

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Marko Kozlik, Viktor Horvat

**FERbarium - energetski neovisan
bežični senzorski čvor upravljan
mobilnom aplikacijom**

Zagreb, 2023.

Ovaj rad izrađen je u Laboratoriju za robotiku i inteligentne sisteme upravljanja, na Zavodu za automatiku i računalno inženjerstvo pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Matka Orsaga i prof. dr. sc. Stjepana Bogdana i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2022./2023.

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Cilj i motivacija	3
3. Uredaji	5
3.1. STM32WB55	5
3.2. IKS01A3	6
3.2.1. STM32 Nucleo	6
3.3. Neovisni DC izvor	7
3.4. Senzori	9
3.4.1. MQ9	9
3.4.2. MQ131	9
3.4.3. MQ135	10
3.4.4. LTR-507ALS	10
3.4.5. GP2Y1010AU0F	11
3.5. iPhone 11	12
4. Tehnologije	14
4.1. Mikrokontroler	14
4.1.1. RTOS	14
4.1.2. CubeIDE, CubeMX i CubeProgrammer	14
4.1.3. Mbed OS	15
4.2. Bluetooth	15
4.2.1. Razlike BLE i BR/EDR protokola	16
4.2.2. Uloge uređaja u BLE protokolu	16
4.2.3. Atributni prijenos podataka	18
4.3. iOS	19
4.3.1. Razvoj aplikacija za iOS	19
4.3.2. CoreBluetooth API	20
4.3.3. UserNotificationCenter API	21
4.3.4. Grafički prikaz podataka - <i>Charts</i>	21

4.3.5. Pozadinski rad aplikacije	22
4.3.6. Integracija s Microsoft Azure servisom	22
5. Razvijeno rješenje	24
5.1. Aplikacija mikrokontrolera	24
5.1.1. Prikupljanje senzorskih podataka	24
5.1.2. Slanje trenutnih podataka senzora	25
5.1.3. Pohranjivanje senzorskih podataka u memoriju	25
5.1.4. Slanje pohranjenih podataka senzora	25
5.2. iOS aplikacija	26
5.2.1. Početni zaslon	27
5.2.2. Izbornik mjerjenja i prikaz podataka	28
5.2.3. Informacijski zaslon	28
5.2.4. Sustav obavijesti	29
5.3. Čuvanje podataka u oblaku	32
5.4. Ostvarenje senzorske mreže	32
5.5. Kućište za vanjsku uporabu	33
6. Zaključak	34
Zahvala	35
Literatura	36
Sažetak	39
Summary	40

1. Uvod

Ljudi i okoliš povezani su na mnoge načine, no jedan od najvažnijih je zasigurno njihovo zdravlje. Ovisnost ljudskog zdravlja i okoliša proučava se dugi niz godina, a rezultati mnogih istraživanja pokazali su da trenutno stanje okoliša ugrožava živote ljudi te dovodi do skraćivanja njegovog očekivanog trajanja, a u ekstremnim situacijama čak i smrti. Estimira se da je broj preranih smrти godišnje u svijetu uslijed zagađenja zraka oko 4.2 milijuna [1]. Prvi korak ispravljanja takve situacije mjerjenje je i kvantificiranje stanja parametara atmosfere, no oprema za provođenje takvih mjerjenja često je skupa i nepristupačna, ali čak i štetna [2], pogotovo zemljama u razvoju gdje rješavanje ovog problema nije prioritet. Srećom, razvoj i popularizacija znanosti i tehnološki razvoj područja elektronike, automatike i komunikacijskih tehnologija danas omogućuju jednostavnija, jeftinija i pristupačnija rješenja koja mogu nadomjestiti ulogu skupih i komplikiranih mjernih postaja. Jedan od takvih pristupa napravljen je i u Njemačkoj korištenjem jeftinih uređaja kako bi se odredila kvaliteta zraka u blizini frekventnog prometa [3]. Usporedba veličine i kompleksnosti senzorskih čvorova i konvencionalnih mjernih stanica dana je na slici 1.1.

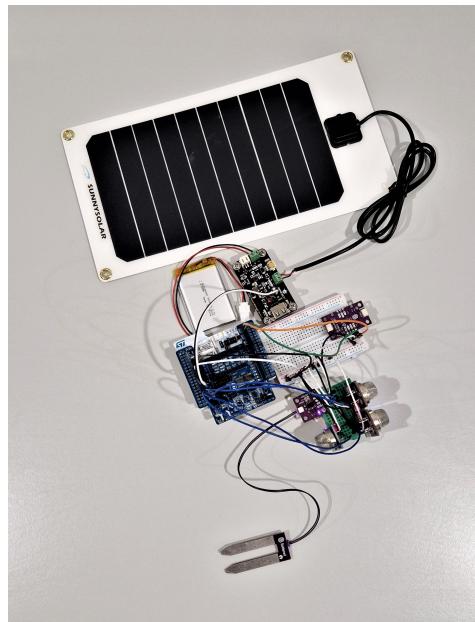
Razvitkom bežične tehnologije u svijetu sve se više počinje primjenjivati pojам senzorskih čvorova. Senzorski čvorovi su uređaji koji služe za mjerjenje određenih podataka u okolišu. Najčešće se koriste u tehnologiji Interneta stvari (*engl. Internet of Things, IoT*). Internet stvari naziv je za širok spektar uređaja koji međusobno komuniciraju bez ljudskog posredovanja. Jedna od bitnih komponenata Interneta stvari su i senzorske mreže čiji su sastavni dijelovi upravo senzorski čvorovi. U današnje vrijeme senzorski čvorovi imaju široki spektar svojih namjena od agrikulture [4] pa sve do sudjelovanja u spašavanju ljudskih života u nezgodama [5].

Senzorski čvorovi često se koriste u uvjetima gdje ne postoji pristup električnoj energiji. U takvim slučajevima treba smisliti alternativne načine napajanja te učiniti senzorski čvor energetski neovisnim. Energetska nezavisnost podrazumijeva da uređaj ne mora imati pristup vanjskom izvoru napajanja, već je napajan iz svog izvora. Neki od mogućih vlastitih izvora napajanja mogu biti baterije, solarni paneli ili generatori temeljeni na piroelektričkom efektu. Još jedan mogući način napajanja je korištenje fotosintetskih mikroorganizama na aluminijskoj anodi kao što je opisano u članku [6].

Kako bi senzorski čvorovi komunicirali međusobno, ali i s vanjskim svijetom, razvijene su i koriste se mnoge tehnologije njihovog bežičnog umrežavanja. Jedna od najistaknutijih je



(a) Mjerna postaja kvalitete zraka



(b) Prototip FERbarium senzorskog čvora

Slika 1.1: Usporedba veličine dvaju pristupa za mjerjenje parametara okoliša

najnovija niskoenergetska implementacija Bluetooth protokola koja je njegov dio od verzije 4.0 predstavljene 2009. godine. Sveprisutnost Bluetooth Low Energy (BLE) protokola u prijenosnim uređajima poput pametnih mobitela, prijenosnim računalima, slušalica i satova omogućila je njegovu veliku raširenost, dostupnost i standardizaciju, kao i razvoj programske podrške za gotovo svaki tip prijenosnog uređaja. Također, BLE se već neko vrijeme koristi za prikupljanje senzorskih podataka iz okoline. U projektu u kojem se BLE senzorski čvor koristio za akustično praćenje malih ptica ostvareno je kontinuirano slanje podataka do 24 sata na jednom punjenju baterije s frekvencijom uzorkovanja od 8 kHz [7].

Ovaj rad opisuje izradu senzorskog čvora i razvoj pripadne korisničke aplikacije za interakciju sa senzorskim čvorom temeljenom na STM32WB mikrokontroleru i skupini pripadnih senzora napajanih pomoću obnovljivog izvora električne energije. Neovisnost senzorskog čvora o dostupnoj internetskoj infrastrukturi ostvarena je koristeći Bluetooth Low Energy komunikacijsku tehnologiju.

2. Cilj i motivacija

Izrada energetski neovisnog bežičnog čvora inspirirana je dvama projektima koji se izvode u Laboratoriju za robotiku i inteligentne sustave upravljanja na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Watchplant [8] je projekt u sklopu programa Europske Unije Obzor 2020. (Horizon 2020, H2020) u području Budućih tehnologija i tehnologija u nastajanju (Future and Emerging Technologies, FET). Cilj projekta WatchPlant je razviti nove bio-hibridne sustave za praćenje stanja okoline u urbanim sredinama kroz razvoj senzora za biljke. Spojem tehnologije i prirode, stabla u našim gradovima i selima bit će obogaćena snagom umjetne inteligencije kako bi nas na jeftin i ekološki prihvatljiv način upozoravala o kvaliteti zraka, tla i vode u okolini, a potencijalno i o pojavi novih bolesti opasnih za naše ili njihovo zdravlje. Drugi projekt koji definira preduvjete za izradu senzorskog čvora nazvan je Specularia [9]. Specularia se bavi razvojem heterogenih sustava različitih robota iz područja poljoprivrede i agrikulture koje nastoji spojiti da zajedno izvršavaju isti zadatak. Uvođenje sustava robota na velike farme nije novi koncept, već brzorastuća industrija, a heterogeni višerobotski sustav nadmašuje postojeće poljoprivredne robote u svojoj skalabilnosti i svestranosti, što ih čini idealnim za male obiteljske organske farme. Biti integralni dio ovakvih projekata postavlja jasne ciljeve, ali i visoka očekivanja i zahtjeve koje razvijeno rješenje mora zadovoljiti.

Kao osnova razvijenog senzorskog čvora odabran je mikrokontroler STM32WB55 koji implementira najnoviju inačicu Bluetooth Low Energy protokola, a njegova ekstenzivna podrška za uređaje, razne topologije mreža te mnogi dostupni primjeri uporabe radiokomunikacijskog sučelja omogućuju lagan i brz razvoj vlastitih aplikacija. Mikrokontroler također nudi dovoljno procesorske snage svojom dvojezgrenom izvedbom za osnovnu obradu podataka, koju izvodi na energetski prihvatljiv način što osigurava fleksibilnost napajanja baterijom te neovisnost o krutoj mreži koja nije uvijek dostupna na udaljenim lokacijama. Korištenje Bluetooth Low Energy protokola i naprednih mikrokontrolerskih rješenja tvrtke STMicroelectronics osigurava brz i fleksibilan razvoj senzorskog čvora i pripadne programske aplikacije koji ne ovise o pokretnoj mobilnoj mreži i izvoru električne energije na područjima primjene senzorske mreže. Bluetooth Low Energy danas je široko rasprostranjen zbog svoje prisutnosti u raznim nosivim uređajima, ali i zbog činjenice da je dio specifikacije Bluetooth protokola. Upravo zbog široke dostupnosti, ali i dokazanih funkcionalnosti korišten je za interakciju korisnika sa senzorskim čvorom. Interakcija korisnika s podacima senzorskog

čvora ostvaruje se putem razvijene aplikacije za mobilni uređaj. Pametni mobilni uređaji opremljeni su svim funkcionalnostima potrebnima za ostvarivanje bežične komunikacije sa senzorskim čvorom, laki za korištenje i sveprisutni u društvu. Kao primjer korisničkog uređaja za pristup podacima senzorskih čvorova odabran je iPhone 11 pametni mobilni uređaj te je razvijena mobilna aplikacija kojom se spaja na senzorski čvor, preuzima odgovarajuće podatke i prikazuje na zaslonu uz tekstualni i grafički prikaz. Tako prikupljene podatke iz aplikacije korisnici mogu poslati na pripadno spremište podataka u oblaku gdje su sigurno spremljeni i dostupni za daljnju obradu i analizu uz korištenje gotovo neograničenih resursa Microsoft Azure platforme.

