

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 358

**SUSTAV ZA UDALJENI NADZOR U POLJOPRIVREDI
TEMELJEN NA PLATFORMI ESP32-C3 I AWS-USLUGAMA**

Jelena Gavran

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 358

**SUSTAV ZA UDALJENI NADZOR U POLJOPRIVREDI
TEMELJEN NA PLATFORMI ESP32-C3 I AWS-USLUGAMA**

Jelena Gavran

Zagreb, lipanj 2024.

Zagreb, 4. ožujka 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 358

Pristupnica: **Jelena Gavran (0036522308)**

Studij: Računarstvo

Profil: Računalno inženjerstvo

Mentor: prof. dr. sc. Hrvoje Džapo

Zadatak: **Sustav za udaljeni nadzor u poljoprivredi temeljen na platformi ESP32-C3 i AWS-uslugama**

Opis zadatka:

Upoznati se s arhitekturom i razvojnim alatima za mikrokontroler ESP32-C3. Upoznati se s AWS IoT-servisima za povezivanje s mikrokontrolerskim sustavima (AWS IoT OTA, AWS IoT Device Shadow, AWS IoT Jobs, AWS IoT Device Defender, AWS IoT Fleet Provisioning). Razviti pokazni sustav prikladan za umrežavanja senzora i aktuatora koji se koriste u poljoprivredi. Sustav treba omogućiti spajanje novih senzorskih čvorova putem WiFi-sučelja, registraciju na AWS infrastrukturu, nadogradnju programske potpore i pristup zadnje poznatom stanju čvora u slučaju privremenog gubitka veze. Odabrati skup pokaznih senzora za praćenje parametara na poljoprivrednoj površini i povezati ih u sustav tako da ih se može udaljeno pratiti. Izraditi web aplikaciju za prikaz i vizualizaciju prikupljenih podataka u stvarnom vremenu.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Ovaj je rad posvećen Marici i Perici za sve ispečene palačinke i kasnonoćne vožnje da im jednog dana ovakav pametan sustav zalijeva tikvice i lovor višnje.

SADRŽAJ

Popis slika	vi
Popis isječaka koda	vii
Popis tablica	x
1. Uvod	1
2. Opis sustava i tehničkih zahtjeva	3
2.1. Precizna poljoprivreda	3
2.2. Zahtjevi na sustav i opis predloženog rješenja	7
3. Razvojni sustav ESP32-C3-DevKitM-1	9
4. Amazon Web Services (AWS)	16
4.1. AWS IoT Fleet Provisioning	21
4.2. AWS IoT Device Shadow	25
4.3. AWS IoT Jobs	27
4.4. AWS IoT OTA	33
4.5. Ostale dostupne IoT usluge u sustavu AWS	35
5. Povezivanje razvojnog sustava i oblaka	38
5.1. Programska potpora za mikrokontroler	38
5.1.1. Dinamičko povezivanje mikrokontrolera na Wi-Fi	39
5.1.2. Registracija u sustav AWS	45
5.1.3. Očitavanje senzorskih mjerenja	50
5.1.4. Slanje očitanih podataka protokolom MQTT	53
5.1.5. Sjena uređaja	57
5.1.6. Ažuriranje softvera	62
5.2. Programska potpora za oblak	66

5.2.1.	Dinamička registracija uređaja	67
5.2.2.	Obrada i pohrana dobivenih podataka	68
5.2.3.	Sjena uređaja	75
5.2.4.	Ažuriranje softvera	78
6.	Web aplikacija	80
6.1.	Infrastruktura aplikacije	80
6.2.	Grafana	84
6.2.1.	Alarmni sustav	89
7.	Zaključak	101
	Literatura	102

POPIS SLIKA

2.1. Gubici u lancu vrijednosti poljoprivrednih proizvoda [32]	4
2.2. Blok shema sustava	8
3.1. Konfiguracija razvojnog sustava ESP32-C3-DevKitM-1 [18]	9
3.2. Blok dijagram modula ESP32-C3 [16]	10
3.3. Wi-Fi RF standardi [17]	12
3.4. Primjer scenarija Wi-Fi povezivanja u načinu rada stanice [18]	14
3.5. Primjer scenarija Wi-Fi povezivanja u načinu rada pristupne točke [18]	15
4.1. Odnos regija, zona dostupnosti i podatkovnih centara u AWS-u [5]	17
4.2. Arhitektura usluga AWS-a za IoT [4]	18
4.3. Princip rada usluge AWS IoT Core [4]	19
4.4. Komponente usluge AWS IoT Core [4]	19
4.5. Različita stanja tijekom izvršavanja posla [4]	31
5.1. Arhitektura unificiranog provizioniranja [15]	40
5.2. Obavijest nakon skeniranja QR koda	45
5.3. Odabir dostupne Wi-Fi mreže u blizini	45
5.4. Tok registracije uređaja certifikatom zahtjeva [4]	46
5.5. Razvojni sustav sa spojenom periferijom	53
5.6. Pregled RMT odašiljača [18]	58
5.7. Različite boje LED diode	62
5.8. Popis politika dodijeljenih registriranom uređaju	69
5.9. Sučelje za pregled podataka u bazi InfluxDB	72
5.10. Sučelje za pregled stanja uređaja u bazi InfluxDB	78
5.11. Popis dozvola uloge <i>OTARole</i>	79
5.12. Stanja pokrenutog jednokratnog OTA posla	79
6.1. AMI predložak i distribucija slika stroja na instance [5]	81

6.2. Mrežna povezanost balansera i aplikacijske instance	83
6.3. Prikaz stanja uređaja na Grafani u posljednjih petnaest minuta	87
6.4. Preslikavanje vrijednosti LED dioda na boje	87
6.5. Trenutno izmjerena senzorska mjerenja i temperatura kroz vrijeme	88
6.6. Vlažnost zraka i zemlje kroz vrijeme	88
6.7. Granične vrijednosti za temperaturu zraka	89
6.8. Princip rada alarmnog sustava na Grafani [26]	90
6.9. Promjena stanja alarma [26]	91
6.10. Uparivanje oznaka alarma i notifikacijskih politika [26]	92
6.11. Uparivanje notifikacijskih oznaka i točaka kontakta [26]	93
6.12. Primjer testiranja predloška nad probnim alarmom	94
6.13. Alarm za podatke koji nedostaju posljednjih deset minuta	95
6.14. Promjena stanja alarma za podatke	95
6.15. Popis notifikacijskih politika i pripadajućih oznaka	96
6.16. E-pošta o razriješenom alarmu	98
6.17. Alarm za vlažnost tla kroz vrijeme	99
6.18. Obavijest o aktivaciji alarma niske vlažnosti tla	99
6.19. Obavijest o razrješenju alarma niske vlažnosti tla	100

POPIS ISJEČAKA KODA

4.1. Odjeljak <i>parametri</i> u predlošku za registraciju	23
4.2. Odjeljak <i>resursi</i> u predlošku za registraciju	23
4.3. Teme za sjene uređaja	26
4.4. Poruke sjene uređaja	26
4.5. Primjer formata tipa <i>cron</i>	29
4.6. Teme za obavijesti o poslovima	32
4.7. Teme za obavijesti o izvođenju poslova	33
5.1. Stvaranje pristupne točke	41
5.2. Generiranje QR koda iz pristupne točke	42
5.3. Funkcija za prikaz QR koda na zaslonu	43
5.4. Inicijalizacije memorije tipa SPIFFS	47
5.5. Spajanje certifikatom zahtjeva i zahtjev za novim certifikatom	49
5.6. Kontrolni zbroj poslanih bajtova s DHT11	51
5.7. FreeRTOS zadatak za očitavanje senzorskih mjerenja i slanje podataka	52
5.8. Funkcije za pripremanje JSON objekta i njegovo slanje protokolom MQTT	54
5.9. Funkcije za sinkronizaciju vremena s SNTP poslužiteljem	56
5.10. JSON objekt za slanje na platformu	57
5.11. Upravljanje LED diodom	59
5.12. Proces ažuriranja sjene uređaja	61
5.13. Rad OTA agenta	65
5.14. Odjeljak <i>stvar</i> u predlošku za registraciju	68
5.15. SQL upit rute za podatke s uređaja	69
5.16. Podatak u bazi InfluxDB u formatu linijskog protokola	71
5.17. Lambda funkcija za slanje podataka u InfluxDB	73
5.18. SQL upit rute za sjene uređaja	75
5.19. Poruka ažurirane sjene	75
5.20. Lambda funkcija za preusmjeravanje poruka sjene uređaja	76

6.1. Pokretanje Docker slike za Grafanu	84
6.2. Upit za dohvat identifikatora uređaja	86
6.3. Upit za dohvat stanja LED diode u vremenskom okviru	87
6.4. Upit za dohvat temperature	89
6.5. Primjer predloška u programskom jeziku Go	93
6.6. Upit za alarm o nedostatku podataka	94
6.7. Predlošci za naslov i tijelo obavijesti alarma	96

POPIS TABLICA

4.1. Polja formata tipa <i>cron</i> [4]	29
4.2. Stanja izvršenja posla [4]	32
5.1. Povezivanje uređaja i LCD zaslona	42
5.2. Spajanje uređaja i modula DHT11	50
5.3. Spajanje uređaja i senzora VMA303	50
5.4. Particije na uređaju	63

1. Uvod

Internet stvari (engl. *Internet of Things* - *IoT*) brzo je rastuća tehnologija koja urbani svijet pretvara u potpuno mrežno povezani sustav visoke tehnologije. Uz sve veću popularnost, potražnju i rastuće zahtjeve na IoT tehnologiju, sustavi generiraju sve veću količinu podataka koju je gotovo nemoguće obraditi lokalno. Tom je izazovu doskočila tehnologija računarstva u oblaku (engl. *cloud computing*) koja pruža softver, alate i infrastrukturu preko interneta umjesto lokalnog upravljanja. Računanje u oblaku može pružiti skalabilnost i dostupnost potrebnu za obradu i pohranu velike količine podataka koju stvaraju IoT sustavi. Osim toga, računanje u oblaku može pomoći smanjiti troškove upravljanja IoT sustavima.

U posljednjih nekoliko godina, poljoprivreda je doživjela značajne promjene zahvaljujući integraciji naprednih tehnologija poput interneta stvari i računarstva u oblaku. Ove tehnologije omogućuju razvoj moderne poljoprivrede koja koristi različite senzore i podatke radi optimizacije proizvodnih procesa i povećanja efikasnosti. IoT u poljoprivredi omogućuje povezivanje fizičkih uređaja i senzora s internetom, čime se prikupljaju podaci o stanju na poljoprivrednim gospodarstvima, stanju usjeva i učinkovitosti rada. Računarstvo u oblaku pruža infrastrukturu za obradu i analizu tih podataka u stvarnom vremenu, što omogućuje poljoprivrednicima da donose informirane odluke i poboljšavaju svoj tijek rada.

Za razvoj poljoprivrednih IoT sustava potrebni su ugradbeni računalni sustavi s mogućnošću bežičnog povezivanja, primarno Wi-Fi komunikacije. Serija mikrokontrolera ESP32 tvrtke *Espressif* jedan je od danas najpopularnijih izbora među bežičnim uređajima zbog niske potrošnje, visoke otpornosti na temperature te najvažnije, jednostavnom bežičnom povezivosti [24]. Jedan takav integrirani sklop jest ESP32-C3 koji pruža Bluetooth i Wi-Fi povezivanje. Sklop je integriran u nekoliko modula, koji su pak dio razvojnih sustava koje proizvodi tvrtka *Espressif*. Za izradu ovog rada odabran je razvojni sustav ESP32-C3-DevKitM-1. Isto tako, usluga računarstva u oblaku mora biti jednostavna, intuitivna, pouzdana te najvažnije, skalabilna. Platforma AWS tvrtke *Amazon* ističe se kao jedan od najkorištenijih sustava za računarstvo u oblaku. Također

nudi brojne mogućnosti za umrežavanje IoT sustava. Isto tako, potrebna je i prikladna web aplikacija koja će pružiti kvalitetne vizualizacije prikupljenih podataka. Jedna takva interaktivna aplikacija jest Grafana, koja nudi široku paletu grafikona i sučelja za prikaz podataka.

Rad je podijeljen u cjeline kako slijedi. U drugom poglavlju „*Opis sustava i tehničkih zahtjeva*“ objašnjen je koncept precizne poljoprivrede kao domene izrađenog sustava te je prikazana sklopovska i programska arhitektura rješenja, kao i zahtjevi koje je trebalo ispuniti. Treće poglavlje „*Razvojni sustav ESP32-C3-DevKitM-1*“ opisuje osnovne značajke korištenog razvojnog sustava kao ciljane hardverske platforme, a zatim su opisana svojstva Wi-Fi mreže te njene značajke koje podržava razvojni sustav. U četvrtom poglavlju „*Amazon Web Services*“ opisana je korištena platforma za računarstvo u oblaku i navedene su usluge koje nudi za razvoj IoT sustava. U petom poglavlju „*Povezivanje razvojnog sustava i oblaka*“ opisana je programska potpora za mikrokontroler i periferne uređaje te dio programske potpore za računarstvo u oblaku koja služi za povezivanje i komunikaciju s ugradbenim sustavom. Također je opisana infrastruktura potrebna za pohranu podataka na platformi. U šestom poglavlju „*Web aplikacija*“ opisana je infrastruktura razvijene web aplikacije na temelju platforme Grafana. Opisan je i alarmni sustav integriran u web aplikaciju.

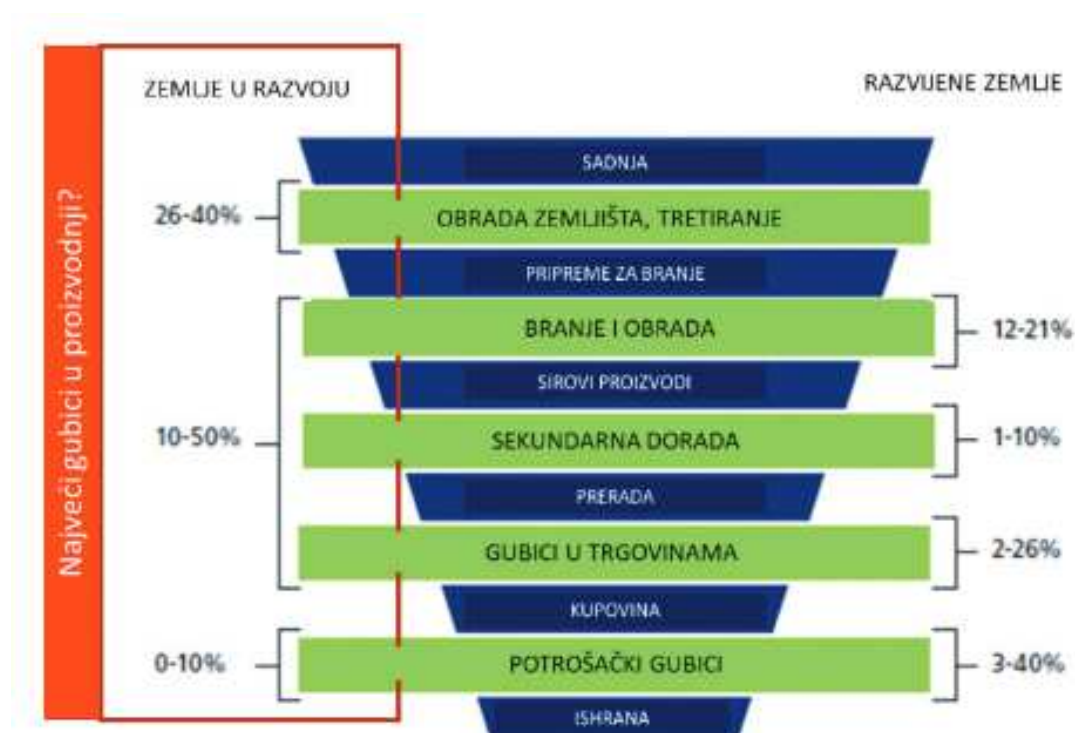
2. Opis sustava i tehničkih zahtjeva

2.1. Precizna poljoprivreda

S ubrzanim porastom svjetske populacije, užurbano raste i potražnja za hranom. Kako bi se zadovoljila sve veća potreba, poljoprivreda se postepeno razvijala tijekom desetljeća. Brza urbanizacija svijeta dovela je do toga da 55% svjetske populacije živi u urbanim područjima, uz značajan porast u Aziji i Africi. Do 2050. godine očekuje se da će 2,5 milijardi ljudi živjeti u gradovima. Ovo urbano širenje postavlja izazove za sigurnost hrane i prehranu, kao što su udaljenost između proizvodnih područja i potrošača, problemi s prijevozom, nagle promjene cijena te klimatski utjecaji. Kako bi zadovoljila sve veću potražnju za hranom, poljoprivreda mora povećati proizvodnju, ali je suočena s preprekama poput degradacije prirodnih resursa, gubitka bioraznolikosti i širenja bolesti. Poljoprivrednu produktivnost treba poboljšati kroz nove tehnologije, politike i bolje upravljanje prirodnim resursima [11].

Tradicionalnu poljoprivredu karakterizira posjedovanje vrlo malo tehničkog znanja za obradu zemlje i vrlo niska uporaba tehnologije. Ovaj način obrade poljoprivrednih površina gdje manualni rad ima glavnu ulogu donosi vrlo male prinose, primarno onima koji obrađuju zemlju. Proizvodnja ovisi o fizičkim mogućnostima poljoprivrednika, a strategije koje se koriste za obradu temelje se na tradicionalnim znanjima. Zbog niske tehnološke razine i ograničenih resursa, poljoprivrednici se za uspjeh proizvodnje oslanjaju na prirodne biološke procese i organizme koji obavljaju razne ekološke funkcije. Tradicionalne poljoprivredne prakse naglašavaju lokalizaciju, bioraznolikost, zajedničke genetske resurse i kulturno uvažavanje mnogih različitih usjeva. S druge strane, moderna poljoprivreda stavlja naglasak na proizvodnju, kapitalnu dobit, intenzitet prinosa i konzistentnost usjeva. Koristi razna tehnološka poboljšanja kako bi se postigla učinkovitija proizvodnja. Uvođenju tehnoloških inovacija u poljoprivredne procese, resursi poput vremena i novca se štede i postiže se veća količina i kvaliteta proizvodnje. Upravo visoki proizvodni kapacitet definira modernu poljoprivredu kao odgovor na rastuće potrebe ljudi i tržišta. Primjena suvremenih tehnika smanjuje ri-

zik ovisnosti o vanjskim čimbenicima poput klimatskih promjena ili radne snage [37]. Slika 2.1 prikazuje najveće gubitke u lancu vrijednosti poljoprivrednih proizvoda. Vidi se značajna razlika u gubicima između razvijenih država i država u razvoju. Zemlje u razvoju i dalje najvećim dijelom koriste principe tradicionalne poljoprivrede, dok su razvijene zemlje implementirale brojne moderne tehnologije u prehrambeni proizvodni proces. Dok se tradicionalnom poljoprivrednom ostvari u prosjeku 30% gubitaka na obradi i tretiranju zemljišta, razvijene zemlje u tom segmentu nemaju nikakav gubitak. Razlike se očituju u načinu obrade zemlje i skrbi o poljoprivrednim površinama koje su opisane ranije. Zanimljivo je primijetiti kako zemlje u razvoju gotovo i nemaju potrošačke gubitke, dok u razvijenim zemljama gubitak može doseći i 40%.



Slika 2.1: Gubici u lancu vrijednosti poljoprivrednih proizvoda [32]

Kao nusprodukt suvremene poljoprivrede pojavila se precizna poljoprivreda. Ona obuhvaća nove tehnološke odluke koje doprinose optimizaciji poljoprivredne proizvodnje. Temelji se na uporabi satelitske navigacije, računalnih tehnologija i naprednog nadzora. Njezin je temeljni cilj napredak i povećanje broja preciznih informacija u stvarnom vremenu kako bi poljoprivrednici na temelju dostupnih informacija mogli pravovremeno i prikladno donositi odluke [6]. Iako je ova grana moderne poljoprivrede započela uvođenjem tehnologija globalnog pozicijskog sustava (engl. *Global Positioning System* - *GPS*) i geografskih informacijskih sustava (engl. *Geographic information system* - *GIS*).

mation system - GIS), ovdje se također ubraja detaljno meteorološko praćenje poljoprivrednih uvjeta, poput parametara temperature, vlage zraka, količine padalina, smjera i jačine vjetra [3]. Za uspješnu primjenu precizne poljoprivrede potrebno je prikupiti precizne podatke, kvalitetno ih obraditi i primijeniti na proizvodnoj površini. Prikupljanje podataka s poljoprivrednog gospodarstva uključuje uzimanje uzoraka i analize tla, mjerenje atmosferskog stanja te prikupljanje podataka pomoću daljinske detekcije te GPS i satelitskih snimaka. Koriste se različiti senzori i uređaji s GPS ili bežičnom tehnologijom kako bi se točno odredila lokacija uređaja na parceli te precizna mjesta uzorkovanja.

Integracijom precizne poljoprivrede s naprednim softverskim rješenjima ostvaruje se pojam pametna poljoprivreda. Dok precizna poljoprivreda uzima u obzir isključivo promjene koje se odvijaju na poljoprivrednom gospodarstvu, pametna poljoprivreda koristi i kontekst okoline potaknut događajima u stvarnom vremenu [6]. Koncept pametne poljoprivrede uključuje predviđanje i učenje na podacima, kao i pojam velike količine podataka (engl. *big data*), koji se odnosi na podatke koji dolaze u sve većim količinama, većom brzinom i raznolikošću [41]. Ovaj se rad fokusira na mogućnosti koje nudi precizna poljoprivreda te mogućnost integracije platformi i uređaja koje omogućuju napredno nadziranje poljoprivrednih površina.

Precizna poljoprivreda nudi niz rješenja koja olakšavaju svakodnevni rad na gospodarstvu. Problem zahtjevnog fizičkog održavanja može se riješiti automatizacijom ručnih provjera koje će mjeriti željene parametre. Neprecizna procjena količine vode potrebna za rast usjeva otklanja se korištenjem senzora za praćenje volumetrijskog sadržaja vode u tlu. Nadalje, praćenjem klimatskih promjena korisno je za određivanje idealnih vremena za sadnju i zalijevanje, kao i za predviđanje pojave štetnika [34]. Gledano na globalnoj skali, precizna poljoprivreda može ublažiti problem porasta zahtjeva za hranom. Istraživanje koje je provelo Europski parlament [13] pokazalo je kako precizna poljoprivreda može značajno poboljšati sigurnost hrane optimizacijom prinosa usjeva i omogućavanjem sigurnih metoda u proizvodnji hrane. Nadalje, promiče održivije metode uzgoja učinkovitim korištenjem resursa, smanjenjem otpada i minimiziranjem utjecaja na okoliš. Isto tako, studija tvrdi da će usvajanje precizne poljoprivrede potaknuti značajne društvene promjene, zahtijevati nove vještine i potencijalno mijenjati tržišta rada u poljoprivrednom sektoru. Implementacija tehnologija precizne poljoprivrede također zahtijeva učenje novih vještina i prilagodbu naprednim tehnološkim alatima, što produbljuje vještine stanovništva. Studija naglašava efikasnost precizne poljoprivrede zbog koje se pojedini poljoprivredni procesi mogu u potpunosti automatizirati i tako poboljšati produktivnost te smanjiti troškove rada. Stavljen je ta-

kođer naglasak na odluke vođenim podacima (engl. *data-driven decision making*) koje su potaknute redovitim prikupljanjem i analizom podataka. Istraživanje ističe i regionalni razvoj kao posljedicu usvajanja precizne poljoprivrede jer se njome potiče regionalna samodostatnost i konkurentnost prilagođavanjem poljoprivrednih praksi specifičnim regionalnim uvjetima i resursima. U sklopu projekta „*Unapređenje proizvodnje kukuruza i sirka u uslovima stresa*“ Ministarstva znanosti Republike Srbije provedeno je istraživanje [35] koje je ispitalo koncept precizne poljoprivrede i njezine benefite. Ispitano je korištenje tehnologije promjenjivih doza aplikacije sredstva (engl. *variable rate application* - VRA) na poljoprivrednim gospodarstvima. Takva tehnologija omogućuje preciznu primjenu sjemena, gnojiva i pesticida. Dokazano je da se primjenom takve tehnologije stvaraju određene uštede. Primjerice, korištenje navigacijskih sustava pokazuje uštedu od 2,24 EUR/ha, dok primjena varijabilnih normi može smanjiti troškove za 10 do 25 EUR/ha te smanjiti korištenje dušičnog gnojiva za 10-15% bez smanjenja prinosa. Nadalje, senzori također pomažu u preciznoj aplikaciji pesticida, smanjujući količinu potrebnih kemikalija za prosječno 13%. U navodnjavanju, precizna poljoprivreda može smanjiti potrošnju vode za 25%, što značajno smanjuje troškove proizvodnje. Precizno navodnjavanje na temelju temperaturnih mapa i infracrvenih kamera dodatno poboljšava učinkovitost korištenja vode. Promjenjivo doziranje gnojenja i sjetve, temeljeno na preslikavanju parcela i analizi potrebnih elemenata, omogućuje smanjenje korištenja pesticida, sjemena i gnojiva za više od 11%, smanjujući troškove proizvodnje za 5,5%. Upotreba gnojiva može biti manja za 25%, dok se prinos može povećati za 20%, čime se postiže ekonomski učinak i održivost u proizvodnji.

