slika 3). Ohišje ni univerzalno, kar pomeni, da vsaka aplikacija zahteva svojo obliko ohišja, glede na okolje, ki mu bo namenjena.

Ena od pomanjkljivosti sistema je tudi zahteven uporabniški vmesnik. Slednji sicer omogoča prosto manipuliranje s sistemom glede na potrebe raziskovalcev, a zahteva zmerno znanje programiranja in razumevanja kode. Glede na to, da se sistem do neke mere še izgrajuje in izboljšuje, je tu priložnost za vzpostavitev uporabniškega vmesnika za enostavnejše

prilagajanje sistema na poljubne senzorje, vnašanje kalibracijskih vrednosti in osnovno analizo in vizualizacijo izmerjenih vrednosti.

4.2 Umerjanje in točnost sistema

Sistem smo pred uporabo v realnih pogojih metrološko ovrednotili v klimatski komori. Izvedli smo več testov, najbolj podrobno s področja temperature, saj senzorji za relativno vlago in hlapljive organske delce VOC uporabljajo podatek o temperaturi kot vhodni podatek za preračun merjenih vrednosti. Izkazalo se je, da temperaturo lahko zanesljivo merimo na 0,5 °C točno. Pri merjenju vlage v klimatski komori, za kar so pričakovane točnosti nižje, je realna točnost 5 % RH. Posebej smo testirali sistem tudi s področja CO₂, pri čemer smo senzorje primerjali z optičnim spektralnim analizatorjem plinov in referenčnim plinom. Realna točnost sistema za CO₂ je 15 % meritve sistema. Slednji rezultati so pokazali ustreznost meritev v okolju, pričakujemo negotovosti okolja v primerljivih izmerah.

4.3 Uporaba v drugih okoljih

Sistem je zasnovan z namenom raziskovanja vplivnih parametrov v okolju in je kot tak z manjšimi prilagoditvami aplikativen v široki paleti prostorov. Tako v urbanih okoljih, kjer bi lahko spremljali okolijske parametre, kakovost zraka, svetlobno in hrupno onesnažene v realnem času, kot tudi v naravnih okoljih, kot je obala, kjer bi lahko spremljali soodvisnost meteoroloških parametrov ter vetra, kakovosti vode ter ciljnih naravnih VOC, ki so posledica naravnih procesov [8, 9]. Ravno tako je uporaben za analizo okolja v delavnih in zaprtih prostorih, kjer se lahko uporabi za spremljanje parametrov, ki vplivajo na dobro počutje in dolgotrajno zdravje.

5 Zaključek

Razvoj univerzalnega merilnega sistema, opisanega v tem članku, predstavlja pomemben korak pri spremljanju parametrov notranjega okolja, zlasti v učilnicah. Sistem združuje natančne meritve, vsestranskost in prednost cenovno ugodnih digitalnih senzorjev. Tako zagotavlja zanesljivo orodje za zajem širokega spektra okolijskih podatkov z minimalnim posegom v prostor.

Kljub omejitvam, kot sta razmeroma kratka življenjska doba baterije in potreba po posebni zasnovi ohišja za različne aplikacije, ima sistem velik potencial. Učinkovito zajema podatke o temperaturi, vlažnosti, ravni CO₂, hrupu, svetlobi, prašnih delcih in drugih okolijskih parametrih, ki so ključni za razumevanje njihovega vpliva na človekovo počutje in druga področja okolijskih raziskav.

Poleg tega zasnova sistema omogoča enostavno razširljivost in prilagajanje različnim okolijskim razmeram, tako mestnim kot naravnim, zaradi česar je vsestranska rešitev za celovito spremljanje okolja. Znanje, pridobljeno s tem sistemom, je mogoče uporabiti za boljše upravljanje okolja in izboljšanje razumevanja

zapletenih povezav med različnimi okolijskimi parametri ter življenjem ljudi in živali.

Na splošno je oblikovan merilni sistem, kljub temu da obstajajo področja za izboljšave, pomembna inovacija za spremljanje okolja in raziskave, ki obeta pomemben prispevek na tem področju.

Literatura

- [1] A. Novak, Okoljski monitoring in merilna oprema, Diplomsko naloga, Univ. Ljubljana, Fak. Elektrotehn., 2023.
- [2] X. Zhang, C. Zhao, T. Zhang, J. Xie, J. Liu in N. Zhang, "Association of indoor temperature and air quality in classrooms based on field and intervention measurements," *Build. Environ.*, vol. 229, str. 109925, 2023.
- [3] G. de Gennaro, P. R. Dambruoso, A. D. Loiotile, A. Di Gilio, P. Giungato, M. Tutino in F.



Slika 4. Slika sistema med testnim delovanjem s termovizijsko kamero

- Porcelli, "Indoor air quality in schools," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 12, str. 467–482, 2014.
- [4] D. Filingeri, D. Fournet, S. Hodder in G. Havenith, "Why wet feels wet? A neurophysiological model of human cutaneous wetness sensitivity," *J. Neurophysiol.*, vol. 112, št. 6, str. 1457–1469, 2014.
- [5] N. Ma, D. Aviv, H. Guo in W. W. Braham, "Measuring the right factors: A review of variables and models for thermal comfort and indoor air quality," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, str. 110436, 2021.
- [6] "Access IOOS data," U.S. Integrated Ocean Observing System, National Oceanic and Atmospheric Administration. [Online]. Dostopno: <https://ioos.noaa.gov/data/access-ioos-data/>. [Dostopano: 14-Jun-2024].
- [7] N. A. P. Rostam, N. H. A. Hassain Malim in R. Abdullah, "Development of a low-cost solar powered & real-time water quality monitoring system for Malaysia seawater aquaculture:

Application & challenges,” v Proc. 2020 4th Int. Conf. Cloud Big Data Comput., Aug. 2020, str. 86–91.

- [8] K. Cowtan, R. Rohde in Z. Hausfather, “Evaluating biases in sea surface temperature records using coastal weather stations,” *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, vol. 144, no. 712, pp. 670–681, 2018.
- [9] P. N. Banegas-Dubón, M. Cardona in M. E. Perdomo-Perdomo, “State of art: Climate and wave monitoring tools,” v 2023 IEEE International Conference on Machine Learning and Applied Network Technologies (ICMLANT), Dec. 2023, str. 1–6.