Korišteni senzori jednostavni su i cjenovno prihvatljivi, omogućuju jednostavnu detekciju opasnih plinova, zagađenja zraka i fizikalnih parametara atmosfere koja se nalazi neposredno oko njih. Premda nisu prikladni za ekstenzivna precizna mjerena, za takvo nešto nema ni potrebe jer je sama detekcija prisutnosti mjerene tvari u zraku dovoljna da bi i kratka izlaganja predstavljala opasnost za zdravlje, a dostupna preciznost fizikalnih mjerena omogućava praćenje uzoraka njihovih kretanja. Za napajanje senzora koristi se obnovljivi izvor energije, odnosno energija sunčevog zračenja koja se pomoću solarnog panela pretvara u električnu energiju neposredno na lokaciji na kojoj se nalazi mikrokontroler. Kada sunčev zračenje nije prisutno ili njegov intenzitet nije dovoljan za napajanje senzorskog čvora brine se priključena litij-ionska baterija.

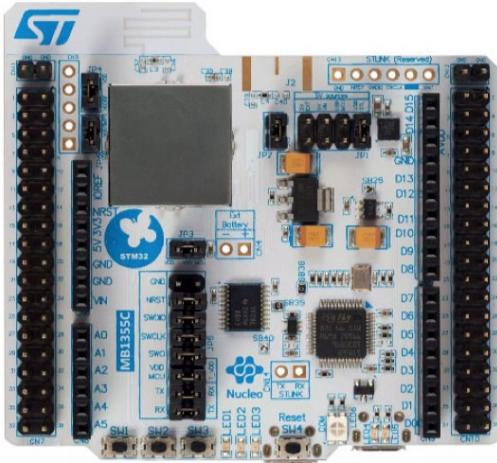
Uz sve navedeno osigurana je potpuna neovisnost senzorskog čvora te omogućeno njegovo postavljanje na gotovo sve lokacije jer nije potrebna nikakva dostupna infrastruktura za njegovo korištenje, a pritom je ostao cjenovno prihvatljiv te jednostavan za korištenje. Pritom se korisnike educira i obavještava o stanju i vrijednostima mjerena zraka oko njih te budi svijest o utjecaju pojedinih tvari u zraku na njihovo zdravlje.

3. Uredaji

Uredaji koji su odabrani za izradu senzorskog čvora izabrani su zbog svoje pristupačne cijene, lake dobavlјivosti, dobrih karakteristika i lake međusobne integracije. Oslonac senzorske mreže je nadogradiva i lako proširiva STM32 Nucleo platforma proizvođača ST Microelectronics s raznim senzorima zraka, svjetla, i vlage tla.

3.1. STM32WB55

STM32WB55, prikazan na slici 3.1, višeprotokolni je uređaj operativan pri izrazito maloj potrošnji električne energije koji implementira najnovije radiofrekvencijske protokole, između ostalog i Bluetooth verzije 5.3 u potpunom skladu s traženom specifikacijom Bluetooth SIG konzorcija, IEEE 802.15.4-2011 standarda i s punom implementacijom BLE (Bluetooth Low Energy) protokola. Dvojezgrena izvedba uređaja podrazumijeva posebnu jezgru za procesiranje potreba komunikacijskih protokola u stvarnom vremenu i bez resursnog opterećivanja glavne jezgre. Glavna jezgra implementacija je ARM M4 arhitekture koja omogućuje visoke performanse, a pritom nema velike energetske zahtjeve. 32 bitna RISC (Reduced instruction set computer) arhitektura osigurava rad velike efikasnosti, a međujezgrena komunikacija omogućava brzi i zajednički pristup svim resursima uz nisku latenciju te međujezgrenu neovisnost. Uredaj posjeduje 512 kB radne memorije i 1 MB *flash* memorije kojoj je na raspolaganju čak 14 direktnih DMA (Direct Memory Access) kanala za komunikaciju s jezgrama uređaja ili njemu perifernih uređaja. Vlastito napajanje u obliku DC-DC konvertera omogućuje napajanje uređaja raznim razinama napona bilo pomoću USB konekcije ili CR2032 baterije [10].



Slika 3.1: STM32WB55 mikrokontroler

3.2. IKS01A3

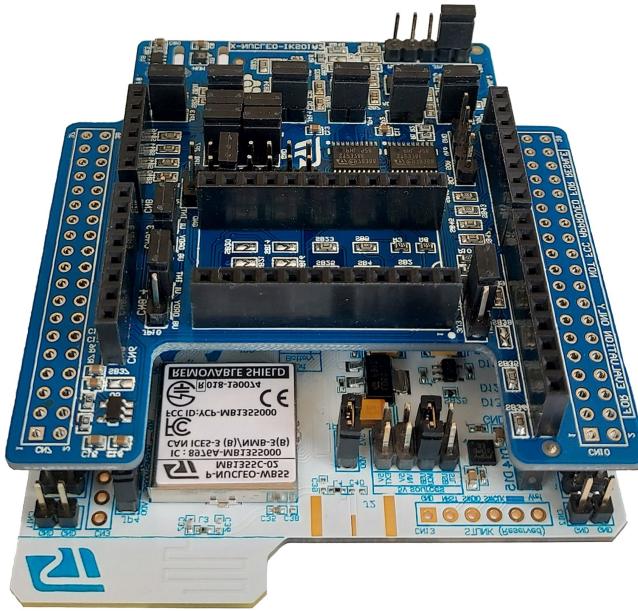
IKS01A3 je senzorsko proširenje za STM32 Nucleo platformu koje na sebi sadrži skup senzora pokreta i nekoliko senzora stanja okoliša u kojem se nalazi[11]. Za komunikaciju s glavnim dijelom senzorskog paketa, odnosno mikrokontrolerom, koristi I2C protokol, a kompatibilno je s Arduino UNO R3 konektorom. Prikaz tako spojenog mikrokontrolera i senzorskog proširenja prikazano je na slici 3.2 Između ostalih IKS01A3 raspolaže sa senzorima:

- HTS221 - senzor vlage zraka i temperature
- LPS22HH - senzor tlaka
- STTS751 - senzor temperature.

Uz senzorsko sklopolje dostupna je i integrirana programska podrška za svaki od senzora kompatibilna s programskim razvojnim okruženjem STMCube IDE i Mbed OS operativnim sustavom.

3.2.1. STM32 Nucleo

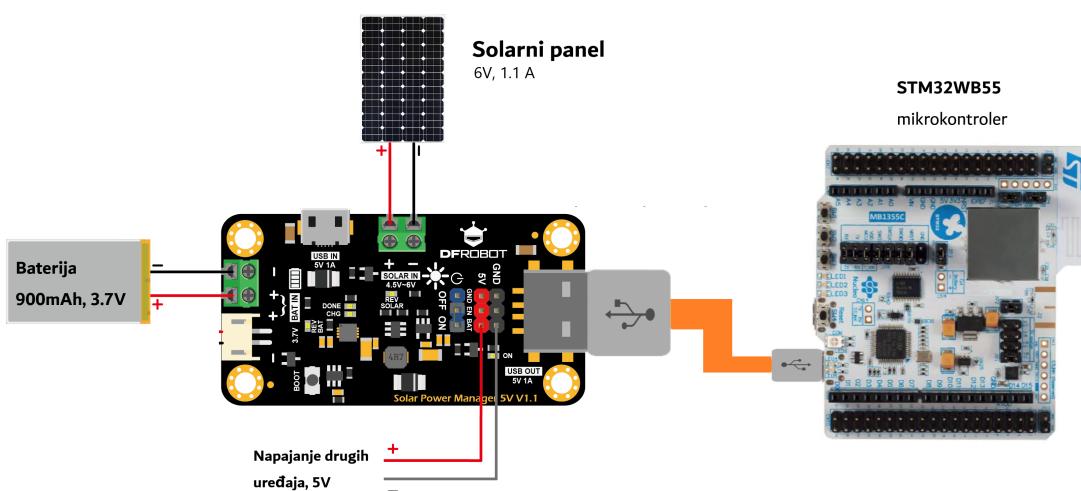
STM32 Nucleo obitelj proizvoda mikrokontrolera predstavlja lako dostupnu i cjenovno prihvatljivo rješenje za kreiranje kreativnih prototipa i testiranje ideja s mikrokontrolerskim jedinicama. Srž platforme je ostvarena međukompatibilnost dijeljenjem zajedničkih konektora koji omogućuju lako spajanje i pouzdanu komunikaciju između različitih specificiranih jedinica. Prednost ove platforme je i prisutnost STLINK programatora na samoj pločici koji omogućuje instalaciju korisničkih programa bez dodatnog sklopolja što ubrzava i olakšava razvoj programske potpore. Uz sve navedeno, uključena je i nativna podrška za različita programska okruženja poput IAR EWARM, Keil® MDK-ARM, Mbed™ kao i sva razvojne okoline bazirane na GCC/LLVM prevodiocima.



Slika 3.2: IKS01A3 proširenje i mikrokontroler

3.3. Neovisni DC izvor

Senzorski čvor napajan je električnom energijom proizvedenom iz sunčevog zračenja pomoću solarnog panela. Da bi se osigurao ispravan rad senzorskog čvora i tijekom mračnih perioda dana u rješenje DC izvora integrirana je i litij-ionska baterija u ulozi spremišta energije. Monokristalni solarni panel ima silikonski panel A klase, otporan je na vanjske uvjete poput vlage, a nudi efikasnost pretvorbe od 21%. Na izlazu daje napon od 6 V, a struja kratkog spoja u idealnim uvjetima iznosi 1.1 amper, no u svim uvjetima zbog svoje velike efikasnosti osigurava ispravan rad mikrokontrolera i pripadnih senzora, kao i punjenje baterije viškom proizvedene energije. Uz solarni panel korišten je i pripadni upravljački sustav Solar Power Manager 5V proizvođača DFRobot, a topološki prikaz spajanja cijelog sustava prikazan je na slici 3.3. Sustav raspolaže potrebnim funkcijama za osiguravanje ispravnog rada punjenja i upravljanja baterijom nazivnog napona 3.7 V, a na sebi sadrži i DC-DC pretvarač napona koji osigurava ispravan i filtriran napon i struju bez harmoničkih distorzija [12]. Uz sve navedeno, upravljački sustav brine o sigurnosti solarnog panela i zdravlju litij-ionske baterije.



Slika 3.3: Spajanje DFRobot Power Managera, mikrokontrolera, solarnog panela i baterije

3.4. Senzori

Jedan od ciljeva kod razvoja platforme bio je osiguravanje modularnosti i raznovrsnosti senzorskih čvorova uz zadržavanje kompatibilnosti s platformom i razvijenom aplikacijom. Rezultat toga je ostvarenje raznolikosti senzorskih čvorova i mjerena koje mogu isti ponuditi, odnosno omogućena je specijalizacija pojedinih čvorova i fokusiranje dostupnih resursa obrade i prijenosa na mjerena koja su od posebnog interesa za to područje. Senzori koji su korišteni u razvoju prikazani su u nastavku, a topološki prikaz mreže na slici 3.10.

3.4.1. MQ9

MQ9 prikazan na slici 3.4 plinski je senzor s visokom osjetljivošću na ugljični monoksid, metan i LPG plin. Senzor se može koristiti za otkrivanje različitih plinova koji sadrže CO i zapaljive komponente. Precizan je, jeftin i jednostavan za korištenje jer je za njegovo korištenje potrebna samo analogna veza. Analogni signal dobiven sa senzora kvantificira se unutar analogno-digitalnog pretvornika mikrokontrolera. Senzor napajamo putem 5V izvora kojeg također nudi kontroler, no napajanje komponente može biti izvedeno i samostalno u slučaju nedostatka kapaciteta. Senzor je potrebno predgrijati 24 sata prije njegovog korištenja, a dolazi tvornički kalibriran [13].