U sklopu rada [6] provedena je istraživačka anketa nad mladim poljoprivrednicima u Hrvatskoj, odnosno nad poljoprivrednim djelatnicima mlađim od 40 godina. Cilj istraživanja bio je utvrditi upoznatost mladih poljoprivrednika s karakteristikama i primjenom pametne odnosno precizne poljoprivrede. Anketa je pokazala da je 72% poljoprivrednika upoznato s pojmom precizne poljoprivrede, no samo jedna četvrtina ispitanika koristi preciznu poljoprivredu na svom gospodarstvu. Najviše raznovrsnih modernih tehnologija koriste poljoprivrednici koji se bave ratarstvom. 60% ispitanika smatra da im tehnologija pomaže kod rada na gospodarstvu te se najviše koriste pametnim telefonom. Ispitivale se također uporaba tehnologije koja se odnosi na promjenjive doze aplikacije sredstva, što je pokazalo da otprilike 10% ispitanika koristi senzorske tehnologije promjenjivih doza aplikacije, primjerice prskalice. Pri upravljanju gospodarstva tehnologija se najčešće koristi za uzimanje uzoraka, i to 40% ispitanika. Isto tako, ustanovljeno je kako se razine osviještenosti ne razlikuju značajno s obzirom

na ekonomsku veličinu poljoprivrednog gospodarstva (EVPG). Nadalje, poteškoće u usvajanju informacijskih tehnologija povezuju se sa slabo dostupnim resursima, ponajprije brzini interneta. Više od 30% poljoprivrednika navodi brzinu internetske veze kao glavnu prepreku ka digitalizaciji. Zanimljivo je istaknuti da tek 3% ispitanika navodi nedostatak digitalne pismenosti kao problem, što upućuje da su mladi poljoprivrednici već korisnici modernih tehnologija.

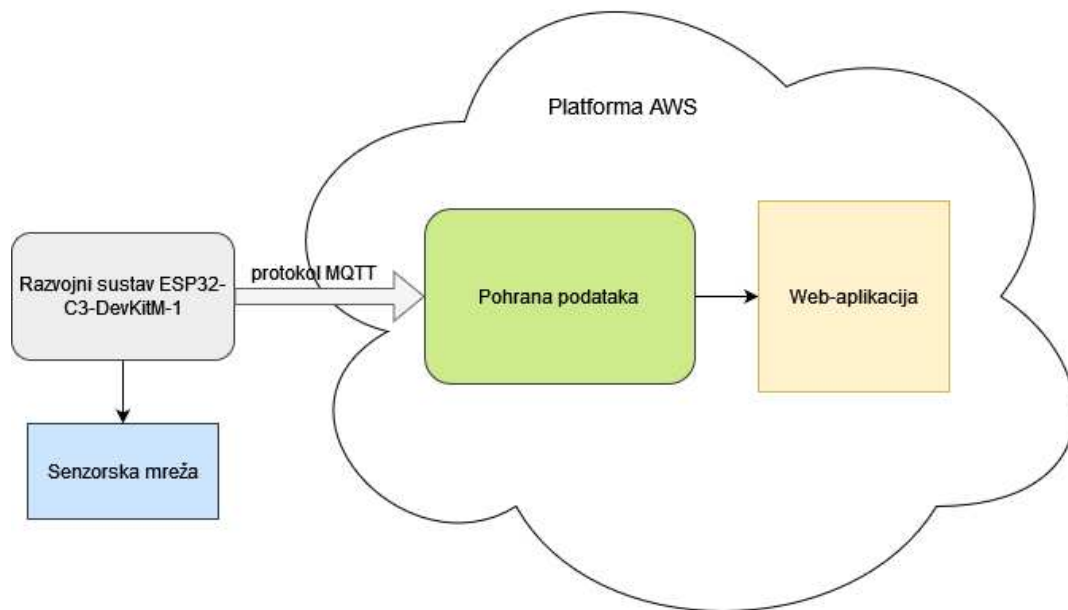
2.2. Zahtjevi na sustav i opis predloženog rješenja

U nastavku je predloženo rješenje koje uvažava problematiku održavanja poljoprivrednih površina i nudi alternativu izazovima hrvatskih poljoprivrednika. Sustav za udaljeni nadzor u poljoprivredi treba omogućiti praćenje parametara poljoprivredne površine u stvarnom vremenu. Da bi se to postiglo, potrebno je na površinu postaviti uređaj s primjerenim senzorima te omogućiti bežično slanje očitanih senzorskih mjerenja u stvarnom vremenu u računalni oblak. Sustav isto tako ne smije prekinuti rad ni pri gubitku internetske veze. Odabrana je arhitektura gdje se mikrokontrolerski razvojni sustav s priključenim senzorima koristi za mjerenje parametara, a putem ugrađene podrške za bežično povezivanje na Wi-Fi šalje podatke prema oblaku. Isto tako, odabran je računalni oblak koji nudi obradu podataka i njihovu trajnu pohranu te vizualizaciju, kao i pohranu posljednjeg poznatog stanja sustava.

Prilikom odabira razvojnog sustava potrebno je paziti da ima mogućnost bežičnog povezivanja putem Wi-Fi mreže. Također je važno odabrati prikladan skup senzora koji prate uvjete nužne za održavanje poljoprivredne površine. Za računalni oblak potrebno je odabrati platformu koja može progutati i obraditi veliku količinu podataka te ih zatim pohraniti. Veliku ulogu također ima sposobnost praćenja posljednjeg poznatog stanja sustava. Isto tako, potrebno je omogućiti jednostavno uspostavljanje komunikacije između mikrokontrolerskog razvojnog sustava i odabrane platforme. U oblaku je također bilo potrebno izraditi web aplikaciju koja mora korisniku pružiti jednostavnu vizualizaciju pohranjenih podataka. Glavna uloga aplikacije jest prikazati podatke i tako korisniku omogućiti udaljeno praćenje poljoprivrednih uvjeta kroz vrijeme.

Za potrebe ovog rada odabran je razvojni sustav ESP32-C3-DevKitM-1 jer zadovoljava postavljene zahtjeve i ima mogućnost jednostavnog razvoja programske potpore korištenjem ugrađenih biblioteka. Na razvojnom sustavu nalazi se modul ESP32-C3 koji ima ugrađeno sučelje za povezivanje putem Wi-Fi mreže. Odabrana je i senzorska mreža koja će mjeriti primjerene mikroklimatske parametre zraka i zemlje. Kao računalna platforma u oblaku odabran je sustav Amazon Web Services (AWS) jer nudi

lako skalabilnu obradu podataka, kao i baze za njihovu pohranu. Platforma također omogućava praćenje posljednjeg poznatog stanja sustava. Za web aplikaciju odabrana je višeplatformska aplikacija Grafana koja pruža različite vrste vizualizacija, čime se poboljšava korisničko iskustvo pregleda podataka. Aplikacija također podržava alarmanje korisnika o neželjenim uvjetima. Blok shema sustava prikazana je na slici 2.2. U nastavku rada opisani su svi aspekti programskog rješenja razvijeni u okviru rada, odnosno programska potpora za mikrokontrolerski sustav, kao i potpora za oblak.

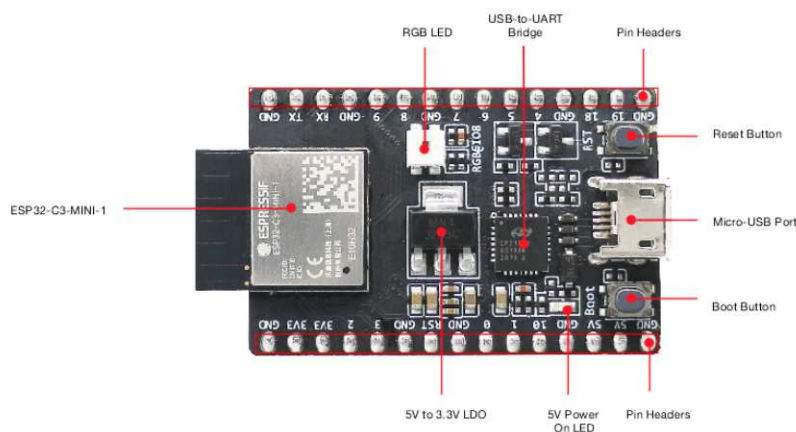


Slika 2.2: Blok shema sustava

3. Razvojni sustav

ESP32-C3-DevKitM-1

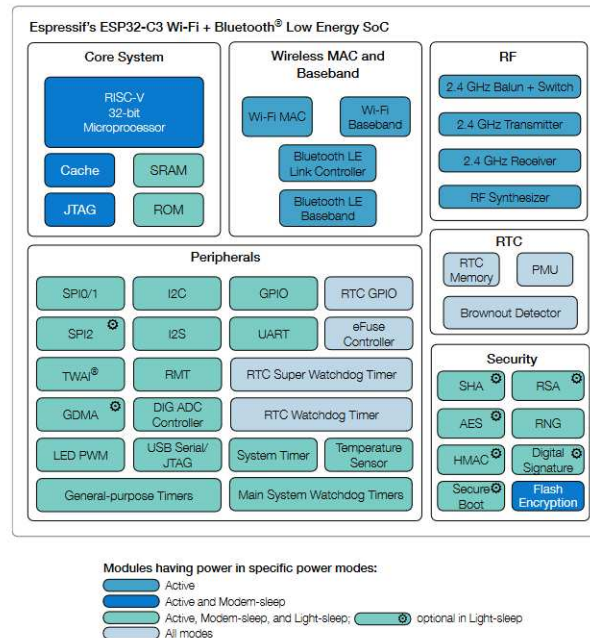
Razvojni sustav temelji se na modulu ESP32-C3-MINI-1. Modul je jedan u nizu ESP32-C3 serije SoC (engl. *System on Chip*) platformi tvrtke *Espressif*, te sadrži jedno-jezgreni 32-bitni procesor s RISC-V arhitekturom koji radi na frekvenciji do 160 MHz. Modul sadrži 400 KB memorije tipa SRAM (engl. *Static random-access memory*), od kojih je 16 KB rezervirano za priručnu memoriju (engl. *cache*), 384 KB memorije tipa ROM (engl. *Read-only memory*) te 4 MB memorije tipa *Flash*. Od periferije sadrži 22 programabilna GPIO pina (engl. *General Purpose Input Output*), te digitalna sučelja SPI, UART, I2C i I2S. Također sadrži upravljače za sučelja USB i JTAG koji se mogu koristiti za efikasnije otklanjanje pogrešaka u kodu (engl. *debugging*). Konfiguracija sustava prikazana je na slici 3.1. [16]



Slika 3.1: Konfiguracija razvojnog sustava ESP32-C3-DevKitM-1 [18]

Budući da modul ima funkciju RF (engl. *radio frequency*) primopredajnika, podržava bežično lokalno umrežavanje odnosno Wi-Fi, koji omogućava propusnost do 20 Mbps protokolom TCP te maksimalnu propusnost od 30 Mbps koristeći protokol UDP. Isto tako, podržava protokol Bluetooth s podrškom za velike udaljenosti.

Modul ESP32-C3-MINI-1 bežični je uređaj niske potrošnje energije (engl. *ultra-low-power*) primarno namijenjen razvoju aplikacija koje koriste Wi-Fi ili *Bluetooth Low Energy* (BLE) protokol. Na slici 3.2 nalazi se blok shema modula sa svim dostupnim značajkama.



Slika 3.2: Blok dijagram modula ESP32-C3 [16]

IEEE 802.11, skupina standarda za bežične lokalne mreže (engl. *WLANs*) [40], nudi nekoliko različitih načina bežične modulacije signala. Pojedini standardi označeni su slovima abecede. Za korisničke mreže postoje dva frekvencijska pojasa: 2,4 GHz i 5 GHz.

Prednosti pojasa od 2,4 GHz su veći doseg, bolje prolaženje kroz fizičke prepreke te bolja podrška jer više bežičnih uređaja koristi pojas od 2,4 GHz nego od 5 GHz. S druge strane, ovaj pojas ima manju propusnost i nudi manje kanala koji se ne preklapaju. Isto tako, može doći do zagušenja mreže jer kućni i Bluetooth uređaji koriste ovaj isti mrežni pojas.

Pojas od 5 GHz nudi brži protok, manje zagušenih kanala te ima više kanala koji se međusobno ne preklapaju. Ipak, ima kraći raspon u usporedbi s mrežama od 2,4 GHz jer teže prolazi kroz prepreke. [28]

U nastavku su opisani ključni standardi Wi-Fi tehnologije [9]:

- 802.11b - najsporiji i najjeftiniji standard, emitira u frekvencijskom pojasu od 2,4 GHz. Može prenijeti do 11 Mbps te koristi komplementarno šifriranje (engl. *complementary code keying* - *CCK*) radi poboljšanja brzine prijenosa.

- 802.11a - transmitira u pojasu od 5 GHz i može prenijeti do 54 Mbps. Koristi ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje (engl. *orthogonal frequency-division multiplexing - OFDM*), što je efikasnija tehnika u odnosu na CCK koja dijeli radio signal u nekoliko podsignala prije slanja primatelju. Ova metoda značajno umanjuje interferenciju.
- 802.11g - poput standarda 802.11b, koristi frekvencijski pojas od 2,4 GHz. Međutim, može prenijeti do 54 Mbps jer koristi tehniku OFDM.
- 802.11n - kompatibilan je standard sa prethodno opisanim standardima. Nudi znatno poboljšanje u rasponu i brzini u odnosu na svoje prethodnike. Ovaj standard može prenijeti do četiri toka podataka, svaki maksimalno 150 Mbps, no većina usmjerivača (engl. *router*) dopušta dva ili tri toka.
- 802.11ac - radi isključivo u pojasu od 5 GHz, te je kompatibilan s prethodnim standardima. Manje je sklon interferenciji i brži je od prethodnih standarda s maksimalnim prijenosom od 450 Mbps jednim tokom.
- 802.11ax - najnoviji standard koji proširuje nekoliko ključnih mogućnosti svojih prethodnika. Usmjerivači koji podržavaju ovaj standard dopuštaju tok podataka do 9.2 Gbps, što je značajan porast u usporedbi s prethodnicima. Isto tako, moguće je postaviti više antena na jedan usmjerivač, čime je omogućen prihvrat više veza odjednom bez usporavanja i interferencije.

Podsustav modula ESP32-C3 za Wi-Fi u skladu je sa standardom IEEE 802.111 te koristi nelicencirani pojas frekvencija od 2,4 GHz. U tom pojasu podržava propusnost od 20 i 40 MHz. Modul također podržava tehniku raznolikosti antena (engl. *antenna diversity*) za poboljšanje prijema i pouzdanosti signala korištenjem RF komutatora (engl. *switch*). Tim komutatorom upravljaju GPIO priključci i koristi se za odabir najbolje antene u kontekstu pouzdanosti i kvalitete signala. [17]

ESP32-C3 u potpunosti implementira protokol Wi-Fi na temelju standarda 802.11 b/g/n. Podržava osnovni skup (engl. *Basic Service Set - BSS*) operacija za značajke pristupne točke (engl. *software enabled access point - SoftAP*). Ovakve pristupne točke koriste softver kako bi omogućile uređajima kojima primarna svrha nije usmjeravanje prometa da postanu virtualni usmjerivač. [29] Također, upravljanje napajanjem odvija se automatski s minimalnom intervencijom domaćina kako bi se smanjila aktivnost uređaja.

Tvrtka *Espressif* također nudi biblioteke za povezivanje putem protokola TCP i IP te korištenje Wi-Fi *mesh* tehnologije. Pruža i podršku za protokole TLS 1.0, 1.1 i 1.2. Na slici 3.3 prikazani su Wi-Fi RF standardi koje koristi modul.

Name		Description
Center frequency range of operating channel ¹		2412 ~ 2484 MHz
Wi-Fi wireless standard		IEEE 802.11b/g/n
Data rate	20 MHz	11b: 1, 2, 5.5 and 11 Mbps 11g: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps 11n: MCS0-7, 72.2 Mbps (Max)
	40 MHz	11n: MCS0-7, 150 Mbps (Max)
Antenna type		PCB antenna and external antenna connector

Slika 3.3: Wi-Fi RF standardi [17]

ESP32 nudi nekoliko načina rada pri korištenju Wi-Fi tehnologije [43]:

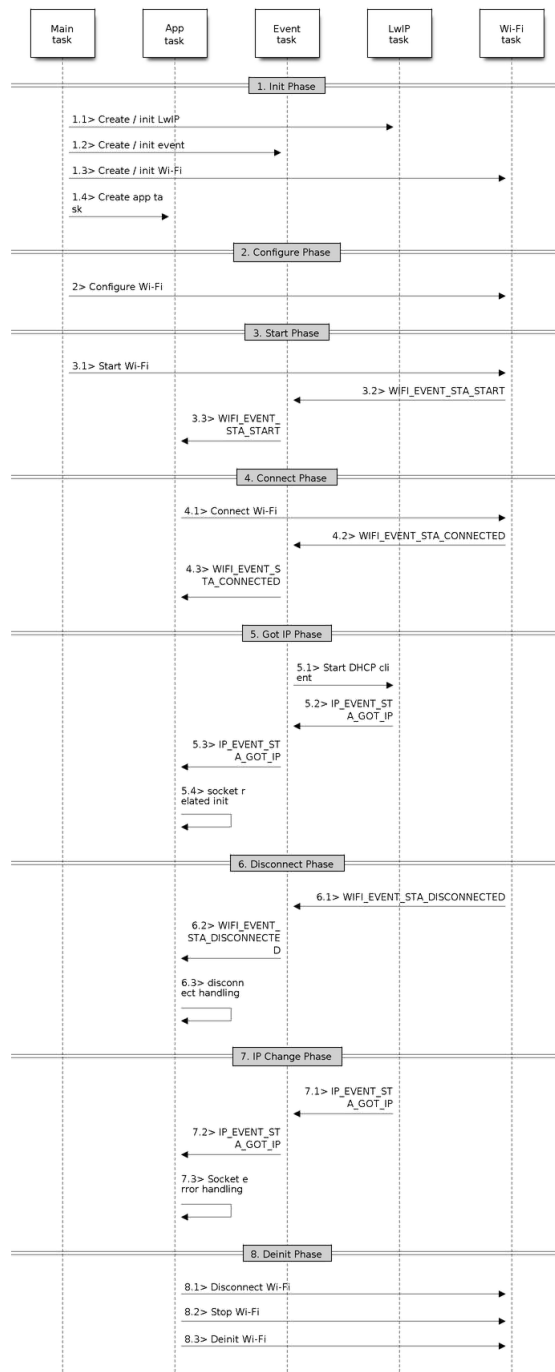
1. način rada stanice (engl. *station mode*) - ESP32 spaja se na točku pristupa,
2. način rada pristupne točke (engl. *SoftAP mode*) - druge se stanice spajaju na ESP32,
3. miješani - ESP32 radi kao stanica i pristupna točka spojena na drugu pristupnu točku.

U nastavku su opisani scenariji Wi-Fi povezivanja modula ESP32-C3 u načinu rada stanice i pristupne točke.

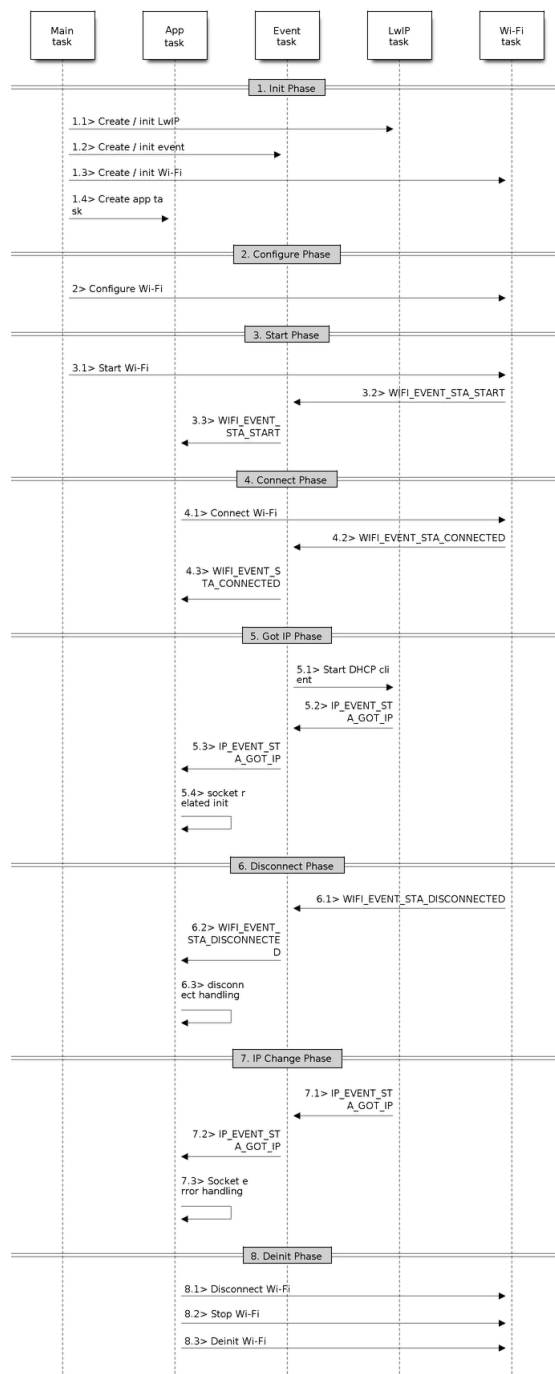
Na slici 3.4 prikazan je sekvencijski dijagram zadataka koje ESP32 obavlja u cijelom ciklusu spajanja i komunikacije s pristupnom točkom. Iz slike je vidljivo da se ciklus sastoji od osam faza. Prva faza služi za inicijalizaciju upravljačkih programa i pokretanje zadataka odnosno dretvi koje će obavljati zadatke vezane uz svoju dužnost. Glavni zadatak pokreće četiri različite dretve izvršavanja: aplikacijski zadatak, zadatak za događaje, zadatak za IP protokol, te zadatak za Wi-Fi. U drugoj fazi konfigurira se upravljački program za Wi-Fi. U sljedećoj se fazi pokreće upravljački program, nakon koje slijedi faza pretraživanja mreže i povezivanja na usmjerivač ili pristupnu točku. Nakon inicijalizacije DHCP klijenta, započinje faza dohvata IP adrese. Šesta faza odvija se nakon prekida Wi-Fi veze, čime se također uklanjaju i sve UDP i TCP konekcije. U aplikaciji se može omogućiti radno čekanje na ponovno uspostavljanje veze. Sedma faza pokreće se pri detekciji promjene IP adrese. Posljednja faza služi za programsko odspajanje s mreže i zaustavljanje upravljačkog programa za Wi-Fi.

Slika 3.5 modelira slučaj u kojem ESP32 ima ulogu pristupne točke. Scenarij je vrlo sličan ranije opisanom slijedu događaja, no razlikuje se u dvije faze i događajima koji su pohranjeni u sustavu. Ovaj način rada nema fazu detekcije promjene IP adrese, jer je u ovom načinu ESP32 upravo taj uređaj čija se IP adresa može promijeniti. Isto tako, ne postoji faza dohvata IP adrese.

