

Sistem za nadzor kvaliteta vazduha

Božidar Popović, Zorana Mandić, Nikola Kukrić
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina

bozidar.popovic@etf.ues.rs.ba, zorana.mandic@etf.ues.rs.ba, nikola.kukric@etf.ues.rs.ba

Sažetak— Kvalitet vazduha koji se opisuje pomoću indeksa kvaliteta vazduha AQI (*Air Quality Index*) jedna je od bitnih ocjena kvaliteta života u urbanim sredinama. Pomoću AQI, kvalitet vazduha se kategoriše u jednu od šest grupa, a vrijednost indeksa zavisi od prisustva zagađivača i njihove koncentracije u vazduhu. U radu je predstavljena praktična realizacija jednog sistema za nadzor kvaliteta vazduha sa centralizovanim arhitekturom. Sistem se zasniva na senzorskoj mreži i mikrokontroleru ESP32. Mjeri se koncentracija PM2.5 i PM10 čestica. Podaci se, preko Wi-Fi komunikacije, smještaju u server, gdje se vrše obrada i računanje AQI vazduha. Informacije su korisnicima dostupne na veb stranici.

Ključne riječi- AQI; senzorski čvor; ESP32; kvalitet zraka

I. UVOD

Jedan od glavnih izazova sa kojima se susreće moderno društvo tokom naglog razvoja koji je uslijedio kao posljedica industrijske revolucije jesu klimatske promjene. Organizacija OECD (eng. *Organisation for Economic Co-operation and Development*) je označila problem kvaliteta vazduha u urbanim sredinama, ali i domaćinstvima kao problem visokog prioriteta [1]. Svjetska zdravstvena organizacija (eng. *World Health Organization* - WHO) je navela da loš kvalitet vazduha može dovesti do velikog broja akutnih i hroničnih bolesti čovjeka. Podaci iz 2016. godine pokazuju da čak 91% stanovništva živi u sredinama gdje je kvalitet vazduha ispod standarda koje propisuje WHO, te da su bolesti uzrokovane lošim kvalitetom vazduha dovele do 4,2 miliona smrtnih ishoda [2]. Svake godine, sa dolaskom hladnijeg perioda i početkom sezone grijanja u većem dijelu Bosne i Hercegovine dolazi do pojave smoga, koji nastaje kombinovanjem magle sa štetnim česticama. Pojava smoga naročito je karakteristična za područje Istočnog Sarajeva i Sarajeva. U nedostatku jakih vjetrova, smog se dugo zadržava na prostoru sarajevske kotline.

U najnovijem izvještaju Evropske agencije za životnu sredinu (eng. *European Environment Agency* - EEA), gdje su predstavljeni podaci za 39 zemalja, Bosna i Hercegovina je na prvom mjestu po srednjoj vrijednosti količine PM čestica, jednog od pet glavnih zagađivača vazduha, za 2018. godinu na dnevnom i godišnjem nivou [3]. Na prostoru Bosne i Hercegovine nalazi se ukupno deset meteoroloških stanica koje mjere kvalitet vazduha, od kojih je devet na prostoru Federacije Bosne i Hercegovine. Na području Kantona

Sarajevo se nalazi ukupno šest stanica, a građanima je dostupna informacija o kvalitetu vazduha na veb stranici Federalnog hidrometeorološkog zavoda [4]. Na prostoru Republike Srpske nalazi se samo jedana stanica koja mjeri kvalitet vazduha i lokalizovana je u Prijedoru [5].

Analiza problema zagađenosti vazduha je složen proces koji zahtijeva interdisciplinarni pristup. Za razvoj sistema za nadzor kvaliteta vazduha, potrebno je poznavati rad senzorskih mreža, računarskih mreža, te najnovije tehnologije Interneta stvari.