Slika 3.4: MQ9 senzor

3.4.2. MQ131

Senzor MQ131 služi za mjerjenje koncentracije ozona u njegovojo neposrednoj blizini u vrijednostima između 10 ppm i 1000 ppm. Prije uporabe potrebno ga je predgrijati 24 sata, a za rad u standardnim uvjetima nije ga potrebno dodatno kalibrirati. Senzor je napajan iz izvora 5 V koji može biti mikrokontroler ili neovisno napajanje [14]. Podatkovne vrijednosti iščitavaju se u obliku analogne vrijednosti napona na izlazu koje je potrebno kvantificirati analogno-digitalnim pretvornikom. Senzor MQ131 prikazan je na slici 3.5



Slika 3.5: MQ131 senzor

3.4.3. MQ135

MQ135 je poluvodički senzor visokoosjetljiv na NH₃, NO_x, CO₂, benzen, i dim u atmosferi [15]. Dostupan je po niskoj cijeni, a prilagođen je za različite aplikacije sustava za otkrivanje i praćenje štetnih plinova. Ako koncentracija plinova prijeđe granicu praga tvornički kalibriranih vrijednosti koncentracije plina, tada analogni izlaz senzora plina postaje visok. Analogni izlazni napon daje približnu vrijednost razine plina prisutnog u zraku, a potrebno ga je analogno-digitalnim pretvornikom obraditi u mikrokontroleru. Tvornički je kalibriran, napaja se putem izvora od 5V, prije uporabe potrebno ga je predgrijati u trajanju od 20 sekundi da bi se dobila precizna mjerena, a prikazan je na slici 3.6



Slika 3.6: MQ135 senzor

3.4.4. LTR-507ALS

LTR-507ALS integrirani je digitalni svjetlosni senzor i senzor blizine, a prikazan je na slici 3.7. Senzor pretvara intenzitet svjetlosti u digitalni izlazni signal te, za razliku od drugih

korištenih senzora, daljnja obrada dobivenog signala nije potrebna. S mikrokontrolerom senzor komunicira putem I2C protokola koji omogućava jednostavno povezivanje i dohvaćanje podataka [16]. Senzor koristi napajanje od 3,3 V, a zbog njegove izuzetno male potrošnje preporučljivo je koristiti napajanje koje za vanjske uređaje nudi mikrokontroler.



Slika 3.7: LTR-507ALS senzor

3.4.5. GP2Y1010AU0F

GP2Y1010AU0F je senzor prašine koji za svoje funkciranje koristi sustav optičkih senzora. Infracrvena emitirajuća dioda (IRED) i fototranzistor dijagonalno su raspoređeni u ovom uređaju, a otkrivanje prašine u zraku odvija se pomoću reflektiranog svjetla diode na fototranzistoru. Posebno je učinkovit za detekciju vrlo sitnih čestica poput dima cigarete, a zbog visoke preciznosti može razlikovati dim od kućne prašine uzorkom impulsa izlaznog napona [17]. Analogno komunicira s mikrokontrolerom, napaja se iz 5V izvora, a njegovo predgrijavanje nije potrebno. Senzor je prikazan na slici 3.8



Slika 3.8: GP2Y1010AU0F senzor

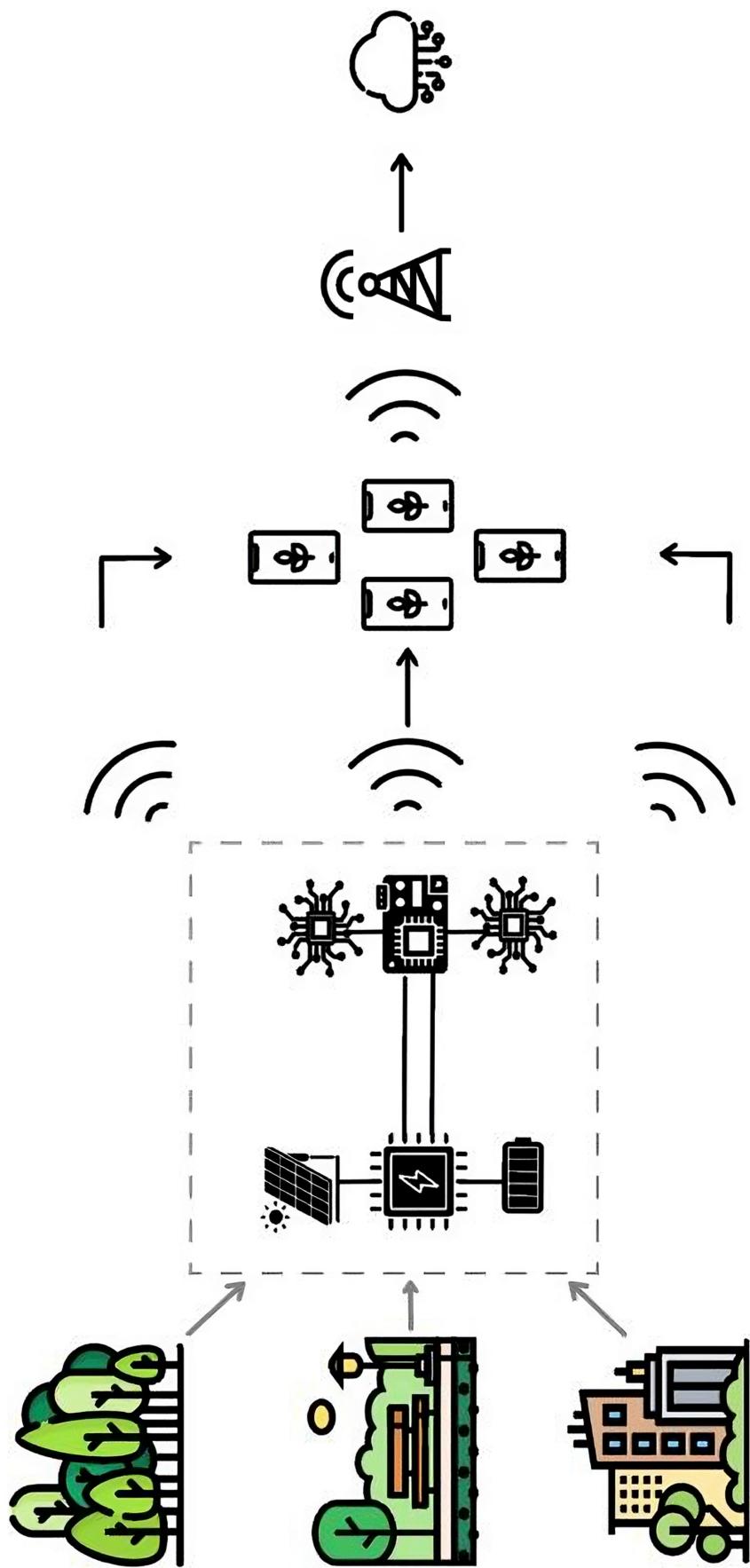
3.5. iPhone 11

Kao centralni uređaj za prikaz i obradu podataka u razvijenom sustavu koristi se pametni mobilni uređaj. Za razvoj i testiranje rješenja korišten je iPhone 11 marke Apple koji raspolaze Apple A13 višejezrenom procesorskom jedinicom, 4GB radne memorije, dodirnim zaslonom veličine 6.1" te implementira najnoviju inačicu 5.3 Bluetooth Low Energy bežičnog komunikacijskog protokola. Ima mogućnost spajanja na bežičnu lokalnu mrežu u 2.4 GHz i 5 GHz frekvencijskom spektru te mobilne pokretne mreže druge, treće i četvrte generacije. Pokreće ga najnovija verzija iOS operativnog sustava iOS16, a na računalo se spaja Lightning konektorom. Međutim, razvijena aplikacija omogućava korisnički pristup svakom iPhone uređaju koji pokreće minimalno verziju 14 iOS operacijskog sustava, a za slanje podataka na spremište u oblaku potrebna je bilo koja vrsta povezanosti na Internet. Uređaj je prikazan na slici 3.9.

Mobilni uređaj ima mogućnost prikaza obavijesti na zaslonu uređaja koje mogu biti kreirane i kada aplikacija nije prikazana na zaslonu. Takvu mogućnost platforma intenzivno koristi kako bi povećala broj korisnika i njihovu svijest o stanju njihove okoline čak i kada aktivno ne koriste aplikaciju. U postavkama uređaja moguće je kontrolirati dostupnost obavijesti za pojedinu aplikaciju.



Slika 3.9: Pametni mobilni uređaj iPhone 11



Slika 3.10: Topološki prikaz mreže sa svim komponentama

4. Tehnologije

4.1. Mikrokontroler

Mikrokontroler je centralna jedinica senzorskog čvora na koji su vezani svi senzori. Njime upravlja operacijski sustav izvođen u stvarnom vremenu koji je odgovoran za pravovremenu interakciju sa svim uređajima i dijelovima čvora. Kako bi se mikrokontroler prilagodio za spomenute zadaće, moguće je koristiti različita razvojna okruženja i programske jezike.

4.1.1. RTOS

Operacijski sustav u stvarnom vremenu (RTOS, engl. *Real Time Operating System*) je operacijski sustav koji osigurava raspored zadataka u kojem svi procesi mogu završiti izvođenje u zadanom vremenskom ograničenju, najčešće reda veličine stotina milisekundi. Ova tehnologija koristi se u većini mikrokontrolera koji trebaju izvoditi više zadataka istovremeno. STM32 mikrokontroleri u pravilu koriste FreeRTOS, vodeći RTOS za mikrokontrolere i mikroprocesore kojeg podržavaju mnoge svjetske kompanije[18]. RTOS je nužan u ovome senzorskom čvoru kako bi se istovremeno mogli prikupljati podatci s više različitih senzora te osigurala kontinuirana bežična komunikacija. Kada se ne bi koristio RTOS, zadataci poput mjerjenja senzora i slanja podataka morali bi se obavljati slijedno što bi usporilo proces prikupljanja senzorskih podataka i narušilo korisničko iskustvo.

4.1.2. CubeIDE, CubeMX i CubeProgrammer

CubeIDE je alat za programiranje mikrokontrolera koji je razvila tvrtka STMicroelectronics. Alat je namijenjen za programiranje funkcionalnosti STM mikrokontrolera i mikroprocesora. Razvojno okruženje izgledom podsjeća na klasične alate za programiranje. Sastoje se od kartice za pisanje koda, kartice za pregled projektnog stabla te konzole i mnogih drugih kartica koji pomažu za lakše i brže programiranje. Također, kartice se mogu prilagoditi potrebama projekta i preferencama programera.

CubeIDE koristi alat CubeMX za generiranje koda za željene uređaje. Alat CubeMX olakšava razvoj aplikacija za mikrokontrolere tako što omogućava jednostavnu konfigura-

ciju željenih uređaja. Pomoću alata CubeMX moguće je konfigurirati razne mikrokontrolere tvrtke STMicroelectronics. Konfiguracija uređaja odvija se pomoću sučelja jednostavnog za korištenje te je pomoću njega moguće konfiguriranje raznih periferija i tehnologija mikrokontrolera kao što su timeri, USART i analogno-digitalni pretvornici, ali također je moguće i konfiguriranje ulaznih i izlaznih pinova mikrokontrolera. Po završetku konfiguracije potrebno je pritisnuti tipku za generiranje koda te se potom otvara alat CubeIDE zajedno sa generiranim kosturom koda.