U modulu ESP32 stavljen je veliki naglasak na mehanizme uštede energije, što se također preslikava na korištenje Wi-Fi veze. Modul pruža načine uštede energije i pri radu kao stanica i pristupna točka, no neke značajke nisu podržane u pristupnoj točki. Modul pri neaktivnosti može otići u stanje mirovanja (engl. *sleep mode*). Postoje dva načina uštede energije u načinu rada stanice: minimalna i maksimalna ušteda. Pri minimalnoj uštedi stanica se budi iz stanja mirovanja nakon svakog DTIM intervala (engl. *Delivery Traffic Indication Message*). Ovim se načinom ne gube globalno emitirane poruke (engl. *broadcast*) jer se one prenose nakon DTIM intervala. Međutim, ova metoda ne štedi puno energije ako je pristupna točka na koju je spojen modul postavila malen interval. Pri maksimalnoj uštedi moguće je znatno produžiti vrijeme mirovanja u odnosu na DTIM interval, no ovime se riskira gubitak globalno emitiranih poruka.



Slika 3.4: Primjer scenarija Wi-Fi povezivanja u načinu rada stanice [18]



Slika 3.5: Primjer scenarija Wi-Fi povezivanja u načinu rada pristupne točke [18]

4. Amazon Web Services (AWS)

Amazon usluge za web (engl. *Amazon Web Services* - AWS) sveobuhvatna je platforma za računarstvo u oblaku koju pruža tvrtka *Amazon* te sadrži brojne usluge u oblaku, uključujući infrastrukturu (engl. *Infrastructure as a Service* - IaaS), platformu (engl. *Platform as a Service* - PaaS) i softver (engl. *Software as a Service* - SaaS). AWS usluge nude organizacijske alate kao što su računalna snaga, baza podataka i usluge isporuke sadržaja [33].

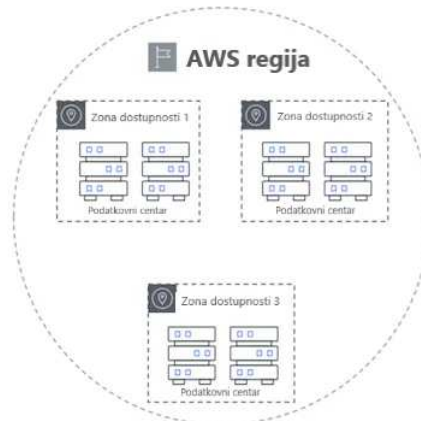
AWS je podijeljen u više različitih usluga koje se mogu pojedinačno konfigurirati na temelju korisničkih potreba. Neke od usluga koje nudi AWS su: pohrana, baze podataka, monitoriranje, sigurnost, analitika, umjetna inteligencija te razvoj mobilnih aplikacija.

AWS pruža usluge iz mnogo podatkovnih centara (engl. *data center* - DC) koji su raspodijeljeni po zonama dostupnosti (engl. *availability zone* - AZ) diljem regija cijelog svijeta. Jedna regija obuhvaća nekoliko fizički bliskih zona povezanih mrežom niske latencije. Geografskom raspodijeljenošću AWS pruža višestruke prednosti [1]:

1. niska latencija: budući da su regije skupovi fizičkih mrežno povezanih bliskih zona, korisnički podaci i aplikacije mogu biti smješteni bliže krajnjim korisnicima što poboljšava performanse aplikacija,
2. visoka dostupnost: u slučaju kvara podatkovnog centra, korištenjem više zona dostupnosti unutar regije podaci mogu i dalje ostati dostupni,
3. otpornost i oporavak od katastrofe: podaci i aplikacije mogu se replicirati između više zona ili regija, što omogućava brzi oporavak u slučaju prirodnih katastrofa, tehničkih problema ili napada,
4. skalabilnost: klijenti mogu dinamički povećavati ili smanjivati resurse u različitim regijama ovisno o potražnji,
5. poboljšana sigurnost: fizički odvojeni podatkovni centri smanjuju rizik od pojedinačnih točaka neuspjeha i omogućavaju implementaciju složenijih sigurnosnih

strategija.

Slika 4.1 prikazuje odnos regija, zona dostupnosti i podatkovnih centara unutar platforme AWS. Kao što je opisano, svaka regija ima više zona dostupnosti, i isto tako svaka zona ima nekoliko podatkovnih centara među kojima su podaci replicirani.



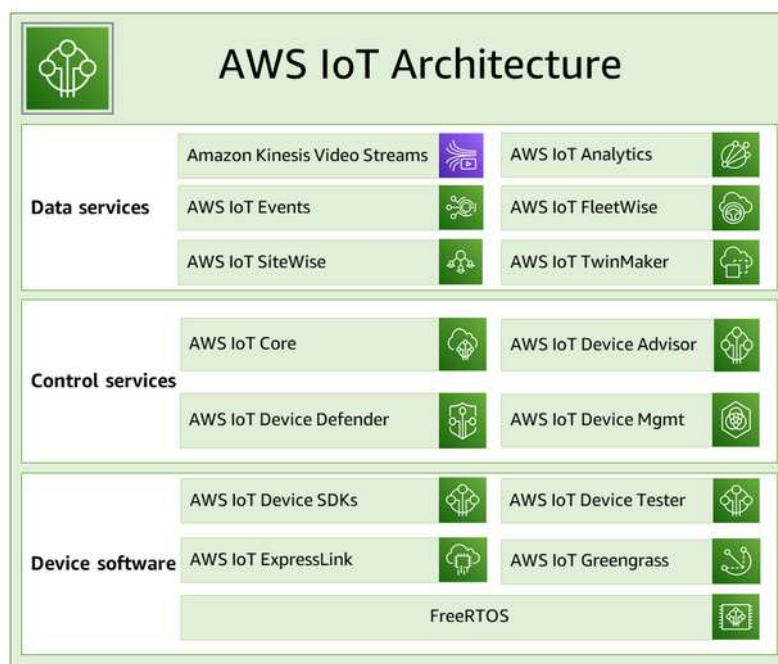
Slika 4.1: Odnos regija, zona dostupnosti i podatkovnih centara u AWS-u [5]

Također, nude se brojne mogućnosti za razvojne inženjere u sklopu AWS-a. Nudi alate naredbenog retka (engl. *command-line tools*), kao i pakete za razvoj programa (engl. *Software Development Kit - SDK*) za puštanje aplikacija u produkciju (engl. *deployment*) i upravljanje vlastitim uslugama i aplikacijama. Paketi za razvoj programa dostupni su u raznim programskim jezicima, uključujući programske jezike C++, Android, iOS, Java, Node.js, Python i Ruby.

AWS isto tako nudi brojne usluge za razvoj IoT sustava. Usluga AWS-a za IoT pruža platformu za upravljanje IoT uređajima te obradu podataka i njihovu pohranu na druge AWS usluge, poput baze podataka. AWS IoT pruža usluge u oblaku koje povezuju IoT uređaje s drugim uređajima i uslugama AWS-a u oblaku. Također pruža softver za uređaje, poput paketa za razvoj programa, za jednostavniju integraciju s uslugama AWS-a za IoT. Na slici 4.2 nalazi se prikaz arhitekture usluga koje AWS nudi za razvoj IoT sustava.

AWS podržava sljedeće komunikacijske protokole za IoT sustave:

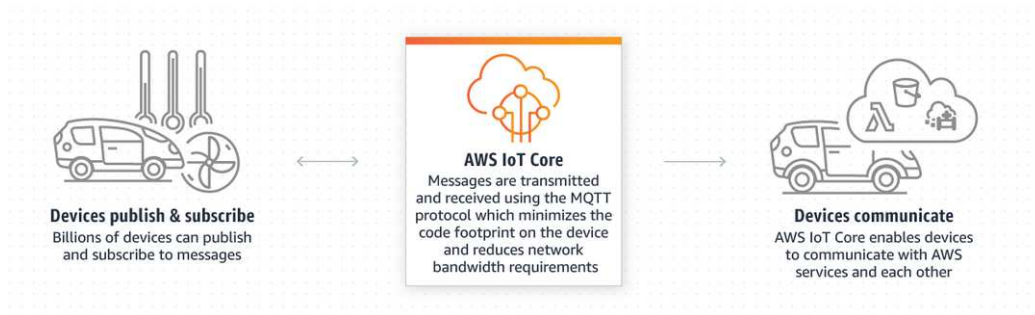
- MQTT (engl. *Message Queuing Telemetry Transport*),
- HTTPS,
- LoRaWAN (engl. *Long Range Wide Area Network*),
- TLS.



Slika 4.2: Arhitektura usluga AWS-a za IoT [4]

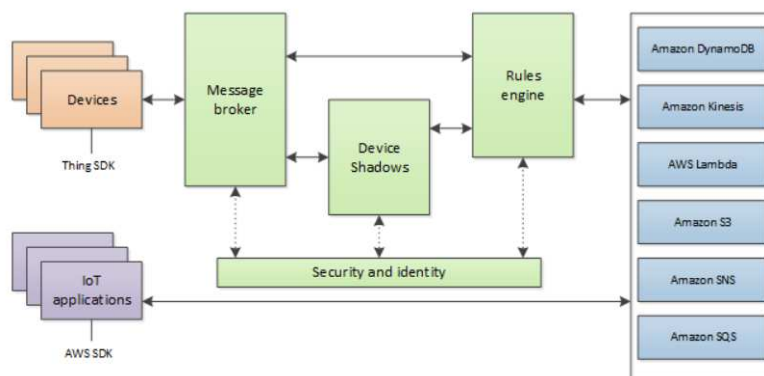
AWS IoT Core ključna je komponenta za integraciju oblaka i fizičkih uređaja. Omogućava povezivanje uređaja i preusmjeravanje poruka na usluge AWS-a. Koristi MQTT koji je standardni protokol za razmjenu poruka u IoT sustavima. To je lagan (engl. *lightweight*) protokol za prijenos poruka temeljen na objavi/pretplati sustavu u kojoj glavnu ulogu ima broker kao posrednik, te je pogodan za povezivanje udaljenih uređaja uz minimalnu potrošnju [31]. AWS IoT Core pruža paletu značajki za razmjenu poruka temeljenih na protokolu MQTT, koje pomažu pri izradi prilagodljive i skalabilne IoT arhitekture [4]. Komponenta također ima ugrađenu podršku za upravljanje MQTT brokerom koji podržava trajne, uvijek uključene veze, napredna pravila zadržavanja poruka te obrađuje više uređaja i tema istovremeno. Isto tako, AWS IoT Core podržava najnoviji standard MQTT 5 i kompatibilan je s prethodnim standardom MQTT 3, što omogućuje učinkovito upravljanje heterogenim implementacijama s mnoštvom specifikacija. Nadalje, komponenta omogućava višestruke metode provjere autentičnosti i pristupne politike za zaštitu rješenja od ranjivosti. Štoviše, koristeći pomoć drugih usluga u sklopu platforme kao što je AWS IoT Core Device Advisor, moguće je pristupiti unaprijed izgrađenim paketima testova za provjeru MQTT funkcionalnosti uređaja tijekom faze razvoja. Na slici 4.3 nalazi se pregled rada usluge AWS IoT Core.

AWS IoT Core pruža usluge koje povezuju oblak AWS-a s IoT uređajima kako bi se ostale usluge u oblaku i aplikacije mogle međusobno komunicirati s tim uređajima.



Slika 4.3: Princip rada usluge AWS IoT Core [4]

Na slici 4.4 nalaze se svi segmenti usluge AWS IoT Core te kako oni komuniciraju s vanjskim dijelovima. Zelenom bojom označena je sama usluga, narančastom bojom fizički uređaji odnosno stvari (engl. *Things*), sivom bojom druge IoT aplikacije unutar AWS-a koje se mogu izravno spojiti na sustave u AWS-u, dok su plavom bojom označene ostale usluge odnosno sustavi koji se nalaze u ekosustavu AWS.



Slika 4.4: Komponente usluge AWS IoT Core [4]

U nastavku su ukratko opisane ključne usluge koje pokriva AWS IoT Core [4].

Usluge za slanje poruka

AWS IoT Core usluge za povezivanje pružaju sigurnu komunikaciju s IoT uređajima i upravlja porukama koje prolaze između uređaja i oblaka.

Prilazni uređaj omogućuje uređajima sigurnu i efikasnu komunikaciju sa sustavom AWS. Komunikacija je osigurana sigurnosnim protokolima koji koriste X.509 certifikate.

Broker za poruke pruža mehanizam uređajima i aplikacijama slanje i primanje poruka. Moguće je koristiti protokol MQTT ili direktno *WebSocket* za objavu i pretplatu

na teme. Uređaji i klijenti koriste sučelje HTTP za objavu poruka brokeru. Broker zatim distribuira podatke na uređaje koji su se pretplatili na određene teme kao i na druge AWS aplikacije te usluge koje prate teme na brokeru.

AWS IoT Core za protokol LoRaWAN omogućava postavljanje privatne LoRaWAN mreže tako što poveže LoRaWAN te prilazne uređaje na AWS bez potrebe za razvojem mrežnog servera za LoRaWAN (engl. *LoRaWAN Network Server - LNS*). Poruke primljene od LoRaWAN uređaja šalju se na stroj za pravila (engl. *rules engine*) gdje se formatiraju i prosljeđuju ostalim AWS uslugama.

Stroj za pravila (engl. *rules engine*) povezuje podatke iz brokera s drugim AWS IoT uslugama za pohranu i dodatnu obradu. Primjerice, moguće je umetati ili pretraživati po podatkovnim tablicama ili pozvati određene definirane funkcije na temelju izraza definiranog u stroju. Isto tako, moguće je obraditi te podatke i proslijediti novostvoreni format poruka drugim uslugama ili bazama podataka.

Upravljačke usluge

Upravljačke usluge AWS IoT Core komponente pružaju sigurnost uređaja te značajke za upravljanje i registraciju novih uređaja.

Moguće je definirati vlastite autorizatore radi upravljanja autentifikacijskim i autorizacijskim strategijama koristeći vlastiti servis za autentifikaciju i funkcije za računanje Lambda koje nudi AWS. Lambda je računalna usluga za slučajeve i aplikacije dinamičke skalabilnosti. Pokreće kod na infrastrukturi visoke dostupnosti i obavlja cjelokupnu administraciju računalnih resursa, uključujući održavanje poslužitelja i operativnog sustava, osiguravanje kapaciteta i automatsko skaliranje ovisno o trenutnim potrebama sustava. Lambda funkcije korisne su za obradu datoteka, tokova te HTTP zahtjeva. Funkcije su pogodne za obradu podataka prije preusmjeravanja na drugu funkciju ili pohranu.

Usluga za registraciju uređaja u sustav (engl. *provisioning*) omogućava konfiguriranje i prijavu uređaja u AWS koristeći predložak koji opisuje resurse potrebne uređaju: stvar, certifikat i nekoliko politika. Stvar (engl. *thing*) je unos u registar koji sadrži attribute opisa uređaja. Uređaji koriste certifikate za autentifikaciju sa sustavom AWS. Politike određuju koje operacije uređaj može izvršiti. Svaka politika ima definirani dokument s izjavom koja se sastoji od učinka, akcije i resursa nad kojim se akcija izvršava. Učinak može biti *Dopusti* ili *Uskrati*, akcija se odnosi nad radnje s MQTT brokerom i poslovima, a resurs se odnosi na regiju i račun u kojem politika vrijedi.

Isto tako, moguće je definirati grupe za lakšu kategorizaciju i upravljanje uređa-

jima. Grupe također mogu imati podgrupe, i tako graditi hijerarhiju grupa. Sve akcije izvršene na roditeljima propagiraju se do najdubljih podgrupa. Dozvole dodijeljene grupi primjenjuju se na sve uređaje u toj grupi i svim njihovim podgrupama.

Usluga za poslove (engl. *jobs*) omogućava definiranje udaljenih operacija koje se pošalju i izvrše na fizičkim uređajima spojenih u oblak. Posao se može odnositi preuzimanje i instalaciju aplikacija, ažuriranje sustava, ponovno pokretanje, obnova certifikata i slično.

Usluga za sigurnost i identitet pruža dijeljenu odgovornost za sigurnost unutar AWS oblaka. Fizički uređaji moraju držati vjerodajnice na sigurnom kako bi se podaci mogli slati brokeru na siguran način. Značajke za sigurnost koriste i stroj za pravila kao i broker za poruke radi sigurnog prijenosa podataka drugim uslugama unutar AWS ekosustava.

Usluge za uređaje

AWS IoT Core osigurava pouzdano aplikacijsko iskustvo iako uređaji nisu uvijek povezani.

Sjena uređaja (engl. *Device Shadow*) dokument je u JSON formatu koji se koristi za pohranu i dohvat trenutnog stanja i informacija o uređaju. AWS nudi uslugu koja održava stanje uređaja (engl. *Device Shadow service*) kako bi aplikacije mogle komunicirati s uređajem bez obzira je li uređaj na mreži ili ne. Kada uređaj nije priključen na mrežu, usluga sjene uređaja upravlja podacima za povezane uređaje. Kada se uređaj ponovno spoji na mrežu, sinkronizira stanje sa sjenom uređaja koja se nalazi u oblaku. Uređaji također mogu objavi svoje stanje usluzi u bilo kojem trenutku kako bi bilo na raspolaganju drugim aplikacijama i uređajima.

4.1. AWS IoT Fleet Provisioning

Kao što je ranije navedeno, AWS nudi uslugu registracije uređaja u sustav čime uređaj dobiva pristup ostalim uslugama unutar platforme, poput povezivanja na MQTT broker. Moguće je dinamički registrirati više uređaja pomoću privremenih ili trajnih certifikata, što se naziva provizioniranje flote (engl. *fleet provisioning*). Pomoću ove usluge AWS generira i sigurno dostavi certifikate te privatne ključeve na uređaje pri prvom povezivanju na platformu. AWS izdaje klijentske certifikate koji su potpisani certifikacijskim tijelom tvrtke Amazon (engl. *Certificate Authority - CA*) [4].

Tri su ključna koraka pri omogućavanju registracije više uređaja u sustav:

1. određivanje načina registracije,
2. definiranje upravljačke strukture nad uređajima,
3. kreiranje predloška za registraciju.

Određivanje načina registracije u sustav povezano je s odabirom vrste certificiranja koja će se koristiti. Uređaji trebaju jedinstveni certifikat za povezivanje s platformom AWS i korištenje njenih usluga. Postoje tri metode certificiranja uređaja te odabir ovisi o mogućnostima proizvodnje uređaja i ovlastima samih korisnika:

- registracija uređaja vlastitim jedinstvenim certifikatima,
- registracija od strane korisnika od povjerenja,
- registracija certifikatom zahtjeva.

Registracija uređaja vlastitim jedinstvenim certifikatima podrazumijeva postojanje verificiranih certifikata na samom uređaju pri prvom povezivanju u sustav. Ovaj se način još naziva i pravodobno provizioniranje (engl. *just-in-time provisioning*). Problem s ovim pristupom jest što instalacija certifikata nije uvijek moguća prije dostave uređaja korisniku. Isto tako, čak iako je instalacija certifikata moguća, nije uvijek moguće instalirati certifikate sigurno na uređaj, stoga je potrebno koristiti alternativne metode.

U slučaju kada rana certifikacija uređaja nije moguća, autorizirani ili krajnji korisnici (engl. *trusted users*) mogu uz pomoć aplikacije registrirati uređaje prije njihova spajanja na platformu. Ovdje je potrebno korisnicima pružiti aplikaciju kojom bi konfigurirali uređaj prilikom instalacije, te *firmware* uređaja mora podržavati ovaj način registracije.

Treća opcija jest registracija pomoću certifikata zahtjeva (engl. *claim certificate*). Certifikati zahtjeva privremeni su certifikati koji se mogu instalirati na više uređaja, te se pri prvoj registraciji u sustav zamijene s novim, jedinstvenim certifikatom. Ova metoda zahtjeva dodatne sigurnosne provjere zbog mogućnosti curenja privremenih certifikata zahtjeva jer više uređaja dijeli isti certifikat, no prijetnja se može ublažiti redovitim rotiranjem privremenih certifikata te kreiranjem više certifikata zahtjeva koji se mogu koristiti. Isto tako, privremenim certifikatima potrebno je dodijeliti minimalan skup dozvoljenih radnji potrebnih za registraciju uređaja. Dodatna sigurnosna provjera može se izvršiti i u obliku Lambda funkcije dodatnom provjerom primljenih parametara s uređaja.

Upravljačka struktura nad uređajima je važna radi lakše organizacije uređaja u samom sustavu. Povezani uređaji predstavljeni su u platformi kao stvari tj. resursi koji se mogu organizirati i održavati. Osim ranije spomenutih stvari i grupa stvari, moguće

je uređajima dodijeliti atribute po kojima se može pretraživati. Atributi se isto tako mogu dinamički dodijeliti na temelju podataka s uređaja prilikom njegove registracije. Oni se definiraju u predlošku za registraciju.

Predložak za registraciju dokument je u formatu JSON koji opisuje resurse, politike i dozvole koje je potrebno dodijeliti uređaju kada je registriran. Odjeljak *parametri* u predlošku definira resurse u odjeljku *resursi* koje uređaj mora koristiti pri interakciji s platformom. Svaki parametar definira naziv, vrstu i zadanu vrijednost koja nije obavezna. Zadana vrijednost koristi se kada rječnik proslijeđen s predloškom ne sadrži vrijednost za parametar. Odjeljak *parametri* izgleda na sljedeći način:

```
{
  "Parameters" : {
    "ThingName" : {
      "Type" : "String"
    },
    "SerialNumber" : {
      "Type" : "String"
    },
    "Location" : {
      "Type" : "String",
      "Default" : "HR"
    },
    "CSR" : {
      "Type" : "String"
    }
  }
}
```

Isječak koda 4.1: Odjeljak *parametri* u predlošku za registraciju

Odjeljak *resursi* u predlošku definira resurse koji su potrebni uređaju za daljnji rad i komunikaciju sa sustavom: stvar, certifikat, jedna ili više politika. Svaki resurs specificira naziv, vrstu i skup svojstava. Vrsta resursa može biti jedna od tri vrijednosti: `AWS::IoT::Thing`, `AWS::IoT::Certificate`, te `AWS::IoT::Policy`. Resursi tipa certifikat imaju posebna svojstva koja ih definiraju, ovisno o tome koja je metoda registracije uređaja odabrana. Politike su vezane za već postojeće politike u sustavu AWS. Odjeljak *resursi* može izgledati na sljedeći način:

```
{
  "Resources" : {
```

```

"thing" : {
  "Type" : "AWS::IoT::Thing",
  "Properties" : {
    "ThingName" : {"Ref" : "ThingName"},
    "AttributePayload" : { "version" : "v1", "serialNumber
" : {"Ref" : "SerialNumber"}},
    "ThingTypeName" : "lightBulb-versionA",
    "ThingGroups" : ["v1-lightbulbs", {"Ref" : "Location"}
  ]
},
  "OverrideSettings" : {
    "AttributePayload" : "MERGE",
    "ThingTypeName" : "REPLACE",
    "ThingGroups" : "DO_NOTHING"
  }
},
"certificate" : {
  "Type" : "AWS::IoT::Certificate",
  "Properties" : {
    "CertificateSigningRequest": {"Ref" : "CSR"},
    "Status" : "ACTIVE"
  }
},
"policy" : {
  "Type" : "AWS::IoT::Policy",
  "Properties" : {
    "PolicyDocument" : "{ \"Version\": \"2012-10-17\", \"
Statement\": [{ \"Effect\": \"Allow\", \"Action\": [\"iot:
Publish\", \"Resource\": [\"arn:aws:iot:us-east-1:
123456789012:topic/foo/bar\" ] } ] }"
  }
}
}
}

```

Isječak koda 4.2: Odjeljak *resursi* u predlošku za registraciju

Valja napomenuti kako je moguće u korisničkom sučelju platforme odabrati sve parametre, te kreiranje vlastitog dokumenta u JSON formatu nije potrebno, nego se

automatski generira iz korisničkog odabira u sučelju.

4.2. AWS IoT Device Shadow

Usluga sjene uređaja (engl. *Device Shadow*) omogućava održavanje trenutnog stanja uređaja, čak i kada su uređaji privremeno nedostupni. AWS nudi uslugu koja održava stanje uređaja kako bi aplikacije mogle komunicirati s uređajem bez obzira je li uređaj na mreži ili ne. Kada uređaj nije priključen na mrežu, usluga sjene uređaja upravlja podacima za povezane uređaje. Kada se uređaj ponovno spoji na mrežu, sinkronizira stanje sa sjenom uređaja koja se nalazi u oblaku. Uređaji također mogu objaviti svoje stanje usluzi u bilo kojem trenutku kako bi bilo na raspolaganju drugim aplikacijama i uređajima. Ova funkcionalnost ključna je za slučajeve u kojima uređaji nemaju konstantnu povezanost na mrežu ili rade u udaljenim ili nepouzdanim mrežnim uvjetima.