Različiti komunikacioni protokoli, kao što su Wi-Fi, LoRa mreže, ZigBee, GPRS/GPS i radiofrekvencija, koriste se za razmjenu podataka između senzorskog čvora i centralne jedinice, servera ili oblaka. Sistem za određivanje AQI realizovan GPRS senzovima, koji se sastoji od *Mobile Data-Acquisition Unit (Mobile-DAQ)* i servera za praćenje zagađenja (*Pollution-Server*), predstavljen je još 2010. godine i jedan je od prvih projekata koji su zasnovani na ovim tehnologijama [6]. Podaci u okvirima se šalju preko GPRS modema, a osim podataka o zagađenosti vazduha, preko GPS poznata je i lokacija čvorova. Tako je, za potrebe nadzora kvaliteta vazduha u okolini Londona, realizovan sistem koji se sastoji od senzorskih čvorova niske potrošnje i niske cijene, koji su obogaćeni GPRS/GPS modulima preko kojih se podaci šalju zajedno sa informacijom o kojoj lokaciji je riječ [7].

Sve veću primjenu u realizaciji projekata o nadzoru kvaliteta vazduha imaju LPWAN mreže (eng. *Low-Power Wide Area Networks*) u okviru kojih se, od komunikacionih protokola, izdvaja LoRa protokol. Podaci o prisustvu zagađivača i njihovoj količini prikupljaju se preko bežičnih senzorskih čvorova, koji komuniciraju sa LoRa *Gateway*-om. U jednoj od realizacija predstavljenih u [8] *The Things Indoor Gateway* komunicira sa *TTL Cloud* serverom, koji informacije dalje prosljeđuje korisnicima.

Tekst rada koji slijedi, nakon uvoda, organizovan je u četiri poglavlja. Tipovi zagađivača, njihovo porijeklo i način računanja AQI opisani su u poglavlju II. Poglavlje III daje detaljan uvid u dizajn predloženog rješenja, pojedinačno analizirajući hardverske i softverske dijelove sistema. Realizacija sistema je opisana u poglavlju IV, a dalji pravci razvoja su navedeni u poglavlju V.

II. ZAGAĐIVAČI I RAČUNANJE AQI

Sagorijevanje fosilnih goriva u automobilima, industrijskim pogonima, te individualnim ložištima kao i deponije otpada su

jedni od najvećih izvora zagađenja vanjskog vazduha, po podacima WHO [9]. Zagađivači vazduha se dijele na primarne, koji direktno iz izvora dospijevaju u atmosferu, i sekundarne, koji nastaju hemijskom reakcijom primarnih zagađivača [10]. Primarni zagađivači su čađ, ugljen-monoksid, azot-dioksid, amonijak, isparljiva organska jedinjenja bez metana (*Non-Methane Volcanic Organic Compound* – NMVOC), metan, sumpor-dioksid i azot-monoksid. U sekundarne zagađivače spadaju ozon, oksidovana isparljiva organska jedinjenja, te čestice PM2.5 i PM10, čiji su prekursori sumpor-dioksid, oksidi azota i amonijak [11]. Od svih navedenih zagađivača, prisustvo njih pet se koristi za ocjenu kvaliteta vazduha: čestice PM2.5 i PM10, sumpor-dioksid, azot-dioksid, ozon i ugljen-monoksid [12].

Indeks kvaliteta vazduha (*Air Quality Index* - AQI) predstavlja skalu za ocjenu kvaliteta vazduha. EEA je, zajedno sa Upravom za ekologiju Evropske komisije (*European Commission's Directorate General for Environment*) 2017. godine, usvojila *European Air Quality Index* - EAQI. Tokom realizacije ovog projekta korišćena je AQI skala koja je formirana od strane Agencije za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (*United States Environmental Protection Agency* - EPA). U tehničkoj dokumentaciji koju je objavila EPA data je skala od šest kategorija za ocjenu kvaliteta vazduha. Kategorije su prikazane u tabeli I [13].