CubeProgrammer također je alat tvrtke STMicroelectronics koji omoguće programiranje mikrokontrolera. Navedeni alat najčešće se koristi za ažuriranje *firmwarea* željenog uređaja, ali pomoću njega je moguće i direktno upisivanje korisničkog koda u *flash* memoriju te postavljanje željenog BLE stoga.

4.1.3. Mbed OS

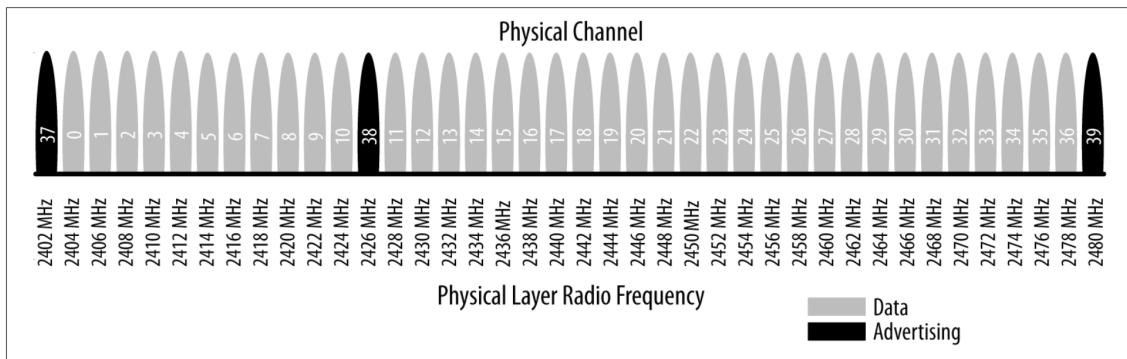
MBed je besplatna platforma otvorenog koda za programiranje ARM Cortex-M mikrokontrolera. Okruženje je intuitivno za korištenje te korisnicima omogućava brzo i jednostavno razvijanje projekata. Aplikacije se razvijaju u programskom jeziku C++ koji je jedan od najrasprostranjenijih programskih jezika današnjice. Na internetskoj stranici alata MBed moguće je pronaći velik broj primjera koji pomažu pri razvijanju vlastitog projekta. Također, zajednica korisnika MBed platforme je velika i aktivna što omogućava dijeljenje iskustava s drugim korisnicima. Za pokretanje korisničkog koda na mikrokontroleru potrebno je odbrižiti željeni mikrokontroler te pritisnuti tipku "Run program". Razvijenu aplikaciju moguće je direktno iz programskog okruženja prenijeti na GitHub.

4.2. Bluetooth

Krajem osamdesetih godina prošloga stoljeća javlja se potreba za razvojem kratkodometne radiofrekvencijske tehnologije, a desetak godina kasnije nakon inicijalnog razvoja unutar laboratorija tvrtke Ericsson, ta je tehnologija usavršena i prvi je mobilni uređaj potpomođnut Bluetooth protokolom postao komercijalno dostupan 2001. godine. [19] Inicijalna inačica protokola dovela je revoluciju u mobilni svijet, a ubrzani razvoj senzorike, automatske te općenito primjena potrošačke elektronike niske potrošnje uvjetovali su evoluciju Bluetooth protokola u verziju koja može funkcionirati uz smanjenu potrošnju električne energije te omogućiti tada nezamislivu raspršenost i sveprisutnost IoT (Internet of things) uređaja. Takva inačica Bluetooth protokola nazvana je Bluetooth Low Energy i korištena je pri izradi ovog projekta.

4.2.1. Razlike BLE i BR/EDR protokola

BR/EDR protokol koristi se kod aplikacija koje zahtijevaju veću propusnost veze. Koristi 79 radio kanala čiji se frekvencijski raspon proteže između 2.4000 GHz i 2.4835 GHz. Komunikacijski kanal širine je 1 MHz, a bira se na pseudo-nasumičan način. BLE inačica Bluetooth protokola definirana je na jednakom frekvencijskom rasponu, no širina kanala od 2MHz uvjetuje dvaput manji broj radio kanala od čega su tri rezervirana za oglašavanje uređaja. Grafički prikaz raspona komunikacijskih kanala prikazan je na slici 4.1. Upravo oglašavački način rada BLE uređajima omogućuje bržu detekciju i povezivanje s drugim uređajima. Njihovi oglašavački kanali konstantno su aktivni, dok su, prema specifikaciji protokola BD/EDR protokola, uređaji koji ga koriste dužni aktivirati istraživački način rada tek svake dvije i pol sekunde. Maksimalna propusnost BD/EDR protokola je 3 Mbit/s dok se BLE zadržava na teorijskom maksimumu od 1 MBit/s kojeg rijetko dostiže u realnim aplikacijama.



Slika 4.1: Prikaz radiokanala BLE komunikacijskog protokola, [20]

BLE protokol ispunjava svoj cilj energetski jeftinijeg protokola jer funkcioniра uz snage malog iznosa i do 0.01 W, dok se BR/EDR Bluetooth zadržao na operativnom iznosu snage od 1W. Potrošnja BLE uređaja uvelike ovisi o njihovoj konfiguraciji dometa, koji u krajnjoj maksimalnoj vrijednosti iznosi i do 1000 m u slučaju direktnе optičke vidljivosti i korištenju skopovolja razvijenog za tu namjenu poput EZ-BT™ XR WICED modula tvrtke CYPRESS. [21] Važno je i napomenuti da na tom dosegu BR/EDR protokol može uspostaviti direktnu komunikaciju samo s jednim uređajem u isto vrijeme, dok BLE protokol uz direktnu komunikaciju definira i *Mesh*, *Star* i *Broadcast* topologije povezivanja koje mogu biti od velike koristi prilikom korištenja više uređaja istovremeno u aplikacijama poput senzorskih mreža, kontrolnih sustava, pametnih domova i drugih.

4.2.2. Uloge uređaja u BLE protokolu

Glavna podjela uloga uređaja u komunikaciji BLE protokolom sastoji se od jednog centralnog uređaja i jednog ili više perifernih uređaja. Uloga perifernog uređaja je periodično

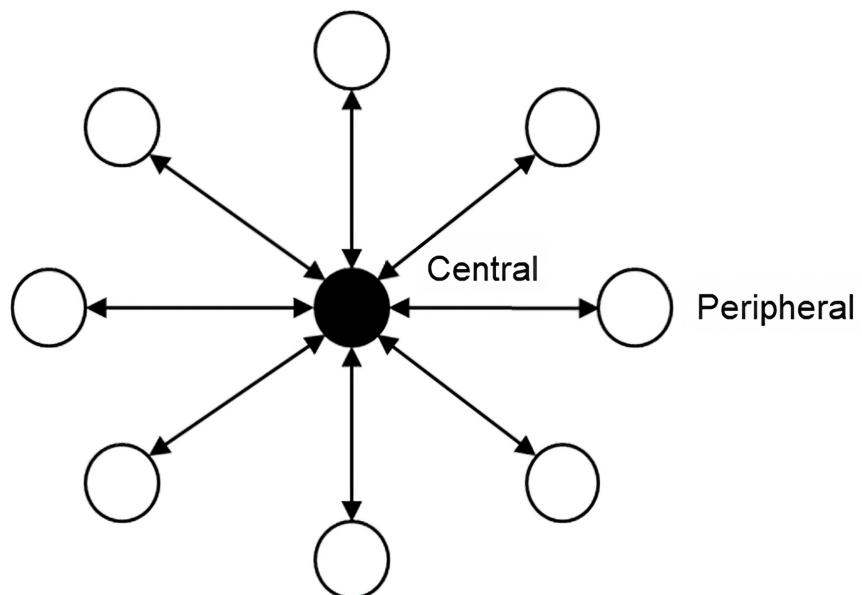
oglašavati svoje pakete koji omogućuju centralnom uređaju identifikaciju perifernih uređaja te, u slučaju kada je to potrebno, uspostavljanje veze s njima. Očigledno se radi o asimetričnom odnosu uloga što omogućuje razne vrste perifernih uređaja jer oni mogu biti fizički mali te energetski i procesorski nezahtjevni. Takav odnos uređaja prikazan je na slici 4.2.

Centralni pružatelj (engl. *central server*)

Centralni uređaj u senzorskim mrežama koje koriste funkcionalnost BLE protokola najčešće predstavlja resursno jači uređaj, a njegova uloga je inicijalizacija svih parametara GATT (engl. Generic Attribute Profile) servera, predaja zahtjeva za povezivanjem i uspostavljanje veze s perifernim čvorovima mreže te kontrola svih parametara komunikacije. Jedan centralni uređaj može istovremeno biti spojen na ukupno 8 različitih perifernih uređaja.

Periferni uređaj (engl. *peripheral*)

Periferni uređaji obično predstavljaju manje kompleksne uređaje u senzorskim mrežama, a njihova osnovna zadaća je na energetski prihvatljiv način prikupljati podatke te ih na siguran i brz način proslijediti centralnom uređaju na daljnju obradu. Kada nisu spojeni na centralni uređaj nalaze se u oglašavačkom načinu rada omogućujući tako brzu detekciju i spajanje.

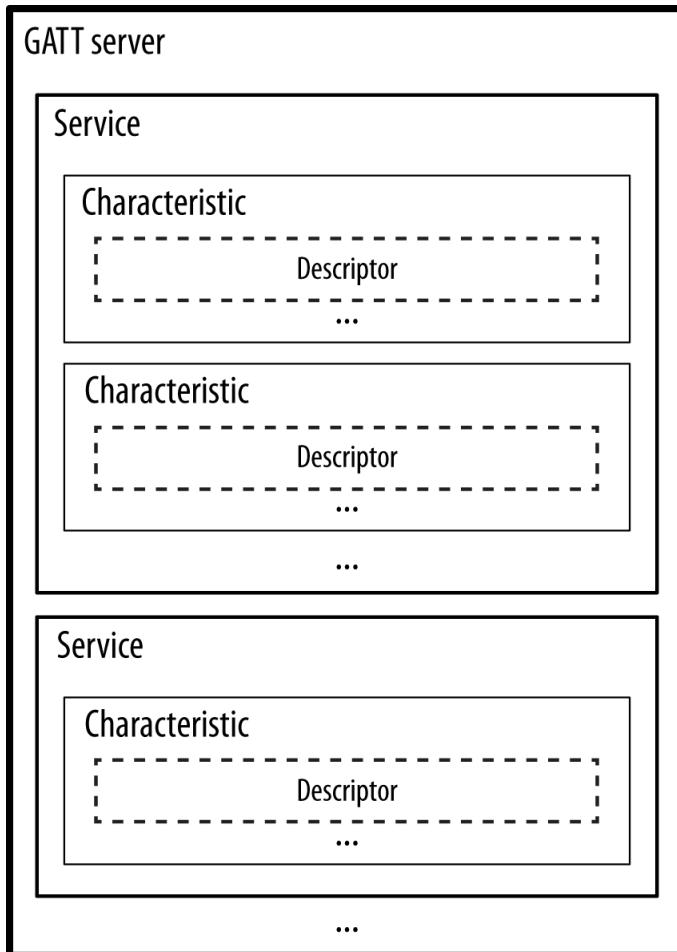


Slika 4.2: Prikaz međusobnih odnosa uređaja BLE komunikacijskog protokola

4.2.3. Atributni prijenos podataka

Radi boljeg razumijevanja razmjene podataka BLE protokolom potrebno je opisati Generic Access Profile (GAP) koji je temelj BLE protokola i atributnog prijenosa podataka kojeg koristi. GAP definira temeljna pravila funkciranja raspoznavanja, povezivanja i razmjene sadržaja između uređaja na siguran i strukturiran način te je neophodan za implementaciju protokola. Osim uloge u odnosu dva ili više uređaja, GAP omogućuje definiranje načina rada i ponašanja uređaja u pojedinim situacijama te definira uporabu Generic Attribute Profile (GATT) protokola koji opisuje hijerarhijsku strukturu podataka na temelju profila. Profili usklađuju mogućnosti uređaja te standardiziraju komunikaciju između njih na siguran i jednostavan način. Profil se sastoji od servisa, svojstva servisa, te opisnika svojstva. Dok je implementacija servisa i njegovih svojstava nužna, opisnik pojedinog svojstva može se izostaviti. Takva struktura podatka prikazana je na slici 4.3.