Stvari (engl. *things*) u platformi nemaju nikakvu sjenu dok se eksplicitno ne kreiraju. Sjene se mogu stvarati, ažurirati i brisati pomoću sučelja, no i sami uređaji protokolom MQTT mogu slati poruke na rezervirane teme te tako mijenjati vlastitu sjenu. Budući da AWS pohranjuje sjene u oblaku, podaci o stanju uređaja mogu se slati drugim aplikacijama i uslugama u oblaku bez obzira je li uređaj povezan ili ne. Dok su uređaji, aplikacije i druge usluge u oblaku povezane s AWS IoT, mogu pristupiti trenutnom stanju uređaja i kontrolirati ga putem njegovih sjena. Traženjem promjene stanja na uređaju ažuriranjem sjene, AWS objavljuje poruku koja označava promjenu na uređaju, čime signalizira uređaju da ažurira svoje stanje sukladno zatraženom i objavljuje poruku s ažuriranim stanjem. Ukoliko dođe do pucanja internetske mreže na uređaju, pri ponovnom spajanju uređaj dohvaća novo stanje te interno ažurira dosadašnje.

Usluga podržava imenovane i neimenovane, odnosno klasične, sjene. Stvar može imati više imenovanih, no najviše jednu klasičnu sjenu. Također može imati rezerviranu imenovanu sjenu koja radi slično kao i imenovana sjena, no nema mogućnost promjene imena. Pomoću imenovanih sjena moguće je stvoriti različite poglede na stanje uređaja odnosno stvari. Primjerice, stvar s puno parametara ili svojstava može se podijeliti u sjene s logičkim skupinama parametara, a svaka sjena ima naziv prikladan skupini svojstava. Istom se metodom može ograničiti pristup pojedinim svojstvima uređaja tako što samo određene aplikacije imaju pristup imenovanoj sjeni, dok druge nemaju. Pristup imenovanim i neimenovanim sjenama razlikuje se u MQTT temi pomoću koje AWS i uređaj komuniciraju. Sljedeći programski isječak navodi obje teme vezane za sjenu uređaja. Prva je tema za neimenovanu, a druga za imenovanu sjenu uređaja.

```
$aws/things/{thingName}/shadow
$aws/things/{thingName}/shadow/name/{shadowName}
```

Isječak koda 4.3: Teme za sjene uređaja

Svaka sjena ima rezerviranu MQTT temu i HTTP URL koji podržava akcije dohvata, ažuriranja i brisanja sjene. Koriste dokumente u formatu JSON za pohranu i dohvat podataka. Dokument sadrži svojstvo stanja koji pobliže opisuje stanje te koja je svrha samog dokumenta. Tako se razlikuju tri svojstva stanja:

- željeno (engl. *desired*) - postavljaju aplikacije kako bi naznačile novo stanje uređaja koje žele,
- prijavljeno (engl. *reported*) - stanje koje je uređaj prijavio,
- delta - razlika između željenog i prijavljenog, određuje AWS.

Korištenje sjene uređaja u više aplikacija i drugih usluga zahtijeva konzistentnost i koordinaciju između usluga. Sve aplikacije koje koriste sjenu uređaja moraju redovito pratiti i ažurirati podatke na temelju tog stanja. Isto tako, budući da je samo stanje uređaja dinamično, potrebno je držati se određenih naputaka. Uređaji bi trebali jedino slati svojstvo prijavljenog stanja pri komunikaciji s uslugom, dok bi ostale usluge trebale koristiti isključivo svojstvo željenog stanja kako bi podnijeli zahtjev za promjenom stanja.

Nadalje, ne postoji garancija da će poruke dospjeti u AWS pravilnim vremenskim poretom. Zato je važno da svaki dokument sjene uređaja sadrži vremensku oznaku (engl. *timestamp*) kako bi AWS mogao razlučiti koja je poruka ažurnija. Isto tako, svaki dokument stanja ima verziju, čime se jednostavno prati koja je poruka novija. Primjerice, ukoliko stignu dvije željene poruke jedna za drugom od različitih aplikacija, u AWS-u nastat će dva delta dokumenta, po jedan za svako željeno stanje uspoređeno s prijavljenim. Međutim, delta poruka s nižom verzijom bit će odbačena i ostat će samo novije željeno stanje koje će se ažurirati kao novo postojeće. U nastavku je dan primjer za prijavljenu, željenu i delta poruku.

```
// reported state
{
  "state": {
    "reported": {
      "color": "blue"
    }
  },
}
```

```

    "version": 9,
    "timestamp": 123456700
}
// desired state
{
    "state": {
        "desired": {
            "color": "RED"
        }
    },
    "version": 10,
    "timestamp": 123456701
}
// the resulting delta message
{
    "state": {
        "color": "RED"
    },
    "version": 11,
    "timestamp": 123456702
}

```

Isječak koda 4.4: Poruke sjene uređaja

Isto tako, moguće je i postaviti klijenski token, koji mora biti jedinstven za svako ažuriranje sjene, no može se ponovno koristiti po završetku ažuriranja. Njegova je glavna funkcija omogućavanje praćenja i identifikacije specifičnih zahtjeva i odgovora između klijenta i usluge AWS. Tokenom se mogu povezati željene poruke s rezultirajućim stanjima. Također služe za praćenje odakle zahtjevi za promjenom dolaze.

4.3. AWS IoT Jobs

Pokretanje poslova u sklopu usluge AWS IoT Jobs, kao što je ranije spomenuto, služi za udaljene operacije na fizičkim uređajima povezanih s platformom.

Posao je udaljena operacija koja se šalje i izvodi na jednom ili više uređaja povezanih s uslugom AWS IoT. Primjerice, moguće je definirati posao koji upućuje skup uređaja da preuzmu i instaliraju aplikaciju ili pokreću ažuriranja, rotiraju certifikate te je moguće udaljeno rješavati nastale probleme na uređajima (engl. *remote troublesho-*

oting). Da bi se kreirao posao, najprije je potrebno kreirati dokument posla (engl. *job document*) koji je opis udaljenih operacija koje će uređaji izvesti. Dokumenti posla sadrže informacije koje su potrebne uređajima za obavljanje posla te su u formatu JSON. Dokumenti se mogu pohraniti na platformu i posebno dohvaćati, no isto tako mogu se definirati uz samu naredbu koja izvršava posao. Pri kreiranju posla, potrebno je specificirati odredišne uređaje (engl. *targets*) koji trebaju izvršiti naredbe. Moguće je odabrati pojedinačne uređaje, ali i grupu uređaja. Usluga zatim pošalje poruku svakom uređaju da postoji posao dostupan za izvršavanje. Nakon kreiranja posla, dokument posla se postavlja na udaljene uređaje koje je potrebno ažurirati. Ciljni uređaj preuzima taj certifikat i time započinje izvršavanje posla. Izvodi operacije opisane u dokumentu i o napretku obavještava platformu. Broj izvršenja (engl. *execution number*) jedinstveni je identifikator izvršenja posla na određenom ciljnom uređaju. Usluga izvršavanja posla pruža naredbe za praćenje napretka izvršenja posla na uređaju kao i na svim uređajima.

Na temelju broja ponavljanja posla, razlikuju se dvije vrste poslova:

1. jednokratni posao (engl. *snapshot job*): posao se šalje svim odabranim ciljnim uređajima pri kreiranju posla, te nakon odrađivanja posla ili odgovora o nemogućnosti izvršenja, posao se smatra gotovim,
2. kontinuirani posao (engl. *continuous job*): definiran je na razini grupe stvari, te se pri dodavanjem svakog novog uređaja u grupu izvršava na dodanom uređaju.

Preporučljivo je poslove označiti kontinuiranima jer se tako omogućava izvršavanje posla na novododanim uređajima čak i nakon kreiranja posla.

Moguće je odrediti koliko se brzo ciljni uređaji obavještavaju o zakazanom izvršenju posla. To omogućuje stvaranje postupnog uvođenja (engl. *staged rollout*) radi boljeg upravljanja ažuriranjima, ponovnim pokretanjem i drugim operacijama. Konfiguraciju uvođenja moguće je izraditi koristeći statičku ili eksponencijalnu stopu uvođenja. Za navođenje maksimalnog broja uređaja koji se mogu obavijestiti u minuti, potrebno je koristiti statičku stopu.

Raspored poslova omogućuje raspoređivanje vremenskog okvira uvođenja dokumenta posla na sve ciljne uređaje. Osim toga, moguće je stvoriti vremenski okvir održavanja sa specifičnim datumima i vremenima unutar kojeg se dokument posla šalje na sve uređaje. Taj se vremenski okvir održavanja provodi na proizvoljnoj vremenskoj bazi, primjerice tjedno, ili pak na određene prilagođene datume koji se odaberu pri inicijalnom postavljanju posla. Samo se kontinuirani poslovi mogu izvršavati periodički tokom održavanja budući da se oni mogu ponavljati. Maksimalno trajanje ponavljajućeg vremenskog okvira održavanja je 23 sata i 50 minuta. Jednokratni poslovi također

se mogu uvrstiti u raspored poslova, no njima nije omogućeno izvršavanje unutar vremenskog okvira održavanja, nego jednokratno u definiranom vremenskom trenutku.

Za zakazane poslove koji se izvršavaju tijekom prozora održavanja s ručno postavljenom učestalošću izvršavanja, učestalost odnosno frekvencija definira se izrazom u formatu posla *cron*. U operacijskim sustavima tipa *Unix*, posao tipa *cron* jest zadatak koji se kreira pomoću alata *cron*, što je alat za zakazivanje i automatizaciju budućih poslova [27]. Pomoću njih automatizira se održavanje sustava, nadziranje diska, kao i pravljenje sigurnosnih kopija. Poslovi tipa *cron* imaju određenu sintaksu i strukturu koja omogućava da se izvršavanje skripti pravilno izvršava. Sintaksa tipa *cron* sastoji se od pet obaveznih polja međusobno odvojenih razmakom. Tablica 4.1 prikazuje polja koja se moraju definirati.

Tablica 4.1: Polja formata tipa *cron* [4]

Polje	Vrijednosti	Zamjenski znakovi
Minuta	0-59	, - * /
Sat	0-23	, - * /
Dan u mjesecu	1-31	, - * ? / L W
Mjesec	1-12 ili JAN-DEC	, - * /
Dan u tjednu	1-7 ili MON-SUN	, - * ? L #

U tablici se isto tako nalazi stupac za zamjenske znakove. Zamjenski znakovi (engl. *wildcards*) služe upravo kao zamjena sa konkretnu vrijednost za ona polja čija vrijednost nije bitna u kontekstu izraza. Zarez se koristi za odvajanje više vrijednosti, crtica označava opseg od prve do posljednje definirane vrijednosti, a zvjezdica je zamjena za sve vrijednosti polja. Kosa crta označava pojedinačne inkremente, a upitnik navodi jedno ili drugo. Slovo *L* označava posljednji dan u tjednu ili mjesecu, a *W* radni dan. Ljestve specificiraju pojedinačnu instancu unutar mjeseca, primjerice svaki drugi ponedjeljak u mjesecu. U nastavku je primjer posla u formatu *cron* koji se pokreće svake minute između 15:00 i 15:59, svaki drugi dan u mjesecu, no samo u siječnju i veljači:

```
// min hr day month weekday
* 15 2-30/2 JAN,FEB *
```

Isječak koda 4.5: Primjer formata tipa *cron*

Moguće je postaviti otkazivanje uvođenja posla na temelju postavljenih kriterija. Poslovi se mogu otkazati ako je previše uređaja vratilo negativnu potvrdu o izvrše-

nju posla, ili pak previše uređaja nije poslalo nikakav odgovor do isteka određenog vremenskog perioda.

Pri isteku vremena (engl. *timeout*) za posao šalje se obavijest pri neočekivano dugom stanju uređaja bez ažuriranja promjene. Postoje dvije vrste mjerača vremena: aktivni mjerači (engl. *in-progress timers*) te mjerači koraka (engl. *step timers*). Aktivni mjerači vremena ne mogu se izmijeniti nakon njihova pokretanja, te služe za mjerenje vremena izvođenja trenutno aktivnih poslova i postavljanje statusa izvršenja posla. Isto tako, ovaj mjerač vremena vrijedi za sva izvršenja istog posla, bez obzira na uređaj. Ako je potrebno pratiti odnosno ažurirati samo jedno izvršenje posla, onda se koristi mjerač koraka. On nema utjecaja na aktivni mjerač vremena. Moguće je postaviti novu vrijednost mjerača koraka pri svakom ažuriranju izvršenja posla, odnosno mjeriti trajanje svakog koraka pri izvršenju posla.

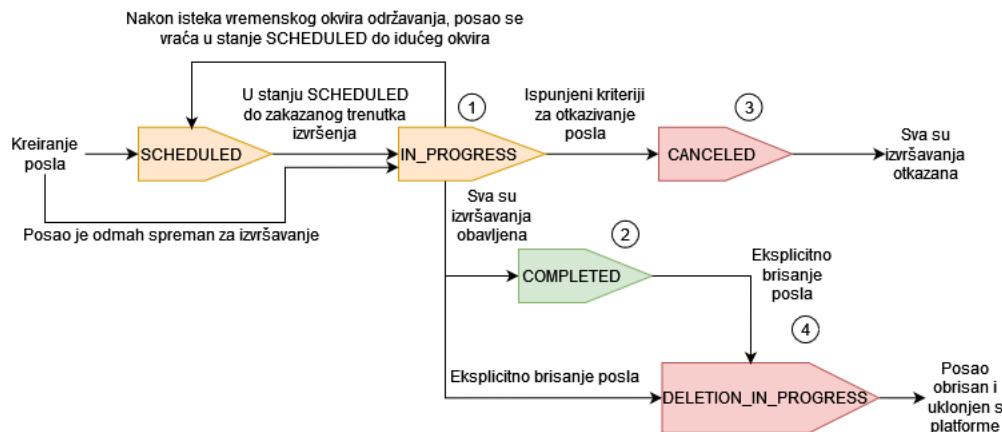
Isto tako, moguće je pokrenuti ponovni pokušaj izvršenja posla kada posao ne uspije ili pak istekne maksimalno vrijeme izvršavanja posla. Moguće je imati najviše deset ponovnih pokušaja za izvršenje posla te se svaka iteracija može nadzirati i pratiti napredak izvršenja.

Dijagram na slici 4.5 prikazuje stanja posla koja se mijenjaju tokom pokušaja izvršenja posla na uređaju. Jedan posao istovremeno ima više izvršenja poslova na različitim uređajima, te se ovisno o uspješnom ili neuspješnom izvršenju svih poslova stanje samog posla mijenja. Posao se može naći u sljedećim stanjima:

- *SCHEDULED*: ovo stanje odnosi se isključivo na poslove koji se kontinuirano izvršavaju. Kada se pokrene posao koji ima specificirano vrijeme pokretanja i završetka, status posla ažurira se u *SCHEDULED*. U trenutku početka vremenskog okvira održavanja, stanje posla promijenit će se u *IN_PROGRESS*.
- *IN_PROGRESS*: tokom ovog stanja, posao se postupno šalje na sve ciljne uređaje u grupi. Po završetku vremenskog okvira održavanja kontinuiranog posla, posao se vraća iz ovog stanja natrag u stanje *SCHEDULED*.
- *COMPLETED*: prijelazom u ovo stanje označava se kraj posla na ciljnom uređaju. Kontinuirani posao koji nema definirano početno i krajnje vrijeme izvršavanja nikad ne doseže ovo stanje, nego iz stanja *IN_PROGRESS* prelazi u stanje *SCHEDULED* gdje ponovno čeka sljedeću iteraciju izvršavanja. Kontinuirani poslovi s definiranim krajnjim vremenom po isteku tog vremena prelaze u stanje *COMPLETED*. Kod jednokratnih poslova, posao prelazi u *COMPLETED* kada sva izvršenja posla na svim uređajima dosegnu prekidno stanje.
- *CANCELED*: posao prelazi u ovo stanje namjernim otkazivanjem posla. Tijekom

kom otkazivanja, AWS počinje poništavati izvršenja prethodno kreiranih poslova.

- *DELETION_IN_PROGRESS*: posao prelazi u ovo stanje pokretanjem brisanja iz konzole platforme. Pri brisanju posla, usluga briše sva ranije kreirana izvršavanja tog posla. Brisanjem se posao u potpunosti uklanja s platforme.



Slika 4.5: Različita stanja tijekom izvršavanja posla [4]

Postoje određena ograničenja na poslove i njihovo izvršavanje. Svi poslovi u stanju *IN_PROGRESS* smatraju se aktivnim poslovima za koje postoji limit. Ovo uključuje poslove koji ili uvide nova izvršavanja poslova ili poslove koji čekaju da uređaji dovrše postojeće izvršavanje. Ograničenje se odnosi na kontinuirane i jednokratne poslove. Poslovi u tijeku i poslovi koji poništavaju izvršenja prethodno stvorenih poslova istovremeni su i ubrajaju se u ograničenje istovremenosti poslova. Usluga može pokrenuti i otkazivati izvršenje poslova brzinom od tisuću uređaja u minuti. Svaki posao je istovremen i ubraja se u ograničenje istovremenosti poslova samo kratko vrijeme. Nakon što su izvršenja uvedena ili otkazana, posao više nije istovremen i ne ubraja se u ograničenje istovremenosti poslova. Moguće je iskoristiti istovremenost za kreiranje većeg broja poslova za vrijeme čekanja izvršenja postojećih poslova.

Isto tako, postoje različita stanja izvršenja samog posla. Izvršenje posla odnosi se na jednu instancu pokretanja posla na određenom ciljnom uređaju, te skup svih izvršenja poslova na svim uređajima određuje stanje samog posla. Tablica 4.2 prikazuje sva stanja u kojima se može naći izvršenje nekog posla. Isto tako, u tablici je navedeno koje stanje može okinuti uređaj, a koje usluga. Označeno je i koja su stanja prekidna, odnosno označavaju završetak izvođenja posla. Stupac *retry* odnosi se na mogućnost ponovnog pokušaja izvršenja posla nakon navedenog stanja.

Kad usluga pošalje posao na ciljni uređaj, status izvršenja posla prelazi u *QU-*

Tablica 4.2: Stanja izvršenja posla [4]

Stanje	Pokrenuo uređaj?	Pokrenula usluga?	Prekidno?	Retry?
<i>QUEUED</i>	Ne	Da	Ne	-
<i>IN_PROGRESS</i>	Da	Ne	Ne	-
<i>SUCCEEDED</i>	Da	Ne	Da	-
<i>FAILED</i>	Da	Ne	Da	Da
<i>TIMED_OUT</i>	Ne	Da	Da	Da
<i>REJECTED</i>	Da	Ne	Da	Ne
<i>REMOVED</i>	Ne	Da	Da	Ne
<i>CANCELED</i>	Ne	Da	Da	Ne

QUEUED. Posao stoji u stanju čekanja u redu sve dok uređaj ne primi izvršenje posla, pokrene ga i promijeni status u *IN_PROGRESS* koji zatim i pošalje na platformu. Isto tako, u slučaju da se posao otkáže ili se kriteriji otkazivanja posla ispune, status izvršenja posla prelazi u *CANCELED*. Pri uspješnom izvršenju posla, uređaj šalje obavijest na platformu o uspješnosti, čime se status mijenja u *SUCCEEDED*. Ako pak izvršenje posla bude neuspješno, prelazi u stanje *FAILED* odakle ima priliku ponovnog izvršenja ako je tako naznačeno pri konfiguraciji samog posla. Stanje *TIMED_OUT* odnosi se na istek maksimalnog vremena izvođenja, i isto tako podržava mehanizam ponovnog izvršenja. Uređaj može promijeniti stanje izvršenja posla u *REJECTED* ako primi nevaljan ili nekompatibilan zahtjev od platforme. Stanje *REMOVED* postavlja se ako uređaj više nije podoban ili valjan za izvršenje traženog posla.

Komunikacija između uređaja i platforme može se odvijati putem sučelja REST, odnosno protokolom HTTP, te protokolom MQTT. Preporučena je komunikacija pomoću protokola MQTT zbog ranije opisanih prednosti u brzini i jednostavnosti povezivanja. U tom slučaju, uređaj se mora pretplatiti na rezervirane teme kako bi primio obavijest o nadolazećem izvršenju posla. Glavni je uvjet da razvojni sustav zna ime stvari u platformi kako bi mogao pratiti obavijesti namijenjene sebi. U nastavku su navedene teme na koje se uređaj mora pretplatiti kako bi dobivao obavijesti o poslovima na čekanju. Tema `notify` označava da postoji jedan ili više poslova na čekanju, dok tema `notify-next` pruža uvid u detalje sljedećeg posla koji je potrebno izvršiti.

```
$aws/things/{thingName}/jobs/notify
$aws/things/{thingName}/jobs/notify-next
```

Isječak koda 4.6: Teme za obavijesti o poslovima

Isto tako, postoje teme na koje uređaj objavljuje kako bi obavijestio AWS o stanju

izvođenja traženih poslova. Teme su navedene u nastavku.

```
$aws/things/{thingName}/jobs/{jobId}/get/accepted
$aws/things/{thingName}/jobs/{jobId}/update
$aws/things/{thingName}/jobs/{jobId}/update/accepted
$aws/things/{thingName}/jobs/{jobId}/update/rejected
```

Isječak koda 4.7: Teme za obavijesti o izvođenju poslova

4.4. AWS IoT OTA

Usluga AWS IoT OTA (engl. *Over-The-Air*) usko je vezana za prethodno opisanu uslugu izvršavanja poslova. Ona omogućava bežično ažuriranje softvera na uređajima, čime se osigurava da uređaji rade na najnovijoj i najsigurnijoj inačici programskog koda. Usluga pruža visoku fleksibilnost i kontrolu nad procesom ažuriranja. Mogu se postaviti različite strategije ažuriranja, primjerice fazna ažuriranja, gdje se prvo ažurira manji dio uređaja kako bi se testirala stabilnost novog softvera prije nego se pošalje na sve uređaje. To omogućava brzo otkrivanje i ispravljanje potencijalnih problema bez utjecaja na sve uređaje odjednom. Osim toga, AWS pruža detaljno nadziranje i praćenje uspješnosti svakog OTA zadatka, što dodatno pomaže u upravljanju i dijagnostici. Korištenje ove usluge primarno se oslanja na uređaje koji podržavaju FreeRTOS.

Iako su OTA ažuriranja namijenjena za ažuriranje softvera uređaja, mogu se koristiti za slanje bilo kojih datoteka na uređaje registrirane u sustav AWS. Pri bežičnom slanju ažuriranja, preporučljivo je digitalno potpisati datoteke kako bi uređaji koji primaju datoteke mogli potvrditi da nisu mijenjane na putu. U tu svrhu može se koristiti usluga potpisivanja koda koju nudi AWS ili vlastite alate za potpisivanje koda.

AWS nudi i biblioteku za izvršavanje OTA ažuriranja u sklopu projekta FreeRTOS. Klijentska biblioteka nudi povezivanje putem protokola MQTT i HTTP te logički odvaja operacije ažuriranja softvera od ostatka aplikacije na uređaju. U sklopu biblioteke razvijen je OTA agent koji služi za pojednostavljenje količine koda koju je potrebno napisati za funkcionalnost OTA ažuriranja. Integracija se prvenstveno sastoji od inicijalizacije OTA agenta i stvaranja prilagođene funkcije povratnog poziva za odgovaranje na poruke događaja OTA agenta. Tijekom inicijalizacije agentu se proslijeđuju sučelja korištena za komunikaciju s platformom kao i operacijskim sustavom. Međuspremnici (engl. *buffers*) se također mogu inicijalizirati i proslijediti OTA agentu. Agent koristi protokol MQTT za sve kontrolne komunikacijske operacije koje uključuju AWS IoT usluge, ali ne upravlja MQTT vezom. Kako bi se osiguralo da OTA

agent ne ometa politiku upravljanja vezom aplikacije, MQTT vezom mora upravljati glavna korisnička aplikacija. Datoteka se može preuzeti preko protokola MQTT ili HTTP. Protokol se može odabrati i pri samom kreiranju OTA posla. U slučaju odabira protokola MQTT, agent koristi istu vezu za kontrolne operacije i za preuzimanje datoteka.