TABELA I. AQI SKALA ZA OCJENU KVALITETA VAZDUHA

Zagađivači	Skala (koncentracija zagađivača u $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ^a					
	O	D	U	L	VL	EL
PM2.5	0-10	10-20	20-25	25-50	50-75	75-800
PM10	0-20	20-40	40-50	50-100	100-150	150-1200
Sumpor-dioksid	0-40	40-90	90-120	120-230	230-340	340-1000
Azot-dioksid	0-50	50-100	100-130	130-240	240-380	380-800
Ozon	0-100	100-200	200-350	350-500	500-750	750-1250
AQI	0-50	51-100	101-150	151-200	201-300	301-400

a. O – Odličan, D – Dobar, U – Umjeren, L – Loš, VL – Veoma loš, EL – Ekstremno loš

Za određivanje AQI potrebni su podaci o koncentraciji barem jednog zagađivača od ukupno pet koliko se posmatra. Ukoliko su dostupni podaci više zagađivača, onda se uzima indeks onog zagađivača koji ima najnižu vrijednost [14]. Jednačina za računanje indeksa kvaliteta vazduha je

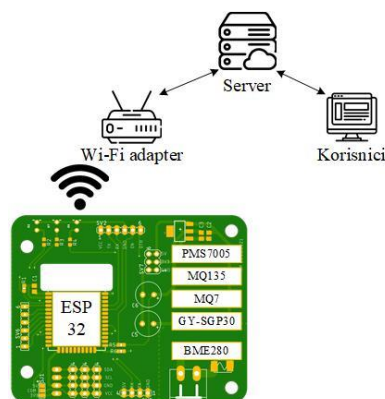
$$I_z = \frac{I_{VN} - I_{NN}}{GZ_{VN} - GZ_{NN}} (C_z - GZ_{NN}) + I_{NN} \quad (1)$$

gdje je I_z indeks zagađivača, I_{VN} i I_{NN} su vrijednosti većeg/manjeg praga indeksa, GZ_{VN} i GZ_{NN} su granične vrijednosti zagađivača za taj indeks (veća i manja vrijednost) i C_z je koncentracija zagađivača [13].

III. PROJEKTOVANJE SISTEMA

Na sl 1. prikazana je blok šema razvijenog sistema za ocjenu kvaliteta vazduha. Krajnji čvor obuhvata senzorsku mrežu i mikrokontroler ESP32. Mikrokontroler ESP32 prikuplja izmjerene podatke sa senzora, vrši obradu tih podataka, te obrađene podatke smješta na server posredstvom interneta, preko već ugrađenog Wi-Fi modula. Informacije o kvalitetu vazduha su predstavljene preko vidžeta koji je ugrađen u web aplikacije.

U senzorski čvor integrisano je pet senzora: PMS7003, MQ135, GY-SGP30, MQ7 i BME280 koji preko I2C protokola komuniciraju sa mikrokontrolerom. Korišćeni mikrokontroler ESP32 ima ugrađen Wi-Fi modul koji se koristi za slanje podataka o zagađenosti vazduha na server.



Slika 1. Blok šema sistema

Senzor PMS7003 mjeri koncentraciju PM2.5 i PM10 čestica te, zajedno sa senzorom MG135, koji mjeri koncentraciju oksida azota (uključujući azot-dioksid), služi za određivanje AQI kvaliteta vazduha. Za mjerenje koncentracije ostalih zagađivača, koji se ne uzimaju u obzir prilikom određivanja indeksa kvaliteta vazduha korišćeni su senzor Gy-SGP30, koji mjeri ukupnu koncentraciju isparljivih organskih jedinjenja, i senzor MQ7, koji mjeri koncentraciju ugljen-monoksida. Senzor BME280 mjeri temperaturu vazduha, vlažnost i atmosferski pritisak i sastavni je dio većine meteoroloških stanica, iako ne služi za određivanje koncentracije zagađivača.