Servisi imaju opciju referenciranja jednih u odnosu na druge kako bi se stvorila hijerarhijska struktura podatka ili kako bi se omogućilo spremanje više podataka koji se nalaze unutar njihovih karakteristika. Svaki tako definirani atribut nosi svoj vlastiti unikatni 128 bitni identifikator nazvan Universally Unique Identifier (UUID). Kako je veličina atributa ograničena na 27 bajta, 16 bajtna vrijednost koju zauzima UUID stvorila bi neefikasan protokol pa BLE definira 16 odnosno 32 bitni format koji, premda više ne može biti nasumično generiran, omogućuje smještaj više korisničkih podataka unutar atributa. Takve UUID vrijednosti strogo su kontrolirane i propisane od strane Bluetooth SIG konzorcija.



Slika 4.3: Prikaz hijerarhijske strukture podataka BLE protokola

4.3. iOS

iOS operativni je sustav kojeg je razvila američka tvrtka Apple za svoje mobilne uređaje marke iPhone. Danas predstavlja jednu od dvije glavne mobilne platforme dostupne na tržištu, a osim naprednih komunikacijskih funkcionalnosti korisnicima daje pristup izradi i instalaciji vlastitih aplikacija putem iOS SDK (Software Development Kita) i komplementarnog Apple Developer računa kojeg svaki korisnik besplatno može registrirati. Takav račun nema potrebne dozvole za objavljivanje aplikacija na globalnoj tržnici aplikacija iOS operativnog sustava nazvanoj App Store pa taj slučaj ovdje neće biti razmatran. Lokalna instalacija aplikacije daje pristup svim potrebnim mogućnostima razvoja, distribucije i korištenja.

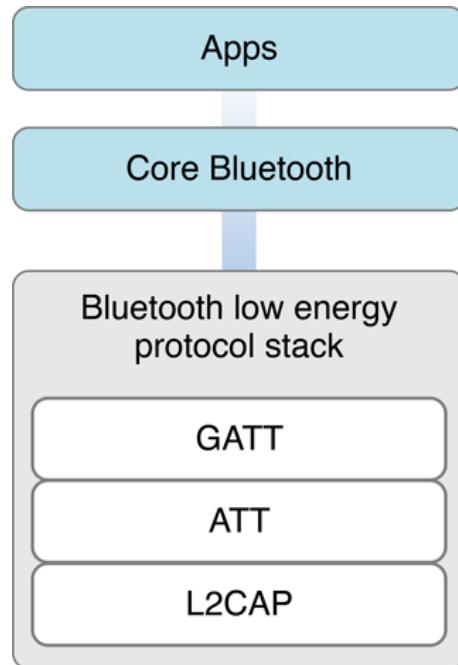
4.3.1. Razvoj aplikacija za iOS

Korisničke aplikacije za operativni sustav iOS moguće je razvijati koristeći se Objektivnim C ili Swift programskim jezikom. Premda su oba u potpunosti podržana i moguće ih je zajedno koristiti, Swift je noviji programski jezik razvijan s ciljem olakšavanja i ujedinjavanja procesa razvoja aplikacija u Appleovom ekosustavu. Dodatno, razvojni programer

može odabrati između korištenja SwiftUI i UIKit frameworka. SwiftUI novije je rješenje za razvoj korisničkog sučelja aplikacija, no u ovom trenutku korištenje UIKit frameworka predstavlja bolji izbor zbog svoje raširenosti i stabilnosti prilikom implementacije. Razvoj aplikacija odvija se kroz XCode razvojno okruženje dostupno samo za macOS platformu koje nudi dodatan set alata za razvoj i olakšano distribuciju aplikacija na iOS uređaje. Za globalnu distribuciju potreban je Apple Developer korisnički račun koji nije besplatan, ili besplatna registracija vlastitog Apple ID računa kao računa razvojnog programera. Potonji pristup nosi sa sobom ograničenja poput količine uređaja na koje je moguće postaviti vlastitu aplikaciju, kao i vremensko ograničenje dostupnosti te aplikacije na tim uređajima. Uspješnom instalacijom i konfiguracijom XCode razvojnog okruženja, iOS uređaja i Apple računa zadovoljavaju se svi potrebni preduvjeti za razvoj vlastite mobilne aplikacije.

4.3.2. CoreBluetooth API

CoreBluetooth API (Application Programming Interface) sučelje je za programiranje aplikacija koje iOS razvojnim programerima omogućuje jednostavnu i sigurnu implementaciju BLE ili klasičnog Bluetooth BD/DER protokola u vlastite aplikacije. Nužno je da uređaj na koji se instalira aplikacija raspolaže iOS operativnim sustavom verzije 5 ili noviji i funkcionalnim Bluetooth sklopoljcem. Dodatna programerska zadaća jest ponuditi kratki opis načina funkcioniranja i razloga korištenja ovog sučelja u meta podacima aplikacije kako bi se ona uspješno prevela i instalirala na uređaj te prilikom korištenja imati korisničku dozvolu za korištenjem Bluetooth sklopoljla njihovog uređaja.



Slika 4.4: Prikaz uloge CoreBluetooth aplikacijskog sučelja

CoreBluetooth sučelje nudi apstraktan pristup sklopolju i programskoj podršci Bluetoo-

oth Low Energy protokola kao što je prikazano na slici 4.4, i to kroz servise, metode i objekte:

- CBCentral - objekt koji predstavlja centralni uređaj mreže i odgovoran je za sve daljnje postupke
- CBCentralManager - objekt koji omogućuje skeniranje, otkrivanje, spajanje i upravljanje uređajima
- CBPeripheral - objekt koji predstavlja spojeni klijentski uređaj
- CBService - objekt koji predstavlja kolekciju servisa dostupnih na klijentskom uređaju
- CBCharacteristic - objekt koji sadrži karakteristiku i sve opisne pripadne informacije
- setNotifyValue - metoda koja omogućuje primanje podataka sa specificiranih karakteristika.

Ovako preneseni podaci s mikrokontrolera u memoriju iOS uređaja nalaze se u obliku UInt8 zapisa koji nije prikladan za prikaz i daljnju manipulaciju, već se prije toga moraju pretvoriti u standardne cjelobrojne vrijednosti. Srećom, jezik Swift sadrži prototipe metoda za takvu operaciju u sklopu NSData sučelja [22].

4.3.3. UserNotificationCenter API

iOS definira dvije vrste obavijesti (engl. *notification*): lokalne obavijesti i *push* obavijesti. *Push* obavijesti generira udaljeni server te se one dostavljaju mrežno. Lokalne obavijesti generira aplikacija na samom uređaju. Obavijest može prikazivati tekstualni sadržaj, reproducirati zvuk ili ažurirati značke aplikacija. Da bi se lokalna obavijest prikazala potrebno je da neki uvjet okine njeno prikazivanje. Primjer obavijesti koju prikazuje razvijena aplikacija prikazan je na slici 5.5. iOS definira tri vrste uvjeta koji mogu poslužiti kao okidač za prikaz obavijesti: kalendarski događaj, vremenski događaj ili lokacija. Uz pravilno definiranje obavijesti potrebno je dobiti i dozvolu samog korisnika za njihovo prikazivanje na ekranu uređaja. Razvijena aplikacija koristi navedeni sustav lokalnih obavijesti, odnosno zadržava početnu ideju oslanjanja na lokalne resurse same opreme. Svaki put kada se korisnik s aplikacijom učitanom u predmemoriji nađe u zoni dostupnosti senzorskog uređaja prikazuje mu se obavijest, s ciljem veće korisnosti platforme.

4.3.4. Grafički prikaz podataka - *Charts*

Implementacija grafičkog prikaza podataka, odnosno prikaz povijesnih mjerena omogućen je dinamičkim linijskim grafom. Kako razvojni paket XCode i komplementarni programski jezik Swift ne raspolažu nativnom funkcijom iscrtavanja grafova, korišteno je open-source programsko rješenje Charts [23]. Instalacija programskih proširenja za XCode projekte odvija se upravitelja paketa nazvanog CocoaPods. CocoaPods je upravitelj ovisnosti

za Swift i Objective-C Xcode projekte. Pomaže upravljati bibliotekama o kojima ovise korisnički projekti i to tako da dohvaća izvorni kod proširenja te ga povezuje u XCode radni prostor. Upravitelj paketa CocoaPods također ima cilj poboljšati vidljivost i angažman knjižnice otvorenog koda trećih strana.

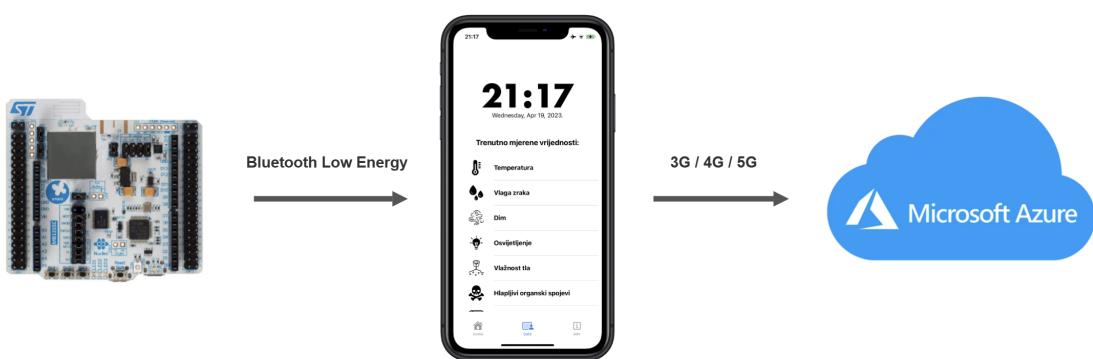
4.3.5. Pozadinski rad aplikacije

iOS operativni sustav ograničava pozadinski rad aplikacija i pozadinsku aktivnost Bluetooth sklopolja. Skeniranje uređaja u pozadini odvija se u dužim intervalima te je ograničeno na listu predefiniranih UUID zapisa. Jednom tako detektirani uređaj ne može biti ponovno detektiran, odnosno po ponovnoj detekciji Bluetooth sučelje neće obavijestiti aplikaciju koja ga implementira. Ovakva implementacija Bluetooth sklopolja predstavlja ograničenje koje razvijatelj aplikacije ne može zaobići, a sa svrhom štednje energije kroz smanjeno opterećenje procesorskog i radiofrekvencijskog sklopolja. Kako bismo zadovoljili spomenute zahtjeve, naša platforma koristi unaprijed definirane 128 bitne UUID zapise za svaki senzor. Time je omogućena pozadinska detekcija zona dostupnosti i obavještavanje korisnika kreiranim lokalnim obavijestima.