Pri kreiranju OTA ažuriranja, usluga za upravljanje OTA ažuriranjima (engl. *OTA Update Manager*) stvara AWS posao kako bi obavijestila uređaje da je ažuriranje dostupno. Aplikacija na uređaju zatim stvara FreeRTOS zadatak koji se pretplaćuje na teme obavijesti za poslove i čeka poruke ažuriranja. Kada je dostupno ažuriranje, OTA agent objavljuje zahtjev za njim i prihvaća ažuriranja putem protokola MQTT ili HTTP. OTA agent provjerava digitalni potpis primljene datoteke te, ako je potpis valjan, instalira ažuriranje. Cijeli je proces u suštini izvršavanje posla u kombinaciji s dohvatom i verifikacijom datoteke koju je zatim potrebno pokrenuti na uređaju radi ažuriranja. OTA ažuriranje je podatkovna struktura koju održava usluga za upravljanje ažuriranja. Objekt se sastoji od sljedećih komponenti:

- identifikator OTA ažuriranja,
- opis ažuriranja,
- popis ciljnih uređaja koje je potrebno ažurirati,
- vrsta OTA ažuriranja: kontinuirani ili jednokratni posao,
- protokol za izvođenje ažuriranja: HTTP ili MQTT,
- popis datoteka za slanje na uređaje,
- uloga (engl. *role*) koja dozvoljava pristup pohrani, poslu i usluzi potpisa koda.

Datoteka koja će se izvršiti na uređaju ključna je komponenta ažuriranja i ona mora biti pohranjena na platformi kako bi se pri svakom izvršavanju posla dohvatila i poslala na ciljne uređaje. Pohrana datoteka omogućena je uslugom Amazon S3 pohrane (engl. *Amazon Simple Storage Service Bucket*). To je osnovna komponenta platforme AWS za skladištenje objekata i datoteka. Spremnici (engl. *buckets*) omogućavaju korisnicima pohranu i preuzimanje velike količine podataka putem skalabilnog i visoko dostupnog sučelja. Pohranjeni objekti mogu biti bilo koje vrste, uključujući slike, videozapise, dokumente, baze podataka i pričuvene kopije. Svaki objekt čuva se u spremniku s jedinstvenim ključem. Podaci u spremnicima automatski su replicirani preko više uređaja i objekata unutar jedne AWS regije, čime se osigurava otpornost na greške i visoka dostupnost podataka. Također, usluga podržava različite mehanizme za kontrolu pristupa i politike, čime se precizno definira pristup podacima. Isto tako, S3

podržava verzioniranje, što omogućava korisnicima da čuvaju više verzija istog objekta unutar jednog spremnika. Stoga, kako bi se datoteka ažuriranja mogla poslati putem posla na uređaj, potrebno je kreirati novi spremnik u S3 i unutra pohraniti željenu binarnu datoteku. Isto tako, radi potvrde o valjanosti datoteke potrebno je ili pri pohrani digitalno potpisati datoteku ili pak pri kreiranju posla ažuriranja definirati parametre potpisivanja kojima će se dokument potpisati, poput kriptografskog algoritma i potpisa u formatu PEM (engl. *Privacy-Enhanced Mail*). Prva je opcija preporučena.

4.5. Ostale dostupne IoT usluge u sustavu AWS

Uz ranije opisanu glavnu komponentu IoT Core koju nudi AWS za stvaranje IoT aplikacija, u samom ekosustavu nalazi se još mogućnosti za jednostavniju integraciju oblaka i fizičkih uređaja. U nastavku su ukratko opisane ostale usluge koje se mogu integrirati uz jezgrenu uslugu AWS IoT Core.

Važno je napomenuti kako nisu sve usluge dostupne u svim regijama unutar platforme AWS.

IoT Analytics

AWS IoT Analytics automatizira korake potrebne za analizu podataka prikupljenih od IoT uređajima. Filtrira, transformira i obogaćuje podatke prije nego ih pohrani u vremensku bazu podataka za daljnju analizu. Moguće je postaviti uslugu da prikuplja podatke s uređaja samo koji su potrebni, vrši matematičke operacije i dopunjava podatke raznim metapodacima, primjerice o lokaciji. Zatim se podaci mogu analizirati koristeći ugrađeni sustav za pretraživanje koji koristi SQL sintaksu ili pak vršiti kompleksniju analizu koristeći usluge umjetne inteligencije. Isto tako, ova usluga nudi vizualizaciju podataka integracijom s dodatnom uslugom Amazon QuickSight.

IoT Device Defender

AWS IoT Device Defender potpuna je usluga koja pomaže pri osiguranju IoT uređaja. Kontinuirano revidira IoT konfiguracije radi provjere jesu li sve u skladu s najboljim sigurnosnim praksama. Također pruža kontinuirano monitoriranje sigurnosnih metrika s uređaja i usluge AWS IoT Core kako bi se detektirale anomalije u ponašanju pojedinih uređaja.

Ova usluga također omogućuje slanje alarma na konzolu AWS IoT sustava i na uslugu za monitoriranje Amazon CloudWatch. Koriste se ugrađene mitigacijske akcije

kako bi se izolirali nesigurni uređaji.

IoT Events

AWS IoT Events usluga služi za praćenje događaja u sustavu. Ova usluga prati ulazne podatke s više IoT uređaja i aplikacija radi prepoznavanja uzoraka i pokretanja prikladnih operacija na određene događaje. Moguće je pratiti ne samo fizičke uređaje, nego i druge AWS aplikacije integrirane u IoT sustav.

IoT FleetWise

AWS IoT FleetWise jest usluga koja se koristi za prikupljanje podataka od vozila i njihovu organizaciju u oblaku. Prikupljeni se podaci mogu koristiti za poboljšanje kvalitete, performansa i autonomije vozila. Također podržava više različitih protokola i podatkovnih formata. Ova usluga pomaže pri transformaciji poruka niske razine (engl. *low-level*) u oblik čitljiv čovjeku i standardizira podatke radi lakše analize u oblaku. Moguće je također definirati vrstu podataka i trenutak u kojem se ti podaci šalju u oblak.

Kada su podaci o vozilu u oblaku, mogu se koristiti u aplikacijama koje analiziraju zdravlje vozila. Ove informacije mogu pomoći pri identifikaciji potencijalnih problema u održavanju i pri unapređenju naprednih tehnologija poput autonomne i asistirane vožnje integracijom strojnog učenja.

IoT Greengrass

AWS IoT Greengrass jest usluga otvorenog koda (engl. *open source*) za računarstvo na rubu (engl. *edge computing*) i u oblaku koja pomaže pri izradi, objavi i upravljanju IoT aplikacija na uređajima. Može se koristiti za omogućavanje uređajima lokalno reagiranje na podatke koje generiraju, pokretanje modela strojnog učenja za predikciju, te filtriranje i agregaciju podataka s uređaja. Omogućava uređajima da prikupljaju i analiziraju podatke ne u oblaku, nego ili na samom uređaju ili drugom mjestu koje je bliže izvoru tih podataka. Također može komunicirati na siguran način s uslugom AWS IoT Core i izvoziti podatke u oblak. Karakteristika računarstva u rubu, koje omogućava ova komponenta, jest približavanje računanja izvorišnim uređajima, čime se poboljšava vrijeme odziva i štedi propusnost [7].

IoT Roborunner

AWS IoT RoboRunner nova je usluga koja pruža infrastrukturu za optimizaciju robota iz jedne točke gledišta. Uz pomoć ove usluge moguće je izgraditi aplikacije za jednostavniji međusobni rad robota. Namijenjena je za industrijske robote i automatizirane sustave za olakšano upravljanje opremom. Pruža centralne repozitorije podataka za pohranu te podržava različite podatkovne formate od raznih robota i autonomnih sustava.

IoT TwinMaker

AWS IoT TwinMaker usluga je za kreiranje operativnih digitalnih dvojnika fizičkih i digitalnih sustava. Stvara digitalne vizualizacije koristeći mjerenja i analize iz raznih senzora i kamera radi praćenja stvarnog stanja i uvjeta u kojima se objekt, zgrada ili kompleks nalazi. Podaci iz stvarnog svijeta se mogu koristiti za dijagnostiku i ispravljanje pogrešaka ili pak optimizaciju operacija.

Digitalni dvojnici (engl. *digital twin*) digitalna je reprezentacija sustava i svih njegovih fizičkih i digitalnih komponenti. Dinamički se ažurira primitkom novih podataka kako bi simulirao stvarno stanje i ponašanje sustava.

IoT SiteWise

AWS IoT SiteWise jest usluga koja skalabilno prikuplja, modelira, analizira i vizualizira podatke iz industrijske opreme. Usluga pruža kreiranje web aplikacija za operativne korisnike radi prikaza i analize industrijskih podataka u stvarnom vremenu. Moguće je dobiti uvide u podatke i operacije konfiguriranjem i praćenjem raznih metrika, primjerice efektivnost i efikasnost opreme. Ovu je uslugu moguće koristiti jedino uz ranije opisan IoT TwinMaker.

5. Povezivanje razvojnog sustava i oblaka

Oblak koju pruža platforma AWS i razvojni sustav ESP32-C3 dva su odvojena sustava koja moraju međusobno komunicirati i razmjenjivati podatke. Za ostvarenje njihove veze razvijena su dva programska rješenja:

1. programska potpora za mikrokontroler, koja će omogućiti dinamičko povezivanje na Wi-Fi, spajanje na platformu AWS te slanje podataka u oblak,
2. programska potpora za platformu AWS, koja će ostvariti umrežavanje uređaja u sustav, ažuriranje softvera na uređaju, pohranu primljenih podataka s uređaja te prikaz tih podataka u web aplikaciji.

5.1. Programska potpora za mikrokontroler

Za razvoj programske potpore za mikrokontroler korišten je paket za razvoj softvera *ESP-AWS-IoT* (engl. *Software Development Kit - SDK*) tvrtke *Espressif*. To je repozitorij otvorenog koda temeljen na službenom programskom paketu tvrtke Amazon koji omogućava ugradbenim računalima razvijanih u programskom jeziku C komunikaciju s AWS-om. Korišteni razvojni paket omogućava uređajima temeljnim na ESP32 jezgri povezivanje sa uslugama platforme AWS. Pojednostavljuje integraciju uređaja s AWS ekosustavom nudeći gotova sučelja i programske primjere za sve značajke [14]. Razvijena programska potpora za uređaj ESP32-C3 sastoji se od nekoliko komponenti:

- dinamičko povezivanje na bežičnu mrežu,
- spajanje na platformu AWS,
- učitavanje novog softvera,
- očitavanje senzorskih mjerenja,
- slanje podataka u oblak protokolom MQTT.

Neke od navedenih komponenti izvršavaju se slijedno, dok se druge izvršavaju paralelno. Spajanje na Wi-Fi i povezivanje s platformom AWS ključni su koraci koji prethode bilo kakvom pokušaju slanja podataka u oblak. Isto tako, praćenje ažuriranja softvera i očitavanje mjerenja izvršavaju se paralelno u posebnim procesima budući da nisu sekvencijalni niti međusobno isključivi zadaci. U nastavku je pobliže opisan svaki navedeni segment programske potpore.

5.1.1. Dinamičko povezivanje mikrokontrolera na Wi-Fi

Radni okvir ESP-IDF nudi dinamičko spajanje na Wi-Fi mrežu pomoću zasebne komponente. Ovaj se postupak naziva provizioniranje (engl. *provisioning*). Ova komponenta pruža aplikacijska programska sučelja (engl. *Application Programming Interface - API*) koja kontroliraju pružanje usluge za primanje i konfiguriranje Wi-Fi vjerodajnica putem sigurnih komunikacijskih protokola. Sigurnosni protokoli definirani su u komponenti protokolne komunikacije (engl. *protocomm*) koja upravlja sigurnim sjednicama (engl. *sessions*) i pruža radni okvir za višestruki prijenos podataka. Također je moguće direktno koristiti sloj protokolne komunikacije radi implementacije specifične za aplikaciju [15].

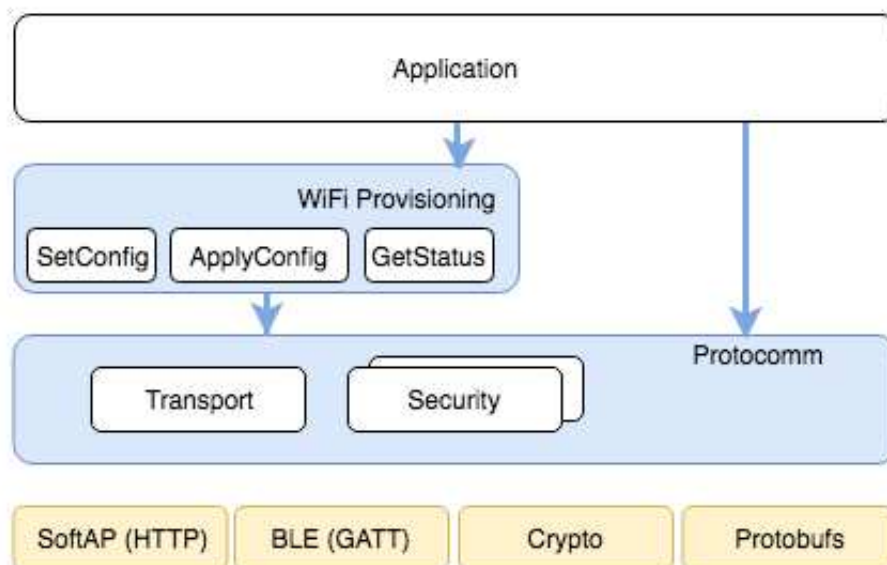
Sloj protokolne komunikacije interno koristi mehanizam protokolnih međuspremika (engl. *protocol buffers - protobuf*) za sigurno uspostavljanje sjednice. Protokolni međuspremici namijenjeni su za serijalizaciju strukturiranih podataka neovisno o programskom jeziku i platformi. Koristan je pri izradi programa i sustava koji međusobno komuniciraju putem mreže zbog kompaktnosti i niske latencije [21].

Sloj protokolne komunikacije pruža radni okvir za različite načine komunikacije:

1. protokol BLE,
2. Wi-Fi (SoftAP u kombinaciji s HTTP serverom).

Ovakva vrsta podrške koja korisnicima pruža okvir za ostvarivanje usluge dinamičkog povezivanja u mrežu, neovisno o načinu komunikacije, naziva se unificirano provizioniranje (engl. *unified provisioning*). Ovaj način prijave uređaja na mrežu zahtijeva interakciju korisnika putem vanjskog uređaja za slanje vjerodajnica na mikrokontroler. Tvrtka *Espressif* pruža jednostavna mobilna rješenja koja se mogu koristiti gotova ili pak uklopiti u vlastitu mobilnu aplikaciju. Na slici 5.1 prikazana je arhitektura usluge.

Kao što je ranije opisano, arhitektura je bazirana na sloju protokolne komunikacije koji je odgovoran za prijenos podataka i sigurnost. Služi za jednostavne povratne



Slika 5.1: Arhitektura unificiranog provizioniranja [15]

pozive aplikaciji (engl. *callbacks*) i dobivanje Wi-Fi statusa. Sama aplikacija ima kontrolu nad implementacijom povratnih poziva.

Aplikacija stvara instancu protokolne komunikacije koja se preslikava na određeni prijenosni protokol i sigurnosnu shemu. Svaki prijenos podataka u sloju protokolne komunikacije ima koncept krajnje točke (engl. *endpoint*) koji odgovara logičkom komunikacijskom kanalu za određenu vrstu informacija. Primjerice, sigurnosno rukovanje (engl. *handshake*) odvija se na različitoj krajnjoj točki u odnosu na točku za Wi-Fi konfiguraciju. Svaka se krajnja točka identificira nizom znakova i mijenja se ovisno o internom prikazu krajnje točke. U slučaju prijenosa pomoću Wi-Fi veze odnosno SoftAP funkcionalnosti, krajnja točka prikazuje se kao URI, dok u slučaju prijenosa podataka putem protokola BLE odgovara GATT karakteristici sa specifičnim identifikatorom.

Oglašavanje i otkrivanje uređaja prepušteno je aplikaciji i ovisno o odabranom protokolu, vanjske aplikacije mogu odabrati odgovarajuću metodu za oglašavanje i otkrivanje. Za Wi-Fi prijenos obično se koristi ime mreže pristupne točke. Za prijenos putem protokola BLE može se koristiti ime samog uređaja.

Kao što je opisano, podržano je korištenje protokola BLE kao i Wi-Fi usluge za prijenos vjerodajnica. Pri odabiru prijenosnog kanala za spajanje uređaja u mrežu, potrebno je razmotriti nekoliko točaka. Za početak, prijenos temeljen na protokolu BLE prednost održavanja netaknutog komunikacijskog kanala između uređaja i klijenta tijekom prijenosa podataka, što osigurava pouzdanu povratnu informaciju. S druge strane,

prijenos putem Bluetootha troši oko 110 KB memorije tijekom rada, što je na uređajima niskih resursa velika potrošnja. Korisno je što se korištena memorija može vratiti na hrpu (engl. *heap*) po završetku umrežavanja uređaja ukoliko se BLE funkcionalnosti više ne koriste. Prijenos temeljen na Wi-Fi mreži, odnosno SoftAP funkcionalnosti, vrlo je interoperabilan i ne troši dodatnu memoriju. Međutim, mikrokontroler koristi isti radio za emitiranje pristupne točke i za spajanje na željenu mrežu. Budući da se te akcije mogu odvijati na različitim kanalima, postoji mogućnost da se ažuriranja statusa veze ne dostave na mobilni uređaj. Također, mobilni se uređaj mora odspojiti s izvorne Wi-Fi mreže radi privremenog spajanja na pristupnu točku mikrokontrolera. Uređaj će se spojiti na izvornu mrežu tak kada mikrokontroler ugasi pristupnu točku [15].

Za razvoj predloženog rješenja korišteno je slanje vjerodajnica pomoću Wi-Fi veze, odnosno privremene pristupne točke. Kao što je ranije opisano, protokol BLE troši značajnu količinu *heap* memorije, a razvojni sustav ESP32-C3 nema dovoljno radne memorije koja bi pokrila prijavu u mrežu uz ostale radne procese. Mikrokontroler najprije stvori privremenu pristupnu točku na koju se mobilni uređaj spaja pomoću mobilne aplikacije. Zatim, nakon skeniranja dostupnih Wi-Fi mreža u blizini, u mobilnoj aplikaciji odabire se željena mreža i unese lozinka. Vjerodajnice se zatim pošalju putem Wi-Fi mreže, i mobilni uređaj može se odspojiti s privremene pristupne točke. Vjerodajnice se pohrane u memoriju tipa NVS (engl. *non-volatile storage*) koja ne zahtijeva konstantno napajanje kako bi se zadržala na uređaju. Ovime je omogućeno povezivanje uređaja u sustav čak i kada dođe do prekida napajanja [38]. Memorija tipa NVS može se jedino programski obrisati, te bi u idealnom izvedbenom rješenju postojao vanjski gumb spojen na mikrokontroler koji bi pokretao brisanje te memorije i tako omogućio ponovno spajanje na željenu mrežu. Sljedeći programski isječak prikazuje inicijalizaciju memorije NVS, mrežnog sučelja te stvaranje pristupne točke.

```
/* Init NVS partition */
esp_err_t ret = nvs_flash_init();
/* Init TCP/IP */
ESP_ERROR_CHECK(esp_netif_init());
/* Init the event loop */
ESP_ERROR_CHECK(esp_event_loop_create_default());
wifi_event_group = xEventGroupCreate();
/* Init Wi-Fi including netif with default config */
esp_netif_create_default_wifi_sta();
esp_netif_create_default_wifi_ap();
wifi_prov_mgr_config_t config = {
```

```

        .scheme = wifi_prov_scheme_softap,
        .scheme_event_handler = WIFI_PROV_EVENT_HANDLER_NONE
    };

    /* Init provisioning manager with above config */
    ESP_ERROR_CHECK(wifi_prov_mgr_init(config));
    ESP_ERROR_CHECK(wifi_prov_mgr_start_provisioning(security, (
        const void *) sec_params, service_name, service_key));
    wifi_prov_print_qr(service_name, username, pop,
        PROV_TRANSPORT_SOFTAP, disp);

```

Isječak koda 5.1: Stvaranje pristupne točke

LCD zaslon

Za povezivanje mobilnog uređaja na privremenu pristupnu točku koju emitira razvojni sustav, potrebno je skenirati QR kod koji mikrokontroler generira. Budući da ESP32-C3 nema vlastito sučelje, na sustav je spojen zaslon OLED SSD1306 veličine 128×64 piksela. Uređaj sa zaslonom komunicira putem I2C sučelja, a za prikaz sadržaja na zaslonu korištena je biblioteka LVGL (engl. *Light and Versatile Graphics Library*). To je grafička biblioteka otvorenog koda namijenjena izradi aplikacija s grafičkim korisničkim sučeljem (engl. *Graphical User Interface - GUI*) za ugradbene sustave. Pruža radni okvir s mnogim značajkama, temama i paletama boja. Isto tako, biblioteka troši vrlo malo resursa, što je čini pogodnom za uređaje poput razvojnog sustava ESP32-C3 [2]. Generiranje QR koda obavlja se pomoću biblioteke *QR-Code-Generator* koja je prilagođena ESP32 uređajima. Tablica 5.1 prikazuje način spajanja pločice sa zaslonom. Kao što se vidi iz konfiguracije, osim napajanja i uzemljenja, potrebno je spojiti liniju za prijenos podataka te liniju takta.

Tablica 5.1: Povezivanje uređaja i LCD zaslona

Pin razvojnog sustava	Pin zaslona
GND	GND
5V	Vcc
GPIO 4	SCL
GPIO 5	SDA

```

static void wifi_prov_print_qr(const char *name, const char *
    username, const char *pop, const char *transport, lv_disp_t
    *disp) {

```

```

char payload[150] = {0};
snprintf(payload, sizeof(payload),
    "{\"ver\":\"%s\", \"name\":\"%s\", \"username\":\"%s\", \""
    "pop\":\"%s\", \"transport\":\"%s\"}",
    PROV_QR_VERSION, name, usrname, pop, transport);
esp_qrcode_config_t cfg = {
    .display_func = generate_qr_code_lcd,
    .max_qrcode_version = 10,
    .qrcode_ecc_level = ESP_QRCODE_ECC_LOW
};
esp_qrcode_generate(&cfg, payload);
}

```

Isječak koda 5.2: Generiranje QR koda iz pristupne točke

Prethodna funkcija povezuje pristupnu točku s QR kodom. Podaci o samoj pristupnoj točki učitaju se u privremenu varijablu, čiji se sadržaj prosljeđuje biblioteci za generiranje QR koda. Dobiveni se podaci zatim prosljeđuju funkciji za prikaz koda na zaslonu. QR kod prikazuje se na zaslonu piksel po piksel, skalirajući veličinu QR koda na temelju širine i duljine samog zaslona.

```

void generate_qr_code_lcd(esp_qrcode_handle_t qrcode)
{
    ESP_LOGI(TAG, "%s", "Started generate_qr_code_lcd...");

    int size = qrcodegen_getSize(qrcode);

    // Calculate the scale factor
    int scale = (int)fmin(EXAMPLE_LCD_H_RES / size,
        EXAMPLE_LCD_V_RES / size);

    // Calculate horizontal shift
    int shift_x = (EXAMPLE_LCD_H_RES - size * scale)/2;

    // Calculate vertical shift
    int shift_y = (EXAMPLE_LCD_V_RES - size * scale)/2;

    if (lvgl_port_lock(0)) {
        lv_obj_t *screen = lv_scr_act();
        lv_obj_clean(screen); // Clear the screen to ensure it's
    }
}

```

```

dark

// Create a canvas object
lv_obj_t *canvas = lv_canvas_create(screen);
static lv_color_t cbuf[LV_CANVAS_BUF_SIZE_TRUE_COLOR(
EXAMPLE_LCD_H_RES, EXAMPLE_LCD_V_RES)];
lv_canvas_set_buffer(canvas, cbuf, EXAMPLE_LCD_H_RES,
EXAMPLE_LCD_V_RES, LV_IMG_CF_TRUE_COLOR);
lv_canvas_fill_bg(canvas, lv_color_white(), LV_OPA_COVER);

// Draw the QR code on the canvas
for (uint8_t y = 0; y < size; y++) {
    for (uint8_t x = 0; x < size; x++) {
        if (qrcodegen_getModule(qrcode, x, y)) {
            for (int dy = 0; dy < scale; dy++) {
                for (int dx = 0; dx < scale; dx++) {
                    lv_canvas_set_px(canvas, shift_x + x * scale +
dx, shift_y + y * scale + dy, lv_color_black());
                }
            }
        }
    }
}

// Release the mutex
lvgl_port_unlock();
}
}

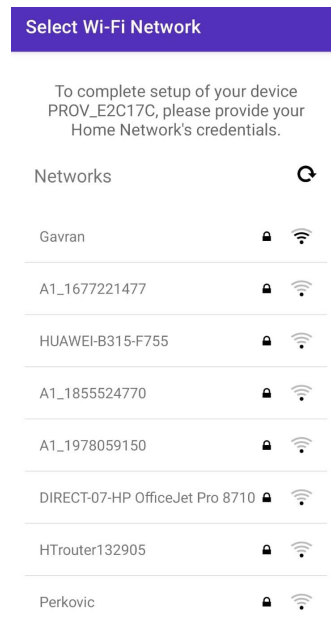
```

Isječak koda 5.3: Funkcija za prikaz QR koda na zaslonu

Na slikama 5.2 i 5.3 prikazana je mobilna aplikacija te trenutak nakon skeniranja QR koda. Mobilni uređaj zahtijeva spajanje na privremenu pristupnu točku, a iduća slika prikazuje dostupne Wi-Fi mreže u blizini mobilnog uređaja, ujedno i mikrokontrolera, na koje se razvojni sustav može spojiti. Odabirom jedne od mreža i unosom lozinke vjerodajnice se šalju na razvojni sustav.