A. Hardverski dio sistema

1) Mikrokontroler ESP32

Hardverski dio sistema ostvaren sa mikrokontrolerom ESP32 posjeduje Xtensa 32-bit LX6 mikroprocesor, 448 KB ROM i 520 KB SRAM. Od perifernih uređaja na raspolaganju su 32 programabilna GPIO pina, dva 8-bitna digitalno-analogni konvertora i 12-bitni SAR (eng. *Successive-Approximations Register*) analogno-digitalni konvertor. Za UART komunikaciju koriste se tri periferna uređaja, a dva za I2C komunikaciju. ESP32 posjeduje Wi-Fi modul standarda 802.11 b/g/n gdje brzine u slučaju stanarda 802.11n dostižu 150 Mbps. Prikladan je za realizaciju ovakvih sistema zbog pristupačnost, niske cijene, podrške i ugrađenog Wi-Fi modula

koji mu daje prednost za široku primjenu u projektima iz oblasti Interneta stvari, oblasti koja predvodi četvrtu industrijsku revoluciju. Da bi se omogućila sigurna komunikacija između uređaja, vrši se enkripcija informacija i upotreba certifikata TLS (eng. *Transport Layer Security*) i SSL (eng. *Secure Sockets Layer*) [15].

2) Senzorski čvor

Integrirani senzor BME280 karakterišu male dimenzija i niska potrošnja, koristi se za mjerenje temperature, relativne vlažnosti i atmosferskog pritiska. Senzor je integrisan u kućište dimenzija 2,5 mm x 2,5 mm x 0,93 mm. Senzor pritiska je barometarski, visoke tačnosti i velike rezolucije. Vrijeme odziva senzora vlažnosti je nisko i vrši mjerenje u širokom opsegu [16].

Senzor PMS7003 detektuje i mjeri koncentraciju čestica prečnika od 0,3 μm u realnom vremenu. Maksimalna koncentracija koju senzor mjeri premašuje 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sa ukupnim vremenom odziva manjim od 10 s. Radna temperatura senzora je od -10 °C do 60 °C, a napon napajanja iznosi 5 V. Mikrokontroler i senzor PMS7003 komuniciraju posredstvom UART-a. Senzor MQ135 je digitalni senzor koji detektuje prisustvo amonijaka u vazduhu i njegov opseg detekcije iznosi od 100 do 300 ppm. Napon napajanja je 5 V. Senzor za detekciju ugljen-monoksida MQ7 takođe ima napon napajanja od 5 V, a opseg detekcije ugljen-monoksida ide od 20 ppm do 2000 ppm.

B. Softverski dio

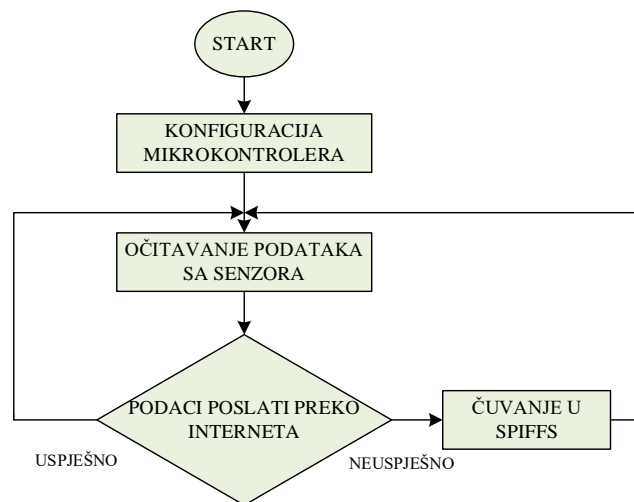
Algoritam koji se izvršava u mikrokontroleru prikazan je na Sl. 2.

1) Inicijalno puštanje senzora u rad

Prilikom inicijalnog puštanja senzorskog čvora u rad, potrebno je konfigurirati parametre za uspostavljanje Wi-Fi konekcije, koji podrazumijevaju naziv pristupne tačke na koju se uređaj povezuje i lozinku pomoću koje se ostvaruje povezivanje. Mikrokontroleru se dodjeljuje *Token* koji se koristi za validaciju uređaja prilikom slanja podataka na server. Samo oni uređaji koji šalju podatke na server, a čiji se *Token* nalazi u bazi podataka, mogu uspostaviti konekciju sa serverom.