4.3.6. Integracija s Microsoft Azure servisom

Microsoft Azure je platforma koja omogućuje računarstvo u oblaku, a razvila ju je tvrtka Microsoft. Platforma omogućuje pojedincima i organizacijama pristup računalnim resursima na kojem god mjestu se nalazili tako dugo dok imaju pristup internetu [24]. Zbog svojih gotovo neograničenih računalnih resursa idealno je mjesto za spremanje velikih količina podataka i njihovu obradu, a svaki član akademске zajednice na području Republike Hrvatske ima besplatan ograničen pristup platformi. FERbarium omogućava izvoz svih povijesnih podataka na siguran i anonimiziran način na platformu Azure, pružajući pritom mogućnost pojedincima da svojim uređajima pridonose prikupljanju ažuriranih podataka. Ovaj način prikupljanja podataka postaje sve češći u znanstvenim projektima u kojima je količina podataka od nužne važnosti, a mnogi projekti uspješno su opravdali svoja istraživanja oslanjajući se na znanstvenu pomoć građana (*citizen science*) [25]. Tako pojedinci doprinose zajednici, a rješenje postaje fleksibilnije jer za njegovu upotrebu nije potrebno brinuti o dostupnosti interneta na području pružanja usluge, a korisnici se dodatno educiraju o svim aspektima mjerjenja i njegovim rezultatima.

iOS aplikacija sa serverskom stranom Azure platforme povezuje se koristeći službenu Microsoftovu komplementarnu programsku podršku kako bi se ostvarila potpuna integracija sa servisom, ali zadržala sigurnost i anonimnost korisnika.



Slika 4.5: Topološki prikaz tijeka podataka do Azure cloud servisa

5. Razvijeno rješenje

5.1. Aplikacija mikrokontrolera

Aplikacija mikrokontrolera izrađena je u alatu MBed studio. Kao podloga za aplikaciju korišten je primjer pod nazivom ble-GattServer. Navedeni primjer definira jedan BLE servis koji se sastoji od tri karakteristike. Aplikacija je prilagođena tako da se koriste samo dvije BLE karakteristike tako da se u pomoću jedne od karakteristika šalju podatci trenutnih mjerenja, a preko druge se šalju povijesni podatci iz memorije mikrokontrolera.

5.1.1. Prikupljanje senzorskih podataka

Podatci se sa svakog od senzora prikupljaju periodički u funkciji `getSensors()`. Senzorski podatci temperature, vlage zraka i tlaka zraka prikupljaju se s ekspanzijske pločice IKS01A3. Za ekspanzijsku pločicu postoji gotova biblioteka i pomoću nje se putem I²C protokola mogu dohvatiti podatci svih senzora ekspanzijske pločice. Dohvaćene podatke ne treba naknadno obrađivati nego se automatski dobivaju vrijednosti u Celzijevim stupnjevima, postotku vlažnosti te hektopaskalima.

Za podatke s ostalih senzora koristi se pretvarač napona preko kojeg se očitavaju analogne vrijednosti senzora. Pretvarač napona je potreban jer svi ostali senzori rade na 5 V, a mikrokontroler očitava vrijednosti do razine 3,3 V. Bez pretvarača napona očitavale bi se pogrešne vrijednosti sa senzora ili bi se u gorem slučaju pokvarili ulazni pinovi uslijed prevelikog napona.

Senzor vlage tla kao izlaz daje decimalnu vrijednost između 0 i 1. Taj podatak interpretira se kao postotak, gdje 100% znači da je zemlja u potpunosti suha, a 0% da se senzor nalazi u vodi. Taj podatak je inverzan od postotka vlažnosti zraka jer ovaj senzor mjeri otpor između dvije elektrode, jer što više vode u tlu tim je veća vodljivost.

Podatci ostalih senzora dobivaju se naponskom vrijednosti očitanom na analognim ulazima. Dobivene vrijednosti senzora koji mjeru zagadjenje zraka pretvaraju se u podatak mjerne jedinice ppm (*engl. parts per million*). Također, vrijednost senzora za svjetlost očitava se u mjernej jedinici lux. Popis svih senzora zajedno s vrijednostima koje mjerite načinom očitanja mjerjenja nalaze se u tablici 5.1.

Tablica 5.1: Popis korištenih senzora

Senzor	Mjerenja	Način očitanja mjerenja
IKS01A3	Temperatura, vлага i tlak zraka	I ² C
MQ9	CO, CH ₄ , LPG	AD pretvornik
MQ131	Ozon	AD pretvornik
MQ135	NH ₃ , sumpor, benzen, CO ₂ , dim	AD pretvornik
LTR-507ALS	Svjetlost	I ² C
GP2Y1010AU0F	PM25	I ² C

5.1.2. Slanje trenutnih podataka senzora

Svi trenutni senzorski podatci pohranjuju se u polje podataka tipa `uint8_t` (nenegativni cijeli brojevi širine 8 bitova). Prvi podatak u polju označava indeks mjerenja zbog lakšeg razvrstavanja mjerenja po kronološkom redoslijedu. Naknadni podatci odgovaraju mjeranjima svakog od senzora. Podatci se šalju periodički s vremenom od jedne sekunde uz pomoć funkcije `set_sensors()` koja može odjednom poslati cijelo polje podataka.

5.1.3. Pohranjivanje senzorskih podataka u memoriju

Izmjereni senzorski podatci pohranjuju se u memoriju kako bi se kasnije mogao ostvariti grafički trend izmjerениh vrijednosti. Podatci se u memoriju spremaju svaki sat uz pomoć funkcije `store_sensors()`. Mjerenja se u memoriju spremaju u obliku matrice, odnosno kao niz nizova podataka. U svakom trenutku postoji 48 vremenski odvojenih spremljenih nizova podataka koji se ciklički upisuju u memoriju. To znači da u svakom trenutku u memoriji postoje podatci senzora unazad 2 dana. Podatci se u memoriju upisuju svakih sat vremena kao prosječna vrijednost svih mjerena zadnjega sata. Podatci se mijere svaku sekundu te se ta vrijednost usrednjava. Taj interval je promjenjiv, ali ograničen memorijom mikrokontrolera. Za neku drugu primjenu podatci bi se mogli spremati i češće te u većoj količini.

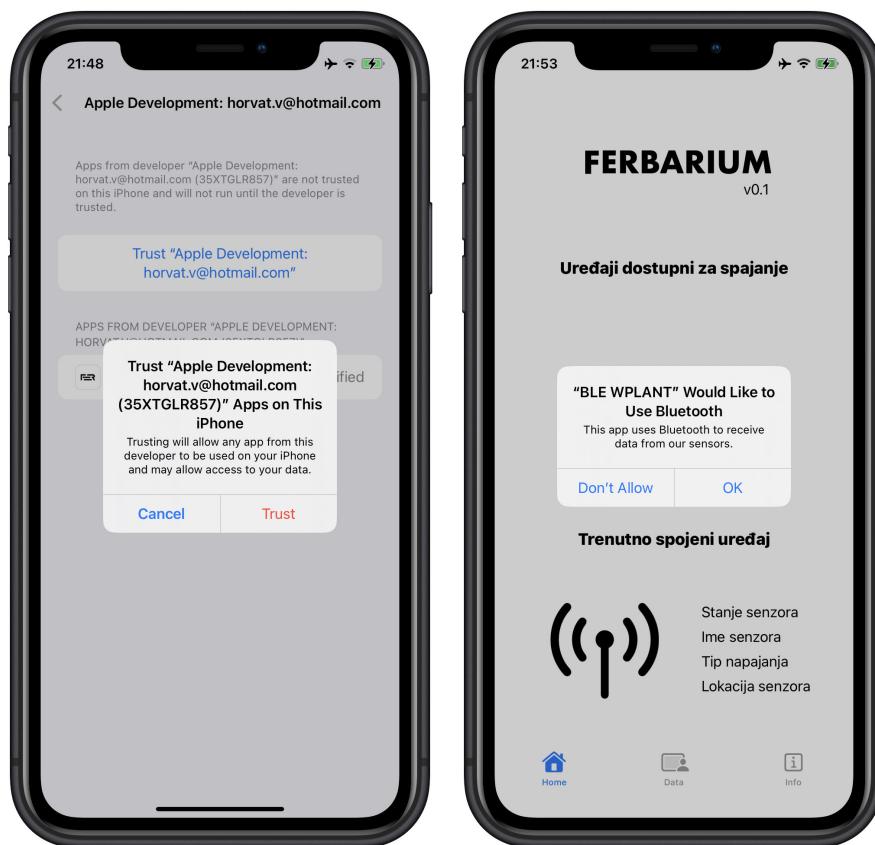
5.1.4. Slanje pohranjenih podataka senzora

Kao što je opisano u poglavljju 5.1.3, podatci se u memoriju spremaju kao nizovi nizova. Ti podatci su indeksirani po redu spremanja u memoriju te je tako na vrlo jednostavan način moguće slati i obrađivati te podatke. Kada se uređaj spoji na mikrokontroler počinje slanje memoriziranih podataka preko jedinstvenog UUID-ja. Podatci se šalju svakih 100 ms te se tako osigurava da svi spremljeni podatci budu u potpunosti bez greške poslani, a vrijeme slanja nije predugo. Tako korisnik unutar 5 sekundi dobiva sve spremljene podatke senzora u zadnjih 48 sati. Interval slanja još bi se mogao i smanjiti tako da se podatci brže pošalju,

ali za primjenu gdje se šalju povijesni podatci nije toliko bitna brzina koliko točnost slanja podataka.

5.2. iOS aplikacija

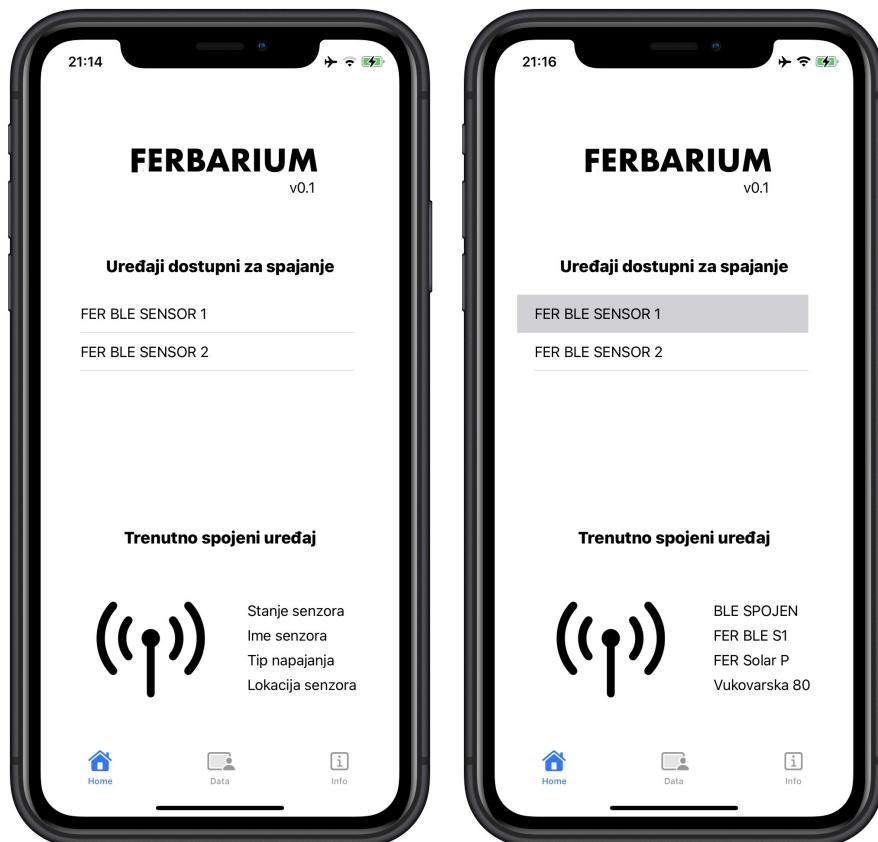
Prije prve uporabe aplikacije potrebno je dati dozvolu razvijatelju programskog rješenja za instalaciju aplikacije. Dozvola se izdaje afirmativnim odgovorom na iskočni prozor u postavkama uređaja, a potrebna je samo prilikom prvog pokretanja. Prikaz sučelja za davanje dozvola prikazan je na slici 5.1. Ista dozvola nije potrebna ako se aplikaciju distribuira putem AppStore tržnice aplikacija. Tijekom prvog pokretanja potrebno je i dati dozvolu aplikaciji za korištenje Bluetooth sklopolja uređaja, kao i njeno prikazivanje obavijesti na ekranu uređaja korisnika. Potrebne dozvole daju se samo prilikom prvog pokretanja, a njihova promjena moguća je u postavkama iPhone uređaja. Dozvole su potrebne za prepostavljeni rad aplikacije.