Slika 5.2: Obavijest nakon skeniranja QR koda



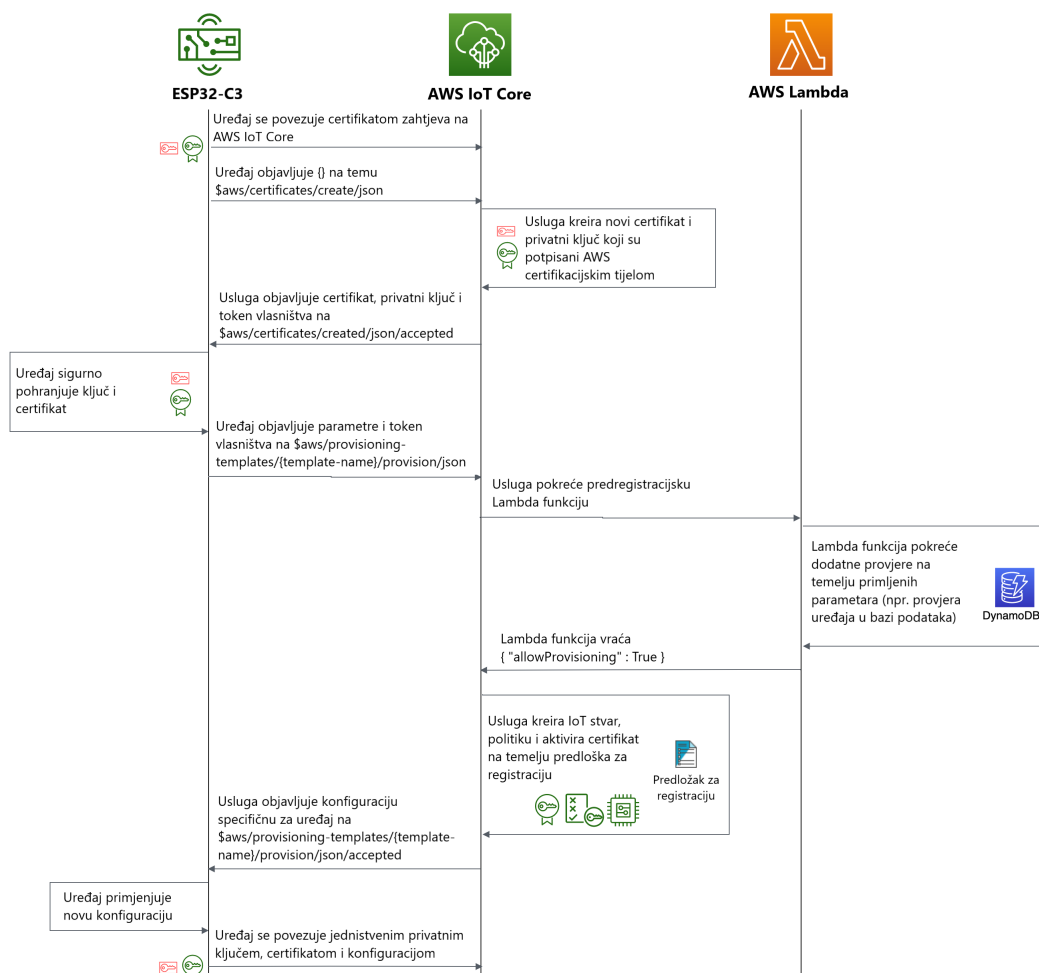
Slika 5.3: Odabir dostupne Wi-Fi mreže u blizini

5.1.2. Registracija u sustav AWS

Nakon uspješnog povezivanja na Wi-Fi, sljedeći je korak registracija uređaja na platformu AWS. Korištena je biblioteka za AWS IoT Fleet Provisioning koja se održava u sklopu projekta otvorenog koda *FreeRTOS* [19]. Biblioteka omogućuje mnoštvu odn. floti IoT uređaja registraciju i instalaciju jedinstvenih certifikata na platformu. Bibliotekom je moguće uređaje registrirati i pomoću autoriziranog korisnika, ali i certifikatima zahtjeva. Ova biblioteka ne ovisi o dodatnim bibliotekama osim standardne C biblioteke i stoga se može koristiti s bilo kojom bibliotekom za MQTT protokol.

Za potrebe ovog sustava odabrana je registracija pomoću certifikata zahtjeva. Na slici 5.4 prikazan je slijed događaja pri registraciji uređaja. Uređaj se najprije spaja na AWS certifikatom zahtjeva koji unaprijed postoji na mikrokontroleru te ostvaruje MQTT vezu. Zatim objavljuje praznu poruku na temu `\$aws/certificates/create/json`, kojom zapravo podnosi zahtjev za kreiranjem vlastitog jedinstvenog certifikata. Usluga kreira traženi certifikat, pripadni ključ te generira značku vlasništva (engl. *ownership token*), što sve skupa i objavljuje na temu `\$aws/certificates/created/json/accepted`, na koju je uređaj pretplaćen. Razvojni sustav zatim sigurno pohranjuje dobivene vjerodajnice te objavljuje vlastite parametre i dobivenu značku na temu predložka za registraciju. Ako je kreirana, u sustavu AWS zatim se pokreće Lambda funkcija koja obavlja dodatne provjere nad dobivenim parametrima

i tako provjerava valjanost zahtjeva. Primjerice, uređaj pri slanju parametara šalje i hardversku tajnu, koja se može zatim provjeriti u bazi podataka sustava AWS s pohranjenim takvim tajnama i provjeriti valjanost te tajne. Pri uspješnoj provjeri, Lambda funkcija vraća `{"allowProvisioning" : True}`, čime daje konačno zeleno svjetlo za registraciju. Usluga posljedično kreira stvar i pripadnu politiku definiranu u predlošku te aktivira novostvoreni certifikat. Objavljuje novu konfiguraciju specifičnu za uređaj na temu za potvrdu uspješne registracije. Razvojni se sustav, nakon primjene nove konfiguracije, povezuje jedinstvenim privatnim ključem te certifikatom na AWS. Ova se nova MQTT veza dalje koristi za komunikaciju i razmjenu podataka. Ako je prvotno povezivanje neuspješno, aplikacija pokušava spojiti uređaj još dva puta prije nego se spajanje smatra potpuno neuspjelim. U tom slučaju, daljnje akcije čitanja mjerenja i slanja u oblak ne pokreću se jer je spajanje na platformu ključno za ostale radnje, stoga aplikacija izlazi iz glavnog programa. Jedino se ponovnim pokretanjem sustav može ponovno pokušati spojiti na internet i na platformu.



Slika 5.4: Tok registracije uređaja certifikatom zahtjeva [4]

Opisani tok ostvaren je uz pomoć ranije spomenute biblioteke, kao i knjižice *coreMQTT* za komunikaciju putem protokola MQTT s API-jem platforme AWS. Za manipulaciju certifikatima i privatnim ključevima, korištena je biblioteka *corePKCS11*. Ona koristi standard PKCS #11 (engl. *Public-key Certificate Standards*), što je široko korišten API za manipuliranje uobičajenim kriptografskim objektima. Funkcije koje navodi omogućuju aplikacijama korištenje, stvaranje, modificiranje i brisanje kriptografskih objekata, bez izlaganja tih objekata memoriji aplikacije. Primjerice, konkretna integracija s bibliotekom za registraciju uređaja koristi mali podskup PKCS #11 API-ja za, između ostalog, pristup privatnom ključu potrebnom za stvaranje mrežne veze koja je autentificirana i zaštićena protokolom TLS bez da aplikacija ikada dođe u doticaj s ključem [25]. Certifikati zahtjeva te korijenski certifikat platforme AWS pohranjeni su u memoriju tipa SPIFFS (engl. *Serial Peripheral Interface Flash File System*). To je lagani datotečni sustav namijenjen serijskim (SPI) memorijama tipa *flash*. Omogućava mikrokontrolerima korištenje integrirane memorije tipa *flash* za pohranu datoteka na sličan način kao što se koriste datotečni sustavi na običnim računalima. Optimizirana je za česte operacije čitanja i pisanja. Ova vrsta memorije nalik je memoriji tipa EEPROM (engl. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*), no SPIFFS ima značajnije prednosti u odnosu na EEPROM [12]:

- nudi više prostora za pohranu,
- organizira podatke u strukturu datotečnog sustava,
- optimiziran za nasumične operacije čitanja i pisanja,
- posjeduje mehanizme za izjednačavanje trošenja koji pomažu pri ravnomjernoj rasporedi ciklusa pisanja po memoriji tipa *flash*,
- nudi mogućnost upravljanja datotekama.

Sljedeći programski kod prikazuje inicijalizaciju memorije tipa SPIFFS. Ove se funkcije pokreću neposredno prije i nakon registracije uređaja u AWS, budući da je memorija potrebna samo za korištenje certifikata zahtjeva. Novi se certifikati direktno upisuju u objekt modula PKCS, stoga nije potrebno daljnje korištenje ovog datotečnog sustava.

```
esp_vfs_spiffs_conf_t conf = {  
    .base_path = "/spiffs",  
    .partition_label = "spiffs_storage",  
    .max_files = 5,  
    .format_if_mount_failed = true  
};
```

```

void filesystem_init(void)
{
    // Use above settings to init and mount SPIFFS filesystem.
    esp_err_t ret = esp_vfs_spiffs_register(&conf);

    if (ret != ESP_OK) {
        if (ret == ESP_FAIL) {
            ESP_LOGE(TAG, "Failed to mount or format filesystem");
        } else if (ret == ESP_ERR_NOT_FOUND) {
            ESP_LOGE(TAG, "Failed to find SPIFFS partition");
        } else {
            ESP_LOGE(TAG, "Failed to initialize SPIFFS (%s)",
                esp_err_to_name(ret));
        }
        return;
    }

    size_t total = 0, used = 0;
    ret = esp_spiffs_info(conf.partition_label, &total, &used);
    if (ret != ESP_OK) {
        ESP_LOGE(TAG, "Failed to get SPIFFS partition information
            (%s). Formatting...", esp_err_to_name(ret));
        esp_spiffs_format(conf.partition_label);
        return;
    } else {
        ESP_LOGI(TAG, "Partition size: total: %d, used: %d", total
            , used);
    }
}

void filesystem_deinit(void)
{
    esp_vfs_spiffs_unregister(conf.partition_label);
    ESP_LOGI(TAG, "SPIFFS unmounted");
}

```

Isječak koda 5.4: Inicijalizacije memorije tipa SPIFFS

Sljedeći programski odsječak prikazuje uspostavu MQTT sjednice pomoću certifikata zahtjeva te podnošenje zahtjeva za novim certifikatom. Na samom početku najprije se certifikati s definiranom putanjom učitaju u modul PKCS za daljnje korištenje. U odsječku se također može primijetiti binarna serijalizacija podataka. Format CBOR (engl. *Concise Binary Object Representation*) Representation), za razliku od formata JSON, pretvara podatke u binarni oblik i tako ih šalje mrežom, što rezultira manjom latencijom i nosivošću (engl. *payload*) [8]. Pri prijenosu velike količine podataka s ograničenim resursima, kao u IoT sustavima, ušteda na veličini poslanih podataka znatno utječe na efikasnost sustava. Isto tako, binaran je format prilagodljiv u odnosu na JSON, gdje mora postojati unaprijed definirana shema za primitak podataka.

```
/* Insert the claim credentials into the PKCS #11 module */
status = loadClaimCredentials( *p11Session,
    CLAIM_CERT_PATH,
    pkcs11configLABEL_CLAIM_CERTIFICATE,
    CLAIM_PRIVATE_KEY_PATH,
    pkcs11configLABEL_CLAIM_PRIVATE_KEY );
LogInfo( ( "Establishing MQTT session with claim certificate
    ..." ) );
status = EstablishMqttSession( provisioningPublishCallback,
    *p11Session,
    pkcs11configLABEL_CLAIM_CERTIFICATE,
    pkcs11configLABEL_CLAIM_PRIVATE_KEY );
status = subscribeToCsrResponseTopics();
status = generateKeyAndCsr( *p11Session,
    pkcs11configLABEL_DEVICE_PRIVATE_KEY_FOR_TLS,
    pkcs11configLABEL_DEVICE_PUBLIC_KEY_FOR_TLS,
    csr,
    CSR_BUFFER_LENGTH,
    &csrLength );
/* Publish the CSR to CreateCertificatefromCsr API. */
PublishToTopic( FP_CBOR_CREATE_CERT_PUBLISH_TOPIC,
    FP_CBOR_CREATE_CERT_PUBLISH_LENGTH,
    ( char * ) payloadBuffer,
    payloadLength );
status = waitForResponse();
```

Isječak koda 5.5: Spajanje certifikatom zahtjeva i zahtjev za novim certifikatom

5.1.3. Očitavanje senzorskih mjerenja

Razvijeni sustav, osim zaslona, sadrži dva senzora koja mjere stanja iz okoline: senzor za temperaturu i vlagu zraka te senzor za vlažnost tla. Mjerenja ovih senzora šalju se na platformu AWS i simuliraju stvarna poljoprivredna mjerenja. Mjerenje temperature i vlage zraka vrši se pomoću modula DHT11, dok se vlažnost tla mjeri senzorom VMA303. Tablice 5.2 i 5.3 prikazuju konfiguracije spajanja senzora s razvojnim sustavom.

Pin ESP32-C3	Pin DHT11
GND	GND
3.3V	Vcc
GPIO 0	S

Tablica 5.2: Spajanje uređaja i modula DHT11

Pin ESP32-C3	Pin VMA303
GND	GND
3.3V	Vcc
GPIO 2	S

Tablica 5.3: Spajanje uređaja i senzora VMA303

Glavna funkcija senzora DHT11 jest mjerenje temperature i vlažnosti okoline. Senzor je tvornički kalibriran te može mjeriti temperaturu od 0°C do 50°C i vlažnost od 20% do 90% s točnošću od $\pm 1^\circ\text{C}$ i $\pm 1\%$. Senzor uključuje komponentu za mjerenje vlažnosti i NTC (engl. *Negative Temperature Coefficient*) komponentu za mjerenje temperature. DHT11 može se nabaviti kao senzor ili kao modul. Senzor dolazi kao 4-pinski paket od kojeg se koriste samo tri pina, dok modul dolazi s tri pina. Razlika između modula i senzora je u tome što modul ima ugrađeni kondenzator za filtriranje i otpornik za lakše spajanje s razvojnim sustavom [30]. U razvijenom je sustavu korišten modul koji već ima integriran otpornik.

Komunikacija i sinkronizacija između mikrokontrolera i senzora odvija se jednom podatkovnom linijom. Inicijalizacija komunikacije zahtijeva interakciju mikrokontrolera povlačenjem i otpuštanjem signala, čime jedan drugom signaliziraju spremnost na prijenos podataka. Najprije mikrokontroler povlači signal na nisku razinu na najmanje 18 milisekundi, nakon čega otpušta signal i pušta ga da se vrati na visoku razinu te čeka senzor da ga spusti natrag na nisku. DHT11 zatim povlači signal na nisku razinu na otprilike 80 mikrosekundi, nakon čega otpušta signal te se on vraća ponovno na visoku razinu, i taj proces također traje oko 80 mikrosekundi. Po završetku inicijalizacije DHT11 sekvencijalno prenosi 40 podatkovnih bitova, gdje prvi i treći bajt predstavljaju vlagu zraka i temperaturu. Drugi i četvrti bajt sadrže samo nule, a peti je kontrolni zbroj (engl. *checksum*) svih ostalih bajtova na način prikazan u nastavku. Taj zbroj služi kao provjera jesu li ostali bajtovi uspješno poslani.

```
byte_5 == (byte_1 + byte_2 + byte_3 + byte_4) & 0xFF
```

Isječak koda 5.6: Kontrolni zbroj poslanih bajtova s DHT11

Senzor VMA303 mjeri vlažnost tla tako što mjeri pad napona preko dvije elektrode. Senzor u sebi već ima integriran komparator, što nije potrebno spajati dodatnu vanjsku komponentu. Osim elektroda, senzor se sastoji od kontrolnog elektronskog modula koji interpretira signale sa sonde i daje izlaz u digitalnom ili analognom obliku. Kada je sonda ubodena u tlo, metalne elektrode formiraju strujni krug. Vlažno tlo ima veću vodljivost što označava manji otpor, dok suho tlo ima manju vodljivost, time i veći otpor. Kontrolni modul šalje mali električni signal kroz jedan od pinova koji putuje kroz tlo i prima ga drugi pin. Na osnovu količine elektriciteta koji prođe kroz tlo, ovisno o vlažnosti zemlje, modul generira odgovarajući izlazni signal. U analognom načinu rada, modul daje izlazni napon proporcionalan nivou vlažnosti tla. Viša vlažnost rezultira višim naponom na izlaznom pinu, dok niža vlažnost daje niži napon. U slučaju digitalnog izlaza, modul koristi komparator za uspoređivanje izmjerene vrijednosti s unaprijed postavljenim pragom. Ako je vlažnost ispod praga, izlazni pin daje nisku razinu, dok u suprotnom vraća visoku razinu signala.

U razvijenom se sustavu koristi analogni način rada, te je potrebna analogno-digitalna pretvorba za analizu ulaznog signala. Pretvorba se odvija u jednokanalnom načinu rada te se koristi sukcesivna aproksimacija razlučivosti 12 bita. Sljedeći programski isječak prikazuje inicijalizaciju parametara ključnih za čitanje signala i pretvorbu. Vrijednosti *DRY_SOIL* i *WET_SOIL* označavaju najmanju i najveću moguću vrijednost pri mjerenju vlažnosti tla, odnosno 0% i 100%, te se stvarni postotak dobiva skaliranjem na te dvije vrijednosti i pretvaranjem u postotni oblik. Varijable su dobivene eksperimentalnim mjerenjem sirovih vrijednosti pri vlažnoj i suhoj zemlji.

```
void adc_init(void) {
    adc1_config_width(ADC_WIDTH);
}

void moisture_init() {
    adc1_config_channel_atten(MOISTURE_CHANNEL, ADC_ATTEN);
}

float read_moisture(void) {

    int adc_value = adc1_get_raw(MOISTURE_CHANNEL);
```

```

float moisture = 0;

if (adc_value >= WET_SOIL) {
    moisture = 100.0;
} else if (adc_value <= DRY_SOIL) {
    moisture = 0.0;
} else {
    moisture = ((100.0)/((double) DRY_SOIL - (double) WET_SOIL
    ))*((double) (adc_value) - (double) WET_SOIL);
}

return moisture;
}

```

Senzorska mjerenja odvijaju se u posebnom FreeRTOS zadatku koji se pokreće nakon uspješnog povezivanja na Wi-Fi i registracije na platformu. Mjerenja se vrše svakih pet sekundi i prikazuju se na zaslonu. Isti se zadatak koristi i za slanje očitanih podataka nakon čitanja i prikaza. U nastavku je prikazan opisani zadatak. Također, može se primijetiti da isti zadatak pokreće funkciju za ažuriranje sjene uređaja.

```

void publish_message_task(void *pvParameters) {
    float temperature, humidity, moisture;
    esp_err_t dht_temp;
    char display_text[512];

    while (1) {
        dht_temp = dht_read_float_data(SENSOR_TYPE, DHT_PIN, &
        humidity, &temperature) != ESP_OK;
        moisture = read_moisture();

        if (dht_temp == ESP_OK) {
            if (lvgl_port_lock(0)) {
                lv_obj_t *screen = lv_scr_act();
                lv_obj_clean(screen); // Clear the screen
                lv_obj_t *label = lv_label_create(screen);
                lv_label_set_long_mode(label, LV_LABEL_LONG_WRAP);
                sprintf(display_text, "Temp: %.2f C\nHumid: %.2f%\n
                nMoist: %.2f%", temperature, humidity, moisture);
                lv_label_set_text(label, display_text);
            }
        }
    }
}

```

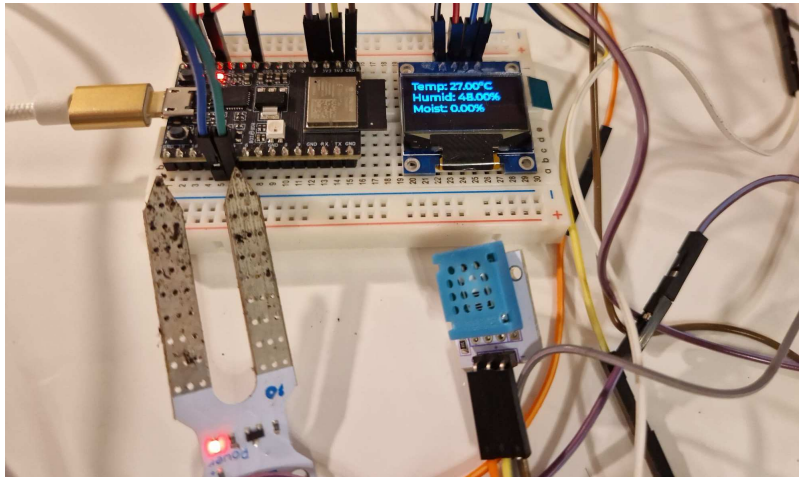
```

        // Release the mutex
        lvgl_port_unlock();
    }
    sendMessage(temperature, humidity, moisture);
    color_name = device_shadow_main();
}
vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(5000));
}
}

```

Isječak koda 5.7: FreeRTOS zadatak za očitavanje senzorskih mjerenja i slanje podataka

Slika 5.5 prikazuje razvojni sustav ESP32-C3 spojen na periferne senzore te LCD zaslon. Isto tako, na zaslonu su vidljiva očitavanja dobivena sa senzora.