2) Pokretanje uređaja

Prilikom uspostavljanja Internet konekcije uređaj šalje serveru informaciju o svojoj MAC adresi. Ako na serveru, unutar baze podataka, ne postoji uređaj sa poslatom MAC adresom, na serveru se automatski kreira novi senzor sa jedinstvenom adresom i očitavanjima. Takođe, mikrokontroler uspostavlja konekciju sa NTP (eng. *Network Time Protocol*) serverom, te se na taj način omogućava sinhronizacija vremena na mikrokontroleru. Za prijem podataka sa servera koristi se MQTT (eng. *Message Queuing Telemetry Transport*) protokol. Mikrokontroler se „pretplati“ na „temu“ koja predstavlja MAC adresu samog mikrokontrolera. Na taj način se ostvaruje konekcija servera ka mikrokontroleru i mogućnost konfigurisanje pojedinih parametara. Navedeno služi da se sa veb stranice mogu podesiti vremenski interval slanja podataka



Slika 2. Algoritam mikrokontrolera

i poslati komande za trenutno očitavanje podataka, te za slanje *firmware* fajla za ažuriranje softvera samog mikrokontrolera. U odnosu na druge protokole, MQTT protokol karakteriše manje korišćenje saobraćaja prilikom razmjena poruka. Iz tog razloga, koristi se za povezivanje sa uređajima gdje je cijena mrežnog saobraćaja velika, čime se smanjuju troškovi sistema. Ako je konekcija ostvarena, mikrokontroler provjerava unutar SPIFFS memorije da li ima podataka koji nisu poslani na server, ako isti postoje, šalje ih na server.

3) Očitavanje mjernih podataka

Mikrokontroler periodično vrši očitavanje podataka sa senzora, te očitane podatke pokušava poslati na server. U slučaju da se podaci nisu uspješno poslali, oni se zajedno sa vremenom očitavanja čuvaju u SPIFFS memoriji te se, prilikom uspostavljanja Wi-Fi konekcije, šalju na Internet. Za slanje podataka na server koristi se HTTPS protokol zaštićen sa sigurnosnim slojem SSL. Autentifikacija je kreirana pomoću *OAuth 2.0 Direct Authentication* [17]. Pomoću *Tokena* mikrokontroler može pristupiti resursima servera na koje ima prava pristupa, odnosno mikrokontroler može da očitane podatke šalje na server i da se isti čuvaju u bazi podataka. Zahvaljujući Yii2 radnom okruženju omogućeno je čuvanje i prikaz podataka koje senzor šalje. Podaci se sa senzora primaju preko POST metode HTTPS protokola, koristeći *RESTful Web Service APIs*. Primljeni podaci se, zatim, čuvaju unutar *MariaDB* baze podataka. Sačuvani podaci se tabelarno i grafički prikazuju na veb stranici. Omogućeno je filtriranje i sortiranje podataka.

Takođe, realizovan je zasebni API (eng. *Application Programming Interface*) koji omogućava da se podaci koji su očitani posljednji prikazuju unutar vidžeta koji se može ugraditi na druge veb stranice. Navedeni API je kreiran tako da, prilikom ugradnje na veb stranici, korisnik može prosljediti parametre kojima se određuju senzori čija će se očitavanja prikazivati.

Takođe, na serveru se nalazi *Eclipse Mosquitto MQTT Broker* preko kojeg se ostvaruje MQTT komunikacija između servera i krajnjeg čvora. Unutar Yii2 veb aplikacije je podešen *MQTT*

klijent, tako da se može poslati željena komanda ka krajnjem čvoru.

IV. PRAKTIČNA REALIZACIJA

Sistem opisan u poglavlju III implementiran je u septembru 2020. godine. Trenutno se podaci prikupljaju sa dvije lokacije. Jedna je u urbanom području grada Istočno Sarajevo, dok je druga u ruralnom. Prva lokacija je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu, a druga, je na izletištu Trebević. Izgled Integrisanog senzorskog čvora prikazan na Sl. 3.



Slika 3. Integrisan senzorski čvor

Vidjeti koji prikazuju AQI vazduha, temperaturu i vlažnost vazduha su ugrađeni na veb stranicama Grada Istočno Sarajevo i Elektrotehničkog fakulteta.