Slika 5.1: Zahtijevanje dozvola za instalaciju i rad aplikacije

5.2.1. Početni zaslon

Nakon pritiska ikone aplikacije na ekranu uređaja, korisniku aplikacije predstavljen je početni zaslon aplikacije prikazan na slici 5.2. Na njemu je korisniku dana mogućnost spajanja na neki od dostupnih senzora u blizini. Pritiskom na imena različitih senzora korisnik se spaja na odabrani senzor te u tom trenutku aplikacija u pozadini počinje prijenos podataka s mikrokontrolera koji je bio odabran. Osvježene vrijednosti instantno su prenesene i dostupne korisniku dok je za prijenos povijesnih mjerena proteklih 48 sati potrebno nekoliko sekundi kako bi se vrijednosti mjerena osvježile. Cijeli proces odvija se bez potrebe za interakcijom korisnika. Uz sve navedeno, dostupne su informacije o lokaciji navedenog senzora, načinu na koji je isti napajan te o kojem tipu senzora se radi. Aplikacija omogućava povezivanje na različite tipove senzora, odnosno u potpunosti je prilagođena za modularni tip razvijene platforme.



Slika 5.2: Prikaz početnog ekrana i spajanja na senzor

Nakon uspješnog spajanja na odabrani senzor i sinkronizacije povijesnih i trenutnih podataka, korisnik se može uputiti na sljedeću aktivnost u donjem izborniku, a to je prikaz podataka koje simbolizira ikona "Data".

5.2.2. Izbornik mjerena i prikaz podataka

Pritiskom na ikonu "Data", zaslon animirano prelazi na sljedeću odabranu aktivnost, a to je izbornik mjerena prikazan na slici 5.3. U tom je izborniku, uz trenutni datum i vrijeme, korisniku na raspolaganju odabir svih mjerena naše platforme. Dodirom pojedinog zapisa mjerena korisniku se otvara sljedeći prikaz koji je posvećen odabranom parametru okoliša. Dostupni parametri okoliša podudaraju se s dostupnim senzorskim paketom servisa, a oni su prikazani na tablici 5.2.

Tablica 5.2: Prikaz svih mjerena dostupnih u aplikaciji

Mjerenje	Mjerna jedinica	Interval mjerenja
Temperatura	°C	-40 - 120
Vлага zraka	%	0 - 100
Dim	ppm	10 - 1000
Osvijetljenje	lux	0 - 800
Vlažnost tla	%	0 - 100
Hlapljivi organski spojevi	ppm	10 - 1000
Sumpor	ppm	10 - 1000
Tlak zraka	bar	10 - 1000
Benzen	ppm	10 - 1000
PM25	ppm	10 - 1000
Ugljični monoksid	ppm	10 - 1000
LPG	ppm	10 - 1000
NH3	ppm	10 - 1000
Ugljikov dioksid	ppm	10 - 1000
Ozon	ppm	10 - 1000

Svaki parametar modeliran je kratkim uvodnim tekstom o važnosti i povijesti mjerena, trenutnom vrijednosti parametara te grafičkim prikazom kretanja vrijednosti tog mjerena proteklih 48 sati. Grafički prikaz podataka prikazan na slici 5.4 interaktivno je te omogućuje korisniku detaljno iščitavanje povijesnih vrijednosti pomoću uvećavanja i smanjivanja grafa te pozicioniranja određenog vremenskog perioda na prikaz.

5.2.3. Informacijski zaslon

Informacijski zaslon nudi osnovne podatke o aplikaciji te omogućava korisniku slanje svojih prikupljenih povijesnih podataka senzora na Microsoft Azure uslugu povezanu s aplikacijom. Na taj način korisnik sudjeluje u radu senzorske mreže, a ona postaje u potpunosti neovisna o pozadinskoj internetskoj infrastrukturi. Za prijenos podataka koristi se internet-

ska veza korisnika u izuzetno maloj količini. Jedini poslani podaci su podaci prikupljeni sa senzora, a sam podatak u potpunosti je anonimiziran nasumičnim identifikacijskim nazivom.

5.2.4. Sustav obavijesti

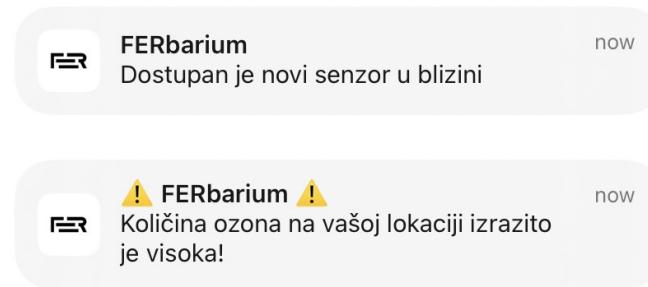
Implementirani sustav obavijesti važan je dio FERbariuma koji u sinergiji s omogućenim pozadinskim radom aplikacije daje korisniku informaciju o ulasku u područje pokriveno uslugom. U trenutku kada iOS uređaj dohvati oglašavačku poruku dostupnog mikrokontrolera na zaslonu će prikazati odgovarajuću poruku poput one na slici 5.5 te na njen dodir otvoriti pripadajuću aplikaciju. Ako se u bilo kojem trenutku kada je korisnik spojen na senzorski čvor stanje atmosfere u njegovoj neposrednoj blizini promjeni na po korisnika opasan način, aplikacija će također prikazati pripadajuću poruku s informacijom da bi korisnik FERbariuma trebao hitno promijeniti svoju lokaciju. Na taj način platforma čuva zdravlje i život korisnika te može biti od presudne važnosti zajednici.



Slika 5.3: Prikaz izbornika svih dostupnih mjerenja



Slika 5.4: Pregled prikaza mjerena temperature



Slika 5.5: Primjeri obavijesti

5.3. Čuvanje podataka u oblaku

Razvijena iOS aplikacija omogućuje prijenos povijesnih podataka senzorskih čvorova na spremište podataka u oblaku Azure čije sučelje je prikazano na slici 5.6. Nakon što su uspješno preneseni s mikrokontrolera, podaci se formatiraju u JSON (JavaScript Object Notation) format te su u potpuno anonimiziranom obliku spremljeni u *data container* Azure cloud servisa. Takvi podaci spremni su za buduću obradu ili povijesno čuvanje ovisno o željama korisnika. Servis Azure nudi gotovo neograničene mogućnosti i resurse, a vlasnik platforme na ovaj način ne mora brinuti o održavanju infrastrukture pristupa internetu jer se za prijenos prikupljenih podataka koriste uređaji korisnika. Uređaji su distribuirani po različitim javnim mrežama, a količina prenesenih podataka je zanemariva jer se koristi memorijski efikasan i moderan format zapisa koji je prilagođen daljnjoj obradi velike količine podataka.

Name	Modified	Access tier	Archive status	Blob type
8C97A4EF-A912-4199-9442-C206A056C73A	4/23/2023, 12:47:16 ...	Hot (Inferred)		Block blob
B7F7CF28-789C-4598-9F9D-72C7DCC16E86	4/24/2023, 6:33:09 PM	Hot (Inferred)		Block blob
CF720511-E44F-48FB-9305-0AEDDC616C70	4/24/2023, 6:33:20 PM	Hot (Inferred)		Block blob
D2226E85-2D92-41A7-A26F-E570B81E1955	4/24/2023, 6:33:25 PM	Hot (Inferred)		Block blob
DAF46BF6-F3B1-4CB3-80B6-F9D4D1FC57C8	4/24/2023, 6:30:44 PM	Hot (Inferred)		Block blob

Slika 5.6: Podaci senzorske mreže u oblaku

5.4. Ostvarenje senzorske mreže

Povezivanjem više senzorskih čvorova opisanih u radu može se ostvariti senzorska mreža kako bi se dodatno povećala učinkovitost prikupljanja podataka kroz veću pokrivenost i redundanciju podataka. Uređaji bi mogli biti strateški postavljeni na širem području te bi mogli mjeriti kvalitetu zraka na više različitih mjesto. Tako, uspoređivanjem mjerena, mogao bi se otkriti i izvor onečišćenja što bi uvelike pomoglo pri otklanjanju njegovog uzroka.

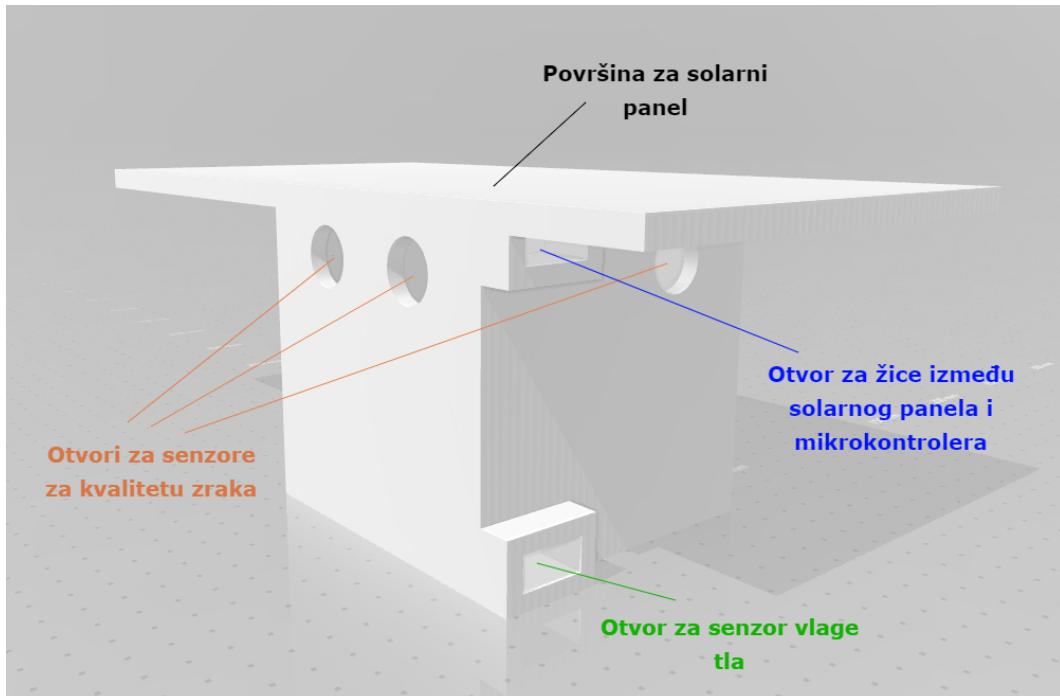
Još jedna moguća uporaba senzorske mreže je ostvarenje ideje pametnog grada. Senzorski čvorovi mogli bi biti postavljeni po cijelom gradu te bi se uz pomoć njih moglo pratiti

stanje okoline, ali i upravljati određenim napravama u gradu kao što su pametni semafori. Također, uz pomoć senzora za dim moglo bi se ostvariti automatsko pozivanje vatrogasne službe na mjesto događaja.