Slika 5.5: Razvojni sustav sa spojenom periferijom

5.1.4. Slanje očitanih podataka protokolom MQTT

Kao što je ranije spomenuto, slanje očitanih podataka odvija se u istom zadatku odnosno dretvi kao i očitavanje mjerenja, neposredno nakon dohvata vrijednosti. Slanje se odvija na temelju ranije ostvarene MQTT veze i razmijenjenim certifikatima. Podaci se šalju u formatu JSON radi jednostavnije kasnije obrade i čitljivosti pri primitku poruka. Za kreiranje podatkovne strukture za slanje korištena je biblioteka *cJSON*. To je lagana i brza biblioteka za rukovanje podacima u obliku JSON namijenjena programskom jeziku C. Omogućava lako parsiranje, generiranje i manipulaciju JSON objekata te podržava sve tipove vrijednosti. Zbog jednostavne i optimizirane implementacije, nudi visoke performanse. Isto tako, ne oslanja se ni na kakve vanjske biblioteke, što je

čini portabilnom u svim aplikacijama. Sljedeći programski isječak prikazuje funkcije za pripremanje objekta i njegovo slanje protokolom MQTT. Tema na koju šalje uređaj jest `device/{clientId}/data`, gdje je identifikator zapravo serijski naziv uređaja. Time je osigurano da svaki uređaj šalje na točno odgovarajuću temu. Koristi se kvaliteta usluge 0 (engl. *Quality of Service - QoS*) bez potvrde prijema jer se podaci šalju svakih pet sekundi, a senzorska mjerenja se ne mijenjaju drastično u tako kratkom periodu, stoga si razvijeni sustav može priuštiti povremeni gubitak poruka. Ovim se načinom također štedi vrijeme čekanja i resursi koji su korištenom razvojnom sustavu potrebni.

```
void prepareJSONMessage(float temperature, float humidity,
    float moisture, uint8_t *buffer, size_t *length) {
    // Create the main JSON object
    cJSON *jsonObject = cJSON_CreateObject();

    struct timeval now;
    gettimeofday(&now, NULL);
    int64_t time_in_ms = (int64_t)now.tv_sec * 1000 + now.
        tv_usec / 1000;
    cJSON_AddNumberToObject(jsonObject, "timestamp", time_in_ms)
        ;

    cJSON_AddStringToObject(jsonObject, "device_id",
        CLIENT_IDENTIFIER);

    // Create a nested JSON object for data
    cJSON *dataObject = cJSON_CreateObject();
    cJSON_AddNumberToObject(dataObject, "temperature",
        temperature);
    cJSON_AddNumberToObject(dataObject, "humidity", humidity);
    cJSON_AddNumberToObject(dataObject, "moisture", moisture);

    // Add the data object to the main JSON object
    cJSON_AddItemToObject(jsonObject, "data", dataObject);

    // Print the JSON object to a string
    char *jsonString = cJSON_PrintUnformatted(jsonObject);
```

```

    // Copy the JSON string to the buffer and set the length
    *length = strlen(jsonString);
    memcpy(buffer, jsonString, *length);

    // Clean up
    cJSON_Delete(jsonObject);
    cJSON_free(jsonString); // free the allocated string
}

void sendMessage(float temperature, float humidity, float
    moisture) {
    prepareJSONMessage(temperature, humidity, moisture,
        payloadBuffer, &payloadLength);
    bool status = false;

    status = PublishToTopic( MQTT_DATA_TOPIC,
        MQTT_DATA_TOPIC_LENGTH,
        ( char * ) payloadBuffer,
        payloadLength );

    if( status == false )
    {
        LogError( ( "Failed to publish to topic: %.*s.",
            MQTT_DATA_TOPIC_LENGTH,
            MQTT_DATA_TOPIC ) );
    }
}

```

Isječak koda 5.8: Funkcije za pripremanje JSON objekta i njegovo slanje protokolom MQTT

Iz prve funkcije vidljivo je da uređaj u JSON objekt pohranjuje očitane vrijednosti temperature, vlage zraka te vlažnosti tla. Također, šalje identifikator uređaja kako bi se naznačilo koji uređaj šalje podatke. Isto tako, šalje se i vremenska oznaka, što je pogodno za buduću obradu i analizu podataka. Budući da mikrokontroler interno mjeri vrijeme od početka prvog pokretanja nakon instalacije *firmwarea*, potrebno je sinkronizirati njegov interni sat s lokalnim vremenom. Kako bi se osigurano točno vrijeme, mikrokontroler se povezuje na SNTP poslužitelj. Protokol SNTP (engl. *Simple Network Time Protocol*) jest protokol koji omogućava uređajima da se sinkroniziraju

s mrežnim vremenskim poslužiteljima kako bi dobili precizno vrijeme [22]. Budući da je uređaj ranijim procesima već spojen na Wi-Fi, potrebno je korištenjem gotove biblioteke tvrtke *Espressif* spojiti se na poslužitelj te dohvatiti trenutno vrijeme i sinkronizirati vlastito u skladu s dohvaćenim. Uređaj se spaja na `pool.ntp.org` što je domensko ime za globalni mrežni projekt koji pruža vremenske poslužitelje za sinkronizaciju vremena putem protokola NTP (engl. *Network Time Protocol*). Ovu je sinkronizaciju potrebno napraviti samo jednom, i to nakon spajanja na internet. Sljedeći programski isječak prikazuje funkciju koja se spaja na poslužitelj i obavlja sinkronizaciju. Ugrađen je i mehanizam pokušaja ponovnog spajanja svake dvije sekunde u najviše deset iteracija ukoliko prvotno spajanje i dohvat nisu uspješni.

```
void initialize_sntp(void)
{
    ESP_LOGI(TAG, "Initializing SNTP");
    esp_sntp_setoperatingmode(SNTP_OPMODE_POLL);
    esp_sntp_setservername(0, "pool.ntp.org");
    sntp_set_time_sync_notification_cb(time_sync_notification_cb);
    esp_sntp_init();
}

void obtain_time(void)
{
    initialize_sntp();

    // Wait for time to be set
    time_t now = 0;
    struct tm timeinfo = { 0 };
    int retry = 0;
    const int retry_count = 10;

    while (timeinfo.tm_year < (2024 - 1900) && ++retry <
           retry_count) {
        ESP_LOGI(TAG, "Waiting for system time to be set... (%d/%d)",
                  retry, retry_count);
        vTaskDelay(2000 / portTICK_PERIOD_MS);
        time(&now);
        localtime_r(&now, &timeinfo);
    }
}
```

```

    }

    if (retry < retry_count) {
        ESP_LOGI(TAG, "Time synchronized successfully");
    } else {
        ESP_LOGE(TAG, "Failed to synchronize time");
    }
}
}

```

Isječak koda 5.9: Funkcije za sinkronizaciju vremena s SNTP poslužiteljem

Nakon generiranja JSON objekta, ovako izgleda konačan objekt koji uređaj šalje AWS-u:

```

{
  "timestamp": 123456789,
  "device_id": "serialNumber123",
  "data": {
    "temperature": 23.00,
    "humidity": 55.00,
    "moisture": 62.00
  }
}

```

Isječak koda 5.10: JSON objekt za slanje na platformu

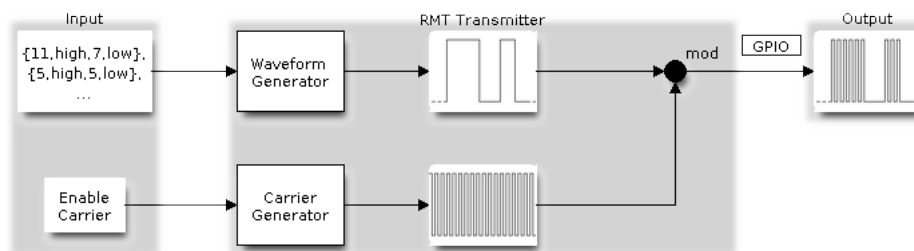
5.1.5. Sjena uređaja

Budući da nije kreirana nikakva dodatna aplikacija koja bi koristila sjenu uređaja i tražila zahtjev za promjenom stanja odnosno sjene, uređaj sam sebi šalje zahtjev za promjenom i isto tako šalje i ažurirano stanje. Promjenjivo stanje uređaja simulirano je bojom LED diode koja konstantno treperi periodom od dvije sekunde.

LED dioda integrirana je u razvojni sustav i vrsta je adresirajuće LED diode. Takve diode mogu se pojedinačno kontrolirati unutar trake ili matrice, čime su omogućeni složeni svjetlosni efekti i uzorci. Za razliku od običnih LED dioda koje se mogu samo uključiti ili isključiti, adresirajuće LED diode imaju integrirane upravljačke čipove koji omogućuju svakom pikselu u traci da primi jedinstvenu naredbu [10]. Pri upravljanju LED diodom, koristi se način rada RMT (engl. *Remote Control Transceiver*). To je periferni sklop koji služi kao infracrveni primopredajnik. Međutim, zbog fleksibilnosti

formata podataka, RMT se može proširiti na svestrani primopredajnik opće namjene, koji odašilje ili prima i druge vrste signala. Iz perspektive slojevitosti mreže, hardver sadrži i fizički i sloj podatkovne veze. Fizički sloj definira komunikacijski medij i reprezentaciju signala bita, dok sloj podatkovne veze definira format RMT okvira. Ovaj periferni sklop koristi se za generiranje i dekodiranje nizova impulsa, što ga čini prikladnim za zadatke koji uključuju precizno mjerenje vremena, kao što je pokretanje adresirajućih LED dioda. One zahtijevaju striktno vremensko određivanje kako bi ispravno protumačile podatkovne signale [18].

RMT hardver ima vlastiti format uzorak podataka zvan RMT simbol. Svaki simbol sastoji se od dva para po dvije vrijednosti. Prva vrijednost u paru je 15-bitna vrijednost koja predstavlja trajanje signala u jedinicama RMT taktova. Druga u paru je 1-bitna vrijednost koja predstavlja logičku razinu signala, tj. visoku ili nisku. Slika 5.6 prikazuje način na koji funkcionira RMT odašiljač. Upravljački program kodira korisničke podatke u format podataka tipa RMT, i zatim odašiljač može generirati valne oblike prema artefaktima kodiranja. Također je moguće modulirati visokofrekventni nosivi signal prije usmjeravanja na GPIO izlaze.



Slika 5.6: Pregled RMT odašiljača [18]

Sljedeći programski isječak prikazuje konfiguraciju LED diode kao i zadatak koji vrši treperenje. Koristi se biblioteka *led_strip*, što je službeni upravljački program (engl. *driver*) za adresirajuće LED diode u modulima ESP32. Konfiguraciji se pridjeljuje GPIO pin na kojem se nalazi dioda te se postavlja razlučivost RMT signala na 10 MHz. Ovo određuje vremensku preciznost signala poslanih LED diodi. Isto tako, moguće je koristiti izravan pristup memoriji (engl. *Direct Memory Access - DMA*), no u ovom slučaju nije potreban. U glavnom je programu kreiran poseban FreeRTOS zadatak za treperenje LED diode. Kreirana je posebna struktura `color_t` koja predstavlja boju u RGB formatu i odabrana se boja prosljeđuje funkciji `blink_led()`. Također, kreirana je posebna funkcija koja na temelju tekstualne riječi boje generira boju u RGB formatu. U razvijenom sustavu podržane su sljedeće boje: crvena, zelena, plava, žuta,

ljubičasta i bijela. Parametar `color_name` globalna je varijabla koja se postavlja u zadataku koji izvršava slanje poruka i ažuriranje sjene uređaja.

```
typedef struct {
    uint8_t r;
    uint8_t g;
    uint8_t b;
} color_t;

static void configure_led()
{
    led_strip_config_t strip_config = {
        .strip_gpio_num = BLINK_GPIO,
        .max_leds = 1, // at least one LED on board
    };
    led_strip_rmt_config_t rmt_config = {
        .resolution_hz = 10 * 1000 * 1000, // 10MHz
        .flags.with_dma = false,
    };
    ESP_ERROR_CHECK(led_strip_new_rmt_device(&strip_config, &
        rmt_config, &led_strip));
    led_strip_clear(led_strip);
}

static void blink_led(uint8_t s_led_state, color_t color)
{
    if (s_led_state) {
        led_strip_set_pixel(led_strip, 0, color.r, color.g, color.
            b);
        led_strip_refresh(led_strip);
    } else {
        led_strip_clear(led_strip);
    }
}

void blinky_task(void *pvParameters) {
    uint8_t s_led_state = 0;
    color_t color;
```

```

configure_led();

while (1) {
    if (s_led_state == true) {
        color = get_color_from_string(color_name);
    }

    blink_led(s_led_state, color);
    s_led_state = !s_led_state;
    vTaskDelay(1000 / portTICK_PERIOD_MS);
}
}

```

Isječak koda 5.11: Upravljanje LED diodom

Kao što je ranije spomenuto, uređaj najprije generira zahtjev za promjenom stanja, odnosno pošalje željeno stanje AWS-u i na temelju tog zahtjeva mijenja stvarno stanje i prijavljuje ga. Željeno je stanje nasumičan odabir jedne od ranije navedenih boja u tekstualnom obliku. Razvijeni sustav koristi samo jednu sjenu uređaja, i to klasičnu. Svaka tema vezana za sjenu uređaja povezana je sa stvari odnosno njezinim imenom, te se slanjem na pojedinačne teme podrazumijeva da je u temu integriran naziv stvari o čijoj se sjeni uređaja radi. Funkcionalnost sjene uređaja funkcionira na sljedeći način: najprije, uređaj pokušava obrisati sjenu ako postoji. Za to se mora pretplatiti na teme */delete/accepted* i */delete/rejected* te objaviti na temu *delete* i primiti poruke na pretplaćenim temama. Brisanje se smatra uspješnim u ova dva slučaja:

- poruka je stigla na temu */delete/accepted*,
- poruka je stigla na temu */delete/rejected* s greškom 404, što znači da pri pokušaju brisanja sjena uređaja ne postoji.

Uređaj se nakon uspješnog brisanja odjavljuje s pretplaćenih tema i prijavljuje se na teme za ažuriranja sjene uređaja. Zatim uređaj nasumično generira boju koja će predstavljati željeno stanje uređaja i šalje je na temu */update*, na koju je ujedno i pretplaćen. Ta ista poruka stigne na pretplaćenu temu i uređaj ažurira trenutnu boju LED diode u diodu željenog stanja i zatim šalje prijavljeno stanje na platformu. Verzije sjene uređaja automatski se povećavaju za jedan. Isto tako, svaki zahtjev ima vlastiti klijentski token koji je postavljen na serijski broj uređaja. Time je osigurano da se sjene različitih uređaja ne miješaju, nego da uređaj samom sebi šalje zahtjev. Po primitku željene poruke, program provjerava odgovara li klijentski token vlastitom tokenu, te u

tom slučaju odobrava promjenu stanja, mijenja boju LED diode i šalje platformi novo prijavljeno stanje. Sljedeći programski isječak prikazuje skraćenu verziju opisanog procesa pretplate, brisanja sjene, odjave, ponovne pretplate te objave ažuriranja sjene uređaja. Iz isječka se može vidjeti da se, za razliku od slanja podataka, proces komunikacije s platformom vezano za sjenu uređaja odvija kvalitetom usluge QoS1, što znači da sustav čeka odgovor na poruku. Time se osigurava da će se stanje stvarno ažurirati na novu vrijednost.

```
LogInfo( ( "Sub to `/delete/accepted` and `/delete/rejected`  
    topics." ) );  
status = SubscribeToTopic( SHADOW_TOPIC_STR_DELETE_ACC(  
    THING_NAME, SHADOW_NAME ),  
    SHADOW_TOPIC_LEN_DELETE_ACC( THING_NAME_LENGTH,  
    SHADOW_NAME_LENGTH ) );  
status = SubscribeToTopic( SHADOW_TOPIC_STR_DELETE_REJ(  
    THING_NAME, SHADOW_NAME ),  
    SHADOW_TOPIC_LEN_DELETE_REJ( THING_NAME_LENGTH,  
    SHADOW_NAME_LENGTH ) );  
LogInfo( ( "Publish to `delete` topic to try to delete the  
    shadow doc." ) );  
status = PublishToTopicQoS1( SHADOW_TOPIC_STR_DELETE(  
    THING_NAME, SHADOW_NAME ),  
    SHADOW_TOPIC_LEN_DELETE( THING_NAME_LENGTH,  
    SHADOW_NAME_LENGTH ),  
    updateDocument,  
    0U );  
  
/* Unsubscribe from topics... */  
/* Subscribe to /update/delta topics... */  
  
LogInfo( ( "Send desired color." ) );  
( void ) memset( updateDocument,  
    0x00,  
    sizeof( updateDocument ) );  
  
const char* randomColor = get_random_color_string();  
  
snprintf( updateDocument,
```



```

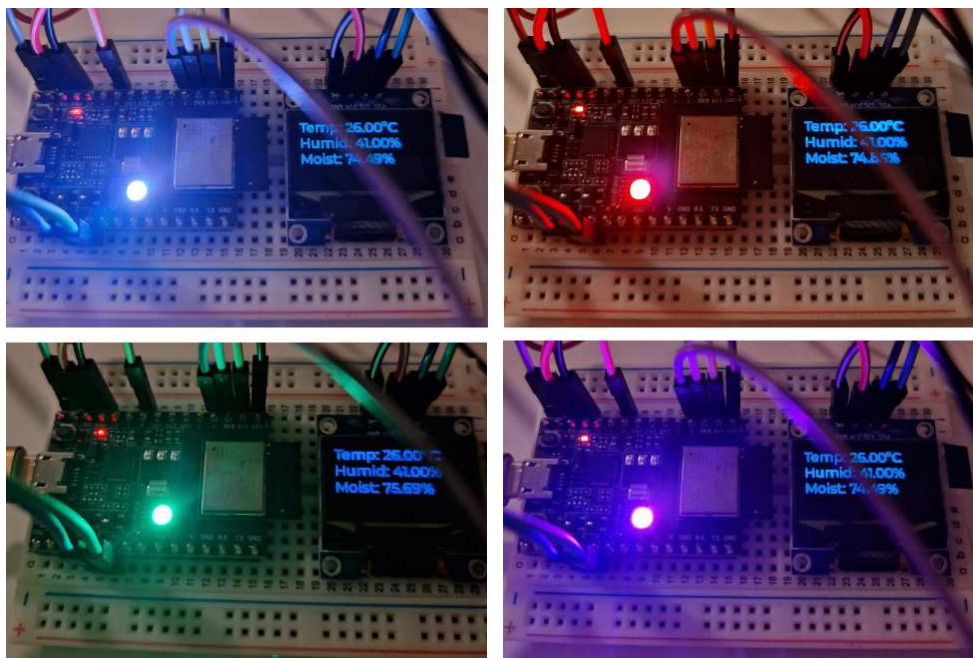
SHADOW_DESIRED_JSON_LENGTH + 1,
SHADOW_DESIRED_JSON,
randomColor,
clientToken );

status = PublishToTopicQoS1( SHADOW_TOPIC_STR_UPDATE(
    THING_NAME, SHADOW_NAME ),
    SHADOW_TOPIC_LEN_UPDATE( THING_NAME_LENGTH,
        SHADOW_NAME_LENGTH ),
    updateDocument,
    ( SHADOW_DESIRED_JSON_LENGTH + 1 ) );

```

Isječak koda 5.12: Proces ažuriranja sjene uređaja

Slika 5.7 prikazuje nekoliko različitih boja LED diode koje se kontroliraju sjenom uređaja.



Slika 5.7: Različite boje LED diode

5.1.6. Ažuriranje softvera

Programska potpora za ažuriranje softvera koristi OTA biblioteku u sklopu ranije spomenutog razvojnog paketa za integraciju platforme AWS i ESP32 uređaja. Koristi se protokol HTTP za primanje datoteke ažuriranja radi manjeg konflikta s postojećom

programskom potporom koja koristi MQTT za slanje poruka i sjenu uređaja. Za dodatno korištenje MQTT veze, bilo bi potrebno uvesti mehanizam dretvi i semafora radi sinkronizacije događaja i MQTT veze.

Za korištenje OTA funkcionalnosti potrebno je kreirati dodatne particije na uređaju. Koriste se dvije aplikacijske particije, što omogućava uređaju da zadrži radnu verziju *firmwarea* dok se novi preuzima i instalira na drugu particiju. Na taj način, ako dođe do problema tijekom preuzimanja ili instalacije novog softvera, uređaj se može sigurno vratiti na prethodnu verziju (engl. *rollback*) i nastaviti rad bez prekida. Također, dodatna particija omogućava neometan rad trenutnog programa dok se novi preuzima u pozadini, pogotovo u slučajevima loše mreže ili velike količine podataka. To smanjuje i vrijeme neaktivnosti. Nadalje, potrebna je i treća particija koja je podatkovna. Ona se koristi za čuvanje metapodataka vezanih za OTA ažuriranja. Ti podaci uključuju informacije kao što su trenutno aktivna aplikacija odnosno koja se particija koristi, status posljednjeg ažuriranja, te informacije potrebne za odlučivanje o prebacivanju između particija nakon ponovnog pokretanja uređaja. Kad se novo ažuriranje preuzme i instalira na drugu particiju, podatkovna se particija ažurira s informacijama koju particiju treba učiti pri sljedećem pokretanju. Tako uređaj može zaključiti koju particiju treba koristiti pri ponovnom pokretanju. Isto tako, ova particija može sadržavati informacije o verifikaciji integriteta i valjanosti novog *firmwarea*. Primjerice, može sadržavati digitalne potpise koji se koriste je li novi softver ispravno preuzet i da nije modificiran.

Tablica 5.4: Particije na uređaju

Ime	Vrsta	Podvrsta	Pomak	Veličina
<i>nvs</i>	data	nvs	0x9000	24K
<i>storage</i>	data	nvs		16K
<i>phy_init</i>	data	phy		4K
<i>factory</i>	app	factory		1800K
<i>spiffs_storage</i>	data	spiffs		960K
<i>otadata</i>	data	ota		8K
<i>ota_0</i>	app	ota_0		500K
<i>ota_1</i>	app	ota_1		500K

Tablica 5.4 prikazuje sve particije na uređaju, njihove vrste i veličine. Osim ranije opisanih particija potrebnih za OTA ažuriranja, tu se nalazi još nekoliko particija neophodnih za rad sustava. Navedene su i ranije opisane particije memorija tipa NVS i SPIFFS. Particija *factory* služi za pohranu osnovnog *firmwarea* koji je inicijalno pro-

gramiran na uređaj. Particija *phy_init* koristi se za pohranu konfiguracijskih podataka fizičkog sloja (engl. *Physical Layer - PHY*). Odnosi se na fizičke karakteristike bežične komunikacije poput kalibracijskih parametara i postavki za Wi-Fi. Particija NVS koristi se za pohranu Wi-Fi vjerodajnica, a posljednja particija *storage* također je vrsta memorije tipa NVS, no koristi se za pohranu novodobivenih certifikata od AWS-a. Kada se zbroje veličine svih particija, iznos je jednak otprilike 4 MB, što je jednako veličini memorije tipa *flash* na uređaju ESP32-C3. Budući da su particije za OTA softver znatno manje nego izvorna memorija, primljeno ažuriranje mora biti manjeg opsega u odnosu na izvorni *firmware*.

Iako se u razvijenom sustavu koristi HTTP za OTA ažuriranje, i dalje je potrebna MQTT veza. Razvojni sustav mora se pretplatiti na sve teme iz isječaka 4.6. i 4.7. radi upravljanje OTA procesom, uključujući primanje obavijesti o novim ažuriranjima, praćenje statusa preuzimanja i instalacije, te prijavljivanje grešaka. Protokol HTTP koristi se isključivo za preuzimanje softvera. Budući da se koriste oba protokola, potrošnja memorije je nešto veća.

Kao što je spomenuto u ranijem poglavlju, OTA agent služi za pojednostavljenje OTA ažuriranja. Agent funkcionira kao kompleksan proces koji omogućuje sigurno i pouzdano ažuriranje softvera preko mreže. Pretplaćuje na teme poslova kako bi pratio nadolazeća ažuriranja i obavijesti o novim OTA zadacima. Kada primi poruku, agent provjerava sadržaj zadatka, uključujući provjeru integriteta i autentičnosti dobivene datoteke pomoću digitalnih potpisa koja se vrši lokalno pohranjenim certifikatom. Taj certifikat mora biti jednak certifikatu koji je korišten za potpisivanje dobivene datoteke. Generiran je lokalno na računalu pomoću biblioteke *OpenSSL* i isto tako kasnije korišten za potpis datoteke u oblaku. Za generiranje certifikata i njemu pripadnog privatnog ključa korišten je algoritam ECDSA (engl. *Elliptic Curve Digital Signature Algorithm*). Kada je zadatak potvrđen, agent koristi protokol HTTP za preuzimanje softvera sa specificiranog URL-a. Tijekom preuzimanja, agent provjerava integritet koristeći *hash* algoritme. *Firmware* se preuzima u jednu od OTA particija te nakon kompletnog preuzimanja, agent još jednom provjerava integritet cijele datoteke prije nego nastavi s instalacijom. Ako je novi kod valjan, konfigurira program za pokretanje uređaja (engl. *bootloader*) da koristi novu particiju pri idućem pokretanju. Naposljetku ponovno pokreće uređaj da se pokrene nova verzija softvera. Tokom cijelog opisanog procesa, agent paralelno šalje statuse natrag platformi putem MQTT veze. Poruke uključuju informacije o početku preuzimanja, napretku, uspjehu ili neuspjehu preuzimanja te instalaciji.