V. ZAKLJUČAK I DALJI RAZVOJ SISTEMA

U radu je predstavljen efikasan sistem za nadzor kvaliteta vazduha, gdje su korišćene najnovije tehnologije sa optimizovanim brojem uređaja. Dalji razvoj sistema za nadzor kvaliteta vazduha podrazumijeva proširivanje senzorske mreže. Cilj je da senzorski čvor vrši mjerenje koncentracije svih pet zagađivača koji se uzimaju u obzir prilikom određivanja AQI vazduha. Pored lokacija koje su navedene, sistem će se implementirati na još tri lokacije u sklopu grada Istočno Sarajevo.

ZAHVALNICA

Zahvaljujemo se gradu Istočno Sarajevo, koji je obezbijedio novčana sredstva za realizaciju projekta.

LITERATURA

- [1] OECD, The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution, 2016, dostupno na: <https://www.oecd.org/env/the-economic-consequences-of-outdoor-air-pollution-9789264257474-en.htm>
- [2] WHO, dostupno na <https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/topic-details/GHO/ambient-air-pollution>
- [3] EEA, Air quality in Europe – 2020 report, novembar 2020. godine, pp. 30, dostupno na: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>

- [4] Republički hidrometrološki zavod <https://rhmzrs.com/zivotna-sredina/kvalitet-vazduha>
- [5] Federalni hidrometrološki zavod <https://www.fhmzbih.gov.ba/latinica/index.php>
- [6] WHO, dostupno na: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/ambient-air-pollution/pollutants>
- [7] A. R. Al-Ali, Imran Zuakernan, Fadi Aloul, „A Mobile GPRS-Sensors Array for Air Pollution Monitoring“, IEEE, oktobar 2010.
- [8] Olalekan A.M., Popoola David, Carruthers Chetan, Lad Vivien, B. Bright, Mohammed I. Mead, Marc E.J. Stettler, John R. Saffell, Roderic L. Jones, „Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality inurban settings“, Atmospheric Environment, broj 194, decembar 2018
- [9] Ernesto González, Juan Casanova-Chafer, Alfonso Romero, Xavier Vilanova, Jan Mitrovics, Eduard Llobet, „LoRa Sensor Network Development for Air QualityMonitoring or Detecting Gas Leakage Events“, oktobar 2020.
- [10] C. D. Koolen, G. Rothenberg, Air Quality in Europe, ChemSusChem 2019, vol. 12, pp. 164-172, dostupno na: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6391984/>
- [11] EEA, Air quality in Europe – 2020 report, novembar 2020. godine, pp. 38-41 dostupno na: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>
- [12] WHO, dosutpno na: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/ambient-air-pollution/pollutants/types-of-pollutants>
- [13] EPA, Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality, 2018, dostupno na: <https://www.airnow.gov/publications/air-quality-index/technical-assistance-document-for-reporting-the-daily-aqi/>
- [14] European Air Quality Index, dostupan na: <https://airindex.eea.europa.eu/Map/AQI/Viewer/#>
- [15] Neven Nikolov, Ognyan Nakov, Research of Secure Communication of Esp32 IoT Embedded System to .NET Core Cloud Structure using MQTTS SSL/TLS, International Scientific Conference Electronics - ET2019, septembar 2019, dostupno na: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8878636>
- [16] Bosh, BME280 Combined humidity and pressure sensor, 2016, dostupno na <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/>
- [17] <https://www.yiiframework.com/extension/yiiisoft/yii2-authclient/doc/guide/2.2/en/oauth-direct-authentication>

ABSTRACT

The air quality measured by Air Quality Index – AQI is one of the essential assessments of life quality in urban areas. Value of AQI is being set by the presence of pollutants and their concentration. The paper presents the practical implementation of an air quality monitoring system with a centralized architecture based on a sensor network and an ESP32 microcontroller. The concentration of PM2.5 and PM10 particles is measured. The data, via Wi-Fi communication, is stored in a server, where the processing and calculation of AQI air is performed. The information is available on the website to users.

SYSTEM FOR MONITORING AIR QUALITY
Božidar Popović, Zorana Mandić, Nikola Kukrić