5.5. Kućište za vanjsku uporabu

Ideja cjelokupnog projekta je senzorski čvor koji bi fizički bio na otvorenom jer mjeri podatke iz okoline. Iz tog razloga potrebno je pripremiti uređaj za vanjsku uporabu tako da ga se obloži od vanjskih utjecaja zbog kojih se može pokvariti. Pri tome je nužno da neki od senzora imaju pristup zraku izvan kućišta kako bi mogli točno očitavati mjerena. Senzori koji ne smiju biti u kućištu su senzor vlage tla, senzor osvjetljenja te senzori za očitanje kvalitete zraka. Uz neke od senzora, izvan kućišta mora se nalaziti i solarni panel koji napaja neovisni DC izvor. Izradom ovakvog kućišta senzorski čvor mogao bi se primjenjivati u vanjskoj uporabi. Kućište je dizajnirano kao što je prikazano na slici 5.7, a može se izraditi 3D ispisom ili laserskim rezanjem te naknadnim spajanjem ploča.

Kućište na slici ima kružne otvore za MQ senzore kojima je potreban vanjski zrak kako bi mjerili ispravne podatke. Također, postoje i dva otvora za žice koji služe za žice između solarnog panela i mikrokontrolera te za senzor vlage tla koji mora biti izvan kućišta. Za solarni panel namijenjena je površina na vrhu kućišta.



Slika 5.7: Kućište za vanjsku uporabu

6. Zaključak

Pomoću senzorskog čvora moguće je mjeriti te obavještavati građane o kvaliteti zraka u određenom području. Zbog modularnosti senzorskog čvora moguće ga je prilagoditi i za druge primjene. Ovako razvijen senzorski čvor udovoljava svim iskazanim zahtjevima projekta WatchPlant [26] te postaje njegov integrirani dio. Senzorski čvor može se povezati sa senzorima koji se koriste za praćenje stanja biljaka te se mobilna aplikacija može prilagoditi tako da korisnicima omogućava uvid u prikupljene senzorske podatke. Specularia je projekt koji razvija strukturiran ekološki uzgoj primjenom autonomnih robota u staklenicima [9]. FERbarium senzorski čvor u njega je integriran za prikupljanje, distribuciju i obradu podataka o biljkama i stanju staklenika u kojem se biljke razvijaju.

Senzorski čvor može se primijeniti i za pametnu poljoprivredu. Kao primjer uporabe moglo bi postojati više senzorskih čvorova koji mjere vlagu tla na različitim područjima, a uz pomoć izrađene aplikacije na jednostavan način mogla bi se ostvariti funkcionalnost koja bi poljoprivredniku javila da je na određenom području zemlja suha te da ju treba zaliti. Jedan je to od mnogih primjera modularnosti i luke prilagodbe ovako razvijenog rješenja FERbarium.

ZAHVALA

Zahvaljujemo našim mentorima izv. prof. dr. sc. Matku Orsagu te prof. dr. sc Stjepanu Bogdanu što su nam omogućili te poduprli rad na ovome projektu. Posebnu zahvalu upućujemo asistentu mag. ing. Marku Križmančiću koji nam je svojom upornošću, motivacijom i savjetima uvelike pripomogao pri izradi ovoga rada.

LITERATURA

- [1] World Health Organisation. Ambient (outdoor) air pollution, 2022. URL [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- [2] Emily G. Snyder, Timothy H. Watkins, Paul A. Solomon, Eben D. Thoma, Ronald W. Williams, Gayle S. W. Hagler, David Shelow, David A. Hindin, Vasu J. Kilaru, Peter W. Preuss. The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20):11369–11377, 2013. doi: 10.1021/es4022602. URL <https://doi.org/10.1021/es4022602>. PMID: 23980922.
- [3] Nihan Celikkaya. Use of low-cost air quality monitoring devices for assessment of road transport related emissions. *Transportation Research Procedia*, 41:762–781, 2019.
- [4] Nifasath S Dr Baulkani. A review of wireless sensor networks in agriculture. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10:577–580, 12 2022. doi: 10.22214/ijraset.2022.47936.
- [5] Balakumaran Durairaj. Disaster management using wireless sensor networks. *International Scientific Journal of Engineering and Management*, 02, 04 2023. doi: 10.55041/ISJEM00410.
- [6] Paolo Bombelli. Powering a microprocessor by photosynthesis. *Energy & Environmental Science*, 15:2529–2536, 2022.
- [7] Michele Magno, Fabien Vultier, Bence Szebedy, Homare Yamahachi, Richard H. R. Hahnloser, Luca Benini. A bluetooth-low-energy sensor node for acoustic monitoring of small birds. *IEEE Sensors Journal*, 20(1):425–433, 2020. doi: 10.1109/JSEN.2019.2940282.
- [8] Heiko Hamann, Stjepan Bogdan, Antonio Diaz-Espejo, Laura García-Carmona, Virginia Hernandez-Santana, Serge Kernbach, Andreas Kernbach, Alfredo Quijano-López, Babak Salamat, Mostafa Wahby. WatchPlant: Networked Bio-hybrid Systems for Pollution Monitoring of Urban Areas. In *ALIFE 2021: The 2021 Conf. on Artificial Life*. {MIT} Press, 2021. doi: 10.1162/isal_a_00377. URL https://doi.org/10.1162/isal_a_00377.

- [9] Marsela Polic, Antun Ivanovic, Bruno Maric, Barbara Arbanas, Jelena Tabak, Matko Orsag. Structured Ecological Cultivation with Autonomous Robots in Indoor Agriculture. *Proceedings of the 16th International Conference on Telecommunications, ConTEL 2021*, str. 189–195, jun 2021. doi: 10.23919/CONTEL52528.2021.9495963.
- [10] STM32WB55RG website. URL https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32wb55rg.html#st_all-features_sec-nav-tab.
- [11] IKS01A3 website. URL <https://www.st.com/en/ecosystems/x-nucleo-iks01a3.html>.
- [12] DFRobot. Solar power manager 5v. URL <https://www.dfrobot.com/product-1712.html>.
- [13] HANWEI Electronics Co. LTD. MQ9 gas sensor datasheet. URL https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MQ-9_Hanwei.pdf.
- [14] HANWEI Electronics Co. LTD. MQ131 gas sensor datasheet. URL <https://www.sensorsportal.com/DOWNLOADS/MQ131.pdf>.
- [15] HANWEI Electronics Co. LTD. MQ135 gas sensor datasheet. URL https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MQ-135_Hanwei.pdf.
- [16] LITEON Technology. LTR-507ALS optical sensor datasheet. URL https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS86-2013-0014/LTR-507ALS-01_FINAL%20DS.pdf.
- [17] Sharp Corporation. GP2Y1010AU0F compact optical dust sensor. URL https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au_e.pdf.
- [18] FreeRTOS. URL <https://www.freertos.org>.
- [19] S. Rackley. *Wireless Networking Technology: From Principles to Successful Implementation*. Electronics & Electrical. Elsevier, Newnes, 2007. URL <https://books.google.hr/books?id=1wFyngEACAAJ>.
- [20] K. Townsend, C. Cufí, R. Davidson. *Getting Started with Bluetooth Low Energy: Tools and Techniques for Low-Power Networking*. EBSCOhost ebooks online. O'Reilly Media, 2014. URL <https://books.google.hr/books?id=24N7AwAAQBAJ>.
- [21] EZ-BT™ XR WICED® module datasheet. URL https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-CYBT-483039-EVAL-DataSheet-v05_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7d0d8da4017d0ee63d196e53.
- [22] T. Gaitatzis. *Bluetooth Low Energy in iOS Swift*. Tony Gaitatzis, 2017. URL <https://books.google.hr/books?id=PhmtDwAAQBAJ>.
- [23] Daniel Cohen Gindi. Charts, 2023. URL <https://github.com/danielgindi/Charts>.

- [24] J.A. Hyman. *Microsoft Azure For Dummies*. Wiley, 2023. URL <https://books.google.hr/books?id=dGOdEAAAQBAJ>.
- [25] Muki Haklay. *Citizen Science and Volunteered Geographic Information: Overview and Typology of Participation*, str. 105–122. Springer, Dordrecht, 01 2013. doi: 10.1007/978-94-007-4587-2_7.
- [26] Eduard Buss, Tim Lucas Rabbel, Viktor Horvat, Marko Krizmancic, Stjepan Bogdan, Mostafa Wahby, Heiko Hamann. PhytoNodes for Environmental Monitoring: Stimulus Classification based on Natural Plant Signals in an Interactive Energy-efficient Bio-hybrid System. In *ACM International Conference Proceeding Series*, str. 258–264. Association for Computing Machinery, sep 2022. doi: 10.1145/3524458.3547266. URL <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3524458.3547266>.

Marko Kozlik, Viktor Horvat

FERbarium - energetski neovisan bežični senzorski čvor upravljan mobilnom aplikacijom

Sažetak

Projektom FERbarium razvijen je bežični senzorski čvor i pripadna aplikacija za operativni sustav iOS. Senzorski čvor razvijen je koristeći STM32WB55 mikrokontroler koji ima integriranu podršku za Bluetooth Low Energy bežični komunikacijski protokol. Senzorski čvor ostvaren je spajanjem mikrokontrolera i cjenovno prihvatljivih senzora koji vrše mjerenja atmosfere u svojoj neposrednoj okolini, a cijeli senzorski čvor energetski je neovisan jer je napajan pomoću električne energije proizvedene pomoću solarnog panela i sunčeve svjetlosti. Senzorskim podacima bežičnog senzorskog čvora pristupa se pomoću komplementarne iOS mobilne aplikacije te je unutar aplikacije moguće iščitati trenutne mjerene vrijednosti kao i povijesne vrijednosti pomoću pripadnih grafičkih prikaza, a svi podaci se mogu sigurno i brzo spremiti na udaljeno spremište podataka u oblaku unutar servisa Azure. Izradom ovog projekta korisnicima se omogućuje praćenje kvalitete zraka u njihovoј okolini, njihovo pravovremeno obavještavanje ako se nađu u opasnoj okolini te prikupljanje podataka za daljnju analizu i obradu.

Ključne riječi: STM32, BLE, bežične senzorske mreže, iOS mobilna aplikacija

Marko Kozlik, Viktor Horvat

FERbarium - self-sustainable wireless sensor node controlled by mobile application

Summary

The FERbarium project developed a wireless sensor node and an associated application for the iOS operating system. The sensor node is developed using an STM32WB55 microcontroller with integrated Bluetooth Low Energy wireless communication protocol support. The sensor node was created by connecting a microcontroller and affordable sensors that measure the atmosphere parameters in their immediate surroundings, and the entire sensor node is self-sustainable because it's powered by electricity produced by a solar panel and the sunlight. The sensor data of the wireless sensor node is accessed using a complementary iOS mobile application. Within the application, it's possible to read the current measured values and the historical values using the corresponding graphic displays. All data can be safely and quickly saved to a remote data store in the cloud within the Azure service. The development of this project enables users to monitor the quality of air in their surroundings, inform them in a timely manner if they find themselves in a dangerous environment, and collect data for further analysis and processing.

Keywords: STM32, BLE, Wireless Sensor Networks, iOS mobile application