Sljedeći programski isječak prikazuje pokretanje OTA agenta. Veći dio funkcional-

nosti OTA agenta integriran je u korištenu biblioteku koja interno obavlja rad agenta. Funkcija radi na sljedeći način:

1. inicijalizira se OTA agent,
2. pokrene se petlja koja omogućuje OTA ažuriranje i vraća statistiku o primljenim paketima svake sekunde,
3. u slučaju prekida MQTT veze, obustavljaju se sve operacije OTA agenta.

```
/* Set OTA Library interfaces.*/
setOtaInterfaces( &otaInterfaces );

/* Set OTA Code Signing Certificate */
otaPal_SetCodeSigningCertificate( pcAwsCodeSigningCertPem );

/* Init OTA Library. */
otaRet = OTA_Init( &otaBuffer,
&otaInterfaces,
( const uint8_t * ) ( CLIENT_IDENTIFIER ),
otaAppCallback );

/* Create OTA Task. */
pthread_create( &threadHandle, NULL, otaThread, NULL )

/* OTA Demo loop. */

/* Wait till OTA library is stopped, output statistics for
   currently running
   * OTA job */
while( ( ( state = OTA_GetState() ) != OtaAgentStateStopped )
)
{
    /* Loop to receive packet from transport interface. */
    mqttStatus = MQTT_ProcessLoop( &mqttContext );

    if( ( mqttStatus == MQTTSuccess ) || ( mqttStatus ==
MQTTNeedMoreBytes ) )
    {
        /* Get OTA statistics for currently executing job. */
```

```

    OTA_GetStatistics( &otaStatistics );

    LogInfo( ( " Received: %"PRIu32"    Queued: %"PRIu32"
Processed: %"PRIu32"    Dropped: %"PRIu32",
    otaStatistics.otaPacketsReceived,
    otaStatistics.otaPacketsQueued,
    otaStatistics.otaPacketsProcessed,
    otaStatistics.otaPacketsDropped ) );

    Clock_SleepMs( OTA_EXAMPLE_LOOP_SLEEP_PERIOD_MS );
}

if (mqttSessionEstablished != true)
{
    /* Suspend OTA operations. */
    otaRet = OTA_Suspend();
}
}

/* Wait for OTA Thread. */
returnJoin = pthread_join( threadHandle, NULL );

```

Isječak koda 5.13: Rad OTA agenta

Kao što je opisano, po primitku MQTT poruke o dostupnom ažuriranju, kreira se HTTP zahtjev za dohvatom novog softvera. Uređaj koristi URL adržan u MQTT poruci kako bi započeo preuzimanje novog koda. Koristi se GET zahtjev za preuzimanje datoteke, a URL može biti poveznica na AWS S3 pohranu ili pak neki drugi poslužitelj koji je postavljen za distribuciju *firmwarea*. U ovom slučaju, koristi se AWS S3 za dohvat datoteke. Odgovor na zahtjev jest datoteka koja se preuzima u segmentima. Sljedeći isječak prikazuje kreiranje zahtjeva te spajanje na S3 odakle će se preuzeti datoteka. Funkcija za obradu primljenog odgovora `handleHttpResponse()` stavlja događaj u međuspremnik odakle će agent preuzeti zadatak.

5.2. Programska potpora za oblak

Programska potpora za platformu AWS većim dijelom nije kod u standardnom smislu, no kako bi se uređaj i platforma uopće mogli komunicirati međusobno, potrebno je

omogućiti povezivanje i komunikaciju na samoj platformi. Sva se komunikacija odvija u istoj AWS regiji. Zbog dostupnosti većine IoT usluga i relativne geografske bliskosti, korištena je regija *eu-north-1* odnosno Stockholm, Švedska.

Isto tako, važno je istaknuti kako se sve opisane radnje u sustavu AWS mogu izvršavati pomoću naredbenog retka platforme AWS (engl. *Command-line interface - CLI*), no radi jednostavnosti i preglednosti, korišteno je korisničko sučelje platforme.

Programska potpora sastoji se od sljedećih segmenata:

- omogućavanje dinamičke registracije uređaja,
- slanje novog softvera na uređaj,
- pristup zadnjem stanju uređaja nakon gubitka veze,
- obrada podataka dobivenih protokolom MQTT,
- pohrana podataka.

5.2.1. Dinamička registracija uređaja

Kao što je ranije opisano, u razvijenom sustavu koriste se certifikati zahtjeva za prvotno spajanje na platformu AWS, stoga je potrebno kreirati odgovarajući predložak za registraciju. Predložak također mora imati dodijeljenu politiku koja autorizira certifikat zahtjeva i ta se politika dodjeljuje generiranim certifikatima zahtjeva. Odabiru se politike koje omogućavaju točno onoliko koliko je potrebno za spajanje u sustav, a to su dopuštenja za MQTT komunikaciju i spajanje na AWS. Također, potrebno je odabrati koji su certifikati valjani kao zahtjev. Poželjno je i dodijeliti Lambda funkciju kao predregistracijsku provjeru dodatne valjanosti zahtjeva i poslanih parametara. Za razvijeni sustav nije kreirana Lambda funkcija, što znači da je svaki zahtjev automatski odobren. Isto tako, moguće je automatski pri registraciji uređaja kreirati i pripadnu stvar (engl. *thing*), što je korisno za kasniju organizaciju i pregled certifikata. Svaka stvar može imati modularan naziv, ovisno o parametrima koji se pošalju. Za ovaj sustav postavljen je prefiks *ESP32Thing_* koji označava da su uređaji vrste ESP32, a ostatak naziva stvari ovisi o serijskom broju samog uređaja. To osigurava da svaki uređaj kreira jedinstvenu stvar u AWS-u. Moguće je odabrati i vrstu stvari (engl. *thing type*) koja će se automatski pridijeliti stvari, te u ovom slučaju kreirana je nova vrsta stvari naziva ESP32-C3. Stvarima se može dodijeliti i grupa, no u ovom sustavu nije bilo potrebe za kreiranjem dodatne grupe stvari budući da se povezuje samo jedna vrsta uređaja u sustav. Naposljetku, potrebno je odabrati koje će se politike dodijeliti novogeneriranom jedinstvenom certifikatu, čime će uređaj dobiti pristup uslugama sustava

AWS. Odabrane politike u ovom sustavu imaju sva dopuštenja radi lakše demonstracije funkcionalnosti. U nastavku se može vidjeti isječak kreiranog predloška, odnosno parametri stvari koja se kreira korištenjem predloška. U odsječku se isto tako može vidjeti funkcija za kreiranje imena stvari koja koristi predefinirani prefiks i serijski broj uređaja.

```
"thing": {
  "Type": "AWS::IoT::Thing",
  "OverrideSettings": {
    "AttributePayload": "MERGE",
    "ThingGroups": "DO_NOTHING",
    "ThingTypeName": "REPLACE"
  },
  "Properties": {
    "AttributePayload": {},
    "ThingGroups": [],
    "ThingName": {
      "Fn::Join": [
        "",
        [ "ESP32Thing_", { "Ref": "SerialNumber" } ]
      ]
    },
    "ThingTypeName": "ESP32-C3"
  }
}
```

Isječak koda 5.14: Odjeljak *stvar* u predlošku za registraciju

Na slici 5.8 nalazi se popis politika koje su dodijeljene uređaju registriranom u sustav. Omogućene su sve politike, odnosno dodijeljene su sve dozvole koje uređaj može imati. Politika *DevicePolicy* odnosi se na komunikaciju MQTT protokolom, *DeviceShadowPolicy* na akcije vezane uz sjenu uređaja, *JobPolicy* na izvršavanje i dohvat poslova te *CertificatePolicy* dozvoljava povezivanje certifikatom.

5.2.2. Obrada i pohrana dobivenih podataka

Podaci poslani protokolom MQTT u ranije prikazanom formatu JSON šalju se platformi na određenu temu definiranu serijskim nazivom uređaja. Svi se podaci šalju sigurno uspostavljenom vezom na vrata 8883 i krajnju točku brokera koju AWS gene-

Policies (4) Info	
AWS IoT policies allow you to control access to the AWS IoT Core data plane operations.	
<input type="checkbox"/>	Name
<input type="checkbox"/>	JobPolicy
<input type="checkbox"/>	DeviceShadowPolicy
<input type="checkbox"/>	DevicePolicy
<input type="checkbox"/>	CertificatePolicy

Slika 5.8: Popis politika dodijeljenih registriranom uređaju

rira ovisno o regiji kojoj se šalju podaci. Korištenjem testnog klijenta koji nudi AWS i pretplatom na željene teme moguće je u stvarnom vremenu pratiti podatke koji uređaj šalje.

Primljeni se podaci moraju pohraniti u bazu podataka kako bi se kasnije mogli koristiti za pregled i analizu. AWS nudi uslugu preusmjerenja poruka (engl. *message routing*) protokom podataka između povezanih uređaja i aplikacija. Koristi pravila za usmjeravanje (engl. *rules engine*) kako bi obradila i preusmjerila poruke koje dolaze s uređaja prema drugim uslugama ili vanjskim krajnjim točkama. Moguće je usmjeriti poruke izravno prema sustavima za pohranu koji se nude u sklopu AWS usluga, no isto tako i prema Lambda funkcijama koje mogu vršiti detaljniju obradu podataka. Pravila usmjeravanja definiraju se SQL upitima nad MQTT temama, čime se omogućava filtriranje, transformacija i usmjeravanje podataka na osnovu specifičnih kriterija. Upitima je moguće izdvojiti specifična polja iz JSON poruka ili pak računati nove vrijednosti na temelju dobivenih.

Svaka ruta mora imati jedinstveno ime te upit kojim se dohvaćaju podaci. Upit je standardan SQL upit, no izvor podataka je tema na koju dolaze poruke u AWS. Unutar tema također je moguće koristiti i zamjenske znakove (engl. *wildcards*) kako bi upit odgovarao više tema. U razvijenom sustavu korišten je upit koji obuhvaća sve teme na koje uređaji šalju svoje podatke, neovisno o serijskom broju uređaja. Upit se nalazi u sljedećem odlomku koda.

```
SELECT * FROM 'device/+/data'
```

Isječak koda 5.15: SQL upit rute za podatke s uređaja

Nadalje, potrebno je odabrati kamo će se odabrani podaci slati. Dobivene je podatke moguće slati u zapise (engl. *logs*), metrike, u baze podataka unutar AWS-a, na

novu MQTT temu, ili pak preusmjeriti podatke Lambda funkciji. Iako AWS nudi direktno slanje u baze podataka, poput baze DynamoDB, ovo rješenje nije odabrano zbog kompliciranog dohvata podataka i njihove vizualizacije u korištenoj web aplikaciji. Stoga se podaci preusmjeravaju na Lambda funkciju koja vrši daljnju obradu i slanje podataka u bazu.

Još jedna od usluga platforme AWS jest Amazon Timestream koja nudi potpuno upravljane baze podataka vremenskih serija za radna opterećenja od upita niske latencije pa sve do unosa velikih podataka. Usluga je namijenjena podacima koji sadrže vremensku oznaku za analizu vremenskih serija. Automatski skalira kapacitet prema potrebi, čime omogućava rukovanje mnoštvom podataka bez ručnog dodavanja resursa. Arhitektura je dizajnirana tako da omogućava brzi unos i pokretanje upita, pružajući visoku propusnost i nisku latenciju. Također, automatizira procese arhiviranja i upravljanja podacima. Korisnici mogu definirati politike zadržavanja podataka kako bi se stari podaci automatski premjestili u jeftinijem i sporijem spremniku za pohranu, dok noviji podaci ostaju u pohrani brzog pristupa. Time se optimiziraju troškovi i performanse bez ručne intervencije. U sklopu usluge Amazon Timestream nude se dvije baze podataka vremenskih serija: LiveAnalytics i InfluxDB. Baza LiveAnalytics primarno je namijenjena podacima koji zahtijevaju detaljnu analizu i praćenje velike količine podataka u stvarnom vremenu. Ima ugrađene analitičke funkcije za praćenje trendova i uzoraka. Isto tako, pogodna je za pohranu zapisa i događaja. InfluxDB je baza podataka otvorenog koda, što je čini fleksibilnijom pri konfiguraciji u odnosu na LiveAnalytics. Baza je pogodna za pohranu metrika i očitavanja s IoT uređaja [4]. Kao što je opisano, obje baze podataka pripadaju skupini baza vremenskih serija, koje spadaju u skupinu NoSQL bazi podataka. Takve baze pohranjuju podatke u strukturi drukčijoj od klasičnih relacijskih modela, primjerice u formatu JSON s parovima ključ-vrijednost. NoSQL sustavi nastali su iz novih zahtjeva za većom fleksibilnošću i boljim performansama u pohrani i obradi velike količine podataka, uglavnom zbog popularnosti interneta i internetskih tehnologija te sve veće količine podataka [39].

U razvijenom je sustavu odabrana baza InfluxDB za pohranu podataka zbog jednostavne konfiguracije i integracije s web aplikacijom. U InfluxDB, kanta (engl. *bucket*) je osnovna jedinica za pohranu podataka. Kante služe kao logički spremnici za vremenske serije podataka te određuju gdje i kako se podaci čuvaju. Svi podaci unutar jedne kante grupirani su zajedno te se mogu jednostavno pretraživati i analizirati. Isto tako, nad kantom je moguće definirati politiku zadržavanja podataka (engl. *retention policy*) koja određuje koliko dugo će podaci biti zadržani prije nego se automatski obrišu. Također, pomoću njih se omogućava kontrola pristupa određenoj skupini po-

dataka. Svaka kanta pripada organizaciji, što je radna okolina za skupinu korisnika. Sve nadzorne ploče, kanta i korisnici pripadaju jednoj organizaciji. Podaci su u bazi organizirani po stupcima gdje su postavljeni vremenski blokovi za mjerene vrijednosti, skup oznaka (engl. *tags*), te polje kojem podaci pripadaju. Svi podaci pohranjeni u InfluxDB imaju stupac `_time` koji pohranjuje vremenske oznake. Oznake su na disku pohranjene u formatu nanosekunde, no preciznost vremenske oznake podataka koji se šalju može se definirati pri samom slanju tih podataka u samom API pozivu. Granulacija može biti na svim razinama od sekunde do nanosekunde. Sljedeći važan stupac koji ima svaki zapis u bazi jest `_measurement` koji označava naziv mjerenja. Podaci se grupiraju na temelju te vrijednosti. Posljednji stupac, `_field`, može imati beskonačno mnogo parova ključ-vrijednost koji simboliziraju stvarna polja i mjerene vrijednosti. Isto tako, mjerenjima se mogu dodijeliti i oznake na temelju kojih se također može pretraživati i filtrirati. Važno je naglasiti kako polje `_field` nije indeksirano, što znači da pretraživanje po njima nije efikasno jer baza mora proći po svim unosima. Stoga se preporuča postavljati vrijednost običnih oznaka budući da je pretraživanje po oznakama indeksirano [23].

Nadalje, baza InfluxDB koristi specifičan format podataka za pohranu. Linijski protokol (engl. *line protocol*) koji koristi baza tekstualni je format za upisivanje točaka u vremenu. Jedan red teksta u formatu linijskog protokola predstavlja jednu podatkovnu točku. Sadrži informacije o vrijednosti mjerenja, oznakama, vremenskoj oznaci i skupu polja. Sljedeći programski isječak prikazuje primjer podatka u formatu linijskog protokola koji se šalje u bazu podataka. Kao što je vidljivo iz isječka, obavezno je navesti naziv mjerenja kojem podatak pripada. Isto tako, mogu se dodati i oznake za kasnije pretraživanje i grupiranje. Zatim se nalazi popis polja odvojen zarezom koji predstavljaju vrijednosti samih mjerenja. Na kraju formata nalazi se obavezna vremenska oznaka. Podaci moraju striktno pratiti ovakav format kako bi baza uspješno parsirala i pohranila dobivene podatke. Format linijskog protokola jednostavan je za upotrebu te je kompaktan, čime smanjuje veličinu podataka i poboljšava efikasnost upisa i preuzimanja. Pogodan je jer podržava dinamičko dodavanje novih polja bez potrebe za izmjenom postojeće strukture podataka. S druge strane, ovakav format nije prikladan za kompleksne strukture podataka ili duboke hijerarhije. Isto tako, zbog jednostavnosti je osjetljiv na greške i formatiranje, što zahtijeva pažljivo rukovanje s formatom podataka.

```
esp32,device_id=MyId123 temp=28,co=11.1 123456789
```

```
| ----- |
|           |           |
```

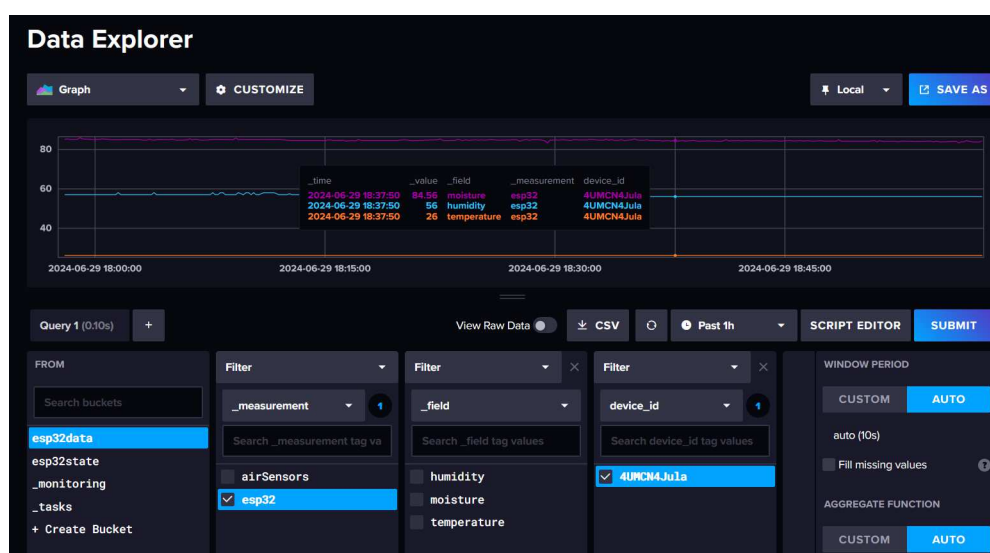
```

|           |           |           |
+-----+-----+-----+-----+
|measurement|,tag_set| |field_set| |timestamp|
+-----+-----+-----+-----+

```

Isječak koda 5.16: Podatak u bazi InfluxDB u formatu linijskog protokola

Budući da se baza podataka nudi u sklopu usluge Amazon Timestream, nije potrebno kreirati vlastite resurse kako bi se baza pokrenula i održavala. Pri kreiranju baze podataka, potrebno je definirati ime baze i glavnog administratora s lozinkom koji se koristi pri prvom spajanju na bazu. Isto tako, potrebno je navesti ime organizacije i početne kante u koju će se spremati podaci. Zatim se konfigurira sama instanca na kojoj će baza biti pokrenuta, odnosno resursi instance. Bira se na temelju korištenog RAM-a, mrežne propusnosti i jačine CPU-a. Potrebno je upisati veličinu diska za pohranu. Baza može biti javno dostupna svima, ili se pak mogu definirati posebne virtualne privatne mreže u oblaku (engl. *virtual private cloud* - *VPC*) sa podmrežama. Radi jednostavnosti, baza je javno dostupna iz svih mreža. Važno je napomenuti kako, usprkos javnoj dostupnosti baze, potrebne su vjerodajnice odnosno korisnički podaci kako bi korisnik pristupio bazi. Za bazu razvijenog sustava korišteno je ime *timestream-esp32*, organizacija *fer* te kanta u koju se spremaju podaci naziva se *esp32data*. Slika 5.9 prikazuje sučelje baze InfluxDB te podaci koji su spremljeni u kantu *esp32data*. Mogu se vidjeti parametri po kojima je moguće filtrirati pretraživanje.



Slika 5.9: Sučelje za pregled podataka u bazi InfluxDB

Kako je ranije spomenuto, podaci se moraju obraditi Lambda funkcijom kako bi bili pohranjeni u bazu podataka. Stoga je kreirana Lambda funkcija *ESP32Lambda*

koja podatke pretvara u format linijskog protokola te ih šalje u InfluxDB. Ova funkcija pokrenuta je pri događaju (engl. *event-driven*), što znači da se svakim dolaskom poruka na pretplaćene teme ova funkcija pokrene. AWS podržava brojne programske jezike putem izvršnih okolina u kojima su integrirane značajke potrebne za izvršavanje funkcije u željenom programskom jeziku. Odabir izvršne okoline za sobom povlači i operacijski sustav na kojem se funkcija izvršava. Ova je funkcija napisana u programskom jeziku Python zbog jednostavnosti i razumljivosti programskog koda. Funkcija je naziva `lambda_handler` koja predstavlja ulaznu točku (engl. *entrypoint*) za izvršavanje same funkcije. Iako se mogu napisati i pomoćne funkcije, ova je funkcija ključna za izvršavanje skripte. Sastoji se od dva parametra koje joj prosljeđuje proces zaslužan za pokretanje same funkcije, a to su događaj i kontekst. Događaj je zapravo ulazni podatak primljen putem MQTT veze, a objekt konteksta pruža metode i svojstva koja daju informacije o pozivu, samoj funkciji i okolini izvođenja. Funkcija također može koristiti varijable okoline (engl. *environment variables*) koje se postavljaju odvojeno od samog koda. Postavljanjem varijabli jednostavno se odvajaju tajni parametri od same funkcije. Budući da funkcija zahtijeva stvaranje API poziva prema bazi kako bi zapisala podatke, potrebno je koristiti vanjske biblioteke za kreiranje HTTP zahtjeva. Izvršna okolina Python koda sama po sebi ne pruža tu biblioteku, no moguće je stvoriti dodatan sloj nad Lambda funkcijom koja će sadržavati potreban paket. Slojevi su mehanizam koji omogućavaju dijeljenje i ponovno korištenje zajedničkog koda i resursa između više Lambda funkcija. Omogućava izolaciju dijelova koda, kreiranje i dijeljene biblioteke ili drugih resursa bez potrebe za mijenjanjem postojeće implementacije. Moguće je koristiti slojeve koje nudi AWS, odabrati vanjski sloj koji su kreirali drugi korisnici platforme, ili pak kreirati vlastiti. U razvijenom je sustavu korištena druga opcija, odnosno sloj koji integrira biblioteku *Requests* za kreiranje API poziva.

Kreirana Lambda funkcija nalazi se u sljedećem programskom isječku. URL baze podataka, organizacija te kanta za pohranu podataka dohvaćaju se iz varijabli okoline. Isto tako, kako bi funkcija uopće mogla pristupiti bazi, potrebno je generirati token u bazi koji omogućava pisanje u željenu kantu. Generirani je token također zapisan u varijable okoline. Preciznost vremenske oznake postavljena je na milisekunde budući da podaci s uređaja ESP32-C3 dolaze u takvom formatu. Iz funkcije je vidljivo čitanje vrijednosti, stvaranje podatka u formatu linijskog protokola, slanje POST zahtjeva i čekanje na odgovor.

```
import json
import requests
import time
```

```

import os

BUCKET = os.getenv('BUCKET')
ORG = os.getenv('ORG')
INFLUXDB_URL = os.getenv('INFLUXDB_URL')
TOKEN = os.getenv('TOKEN')

def lambda_handler(event, context):
    try:
        measurement = 'esp32'
        timestamp = event["timestamp"]
        device_id = event["device_id"]
        event_data = event["data"]
        fields = ",".join([f"{key}={value}" for key, value in
event_data.items() if key != "timestamp" and key != "
device_id"])
        data = f"{measurement},{device_id}={device_id} {fields} {
timestamp}"
        print(data)
        headers = {
            'Authorization': f'Token {TOKEN}',
            'Content-Type': 'text/plain'
        }
        params = {
            'org': ORG,
            'bucket': BUCKET,
            'precision': 'ms'
        }
        response = requests.post(
            INFLUXDB_URL,
            headers=headers,
            data=data,
            params=params
        )
        response.raise_for_status()
        print("Data sent to InfluxDB successfully")
    except Exception as e:
        print("Error:", e)

```

```

return {
    'statusCode': 200,
    'body': json.dumps('Data processed and sent to InfluxDB')
}

```

Isječak koda 5.17: Lambda funkcija za slanje podataka u InfluxDB

5.2.3. Sjena uređaja

Za ažuriranje sjene uređaja u AWS-u nije potrebna nikakva dodatna konfiguracija. Jedini je uvjet da stvar za koju je uređaj vezan postoji, no to je svakako osigurano registracijom na platformu. Uređaj kreira prvotnu klasičnu sjenu uređaja i ažurira je svakom iteracijom programa. Druge aplikacije mogu dohvatiti podatke o sjeni uređaja pretplatom na njegove teme. Prefiks za sve teme jest `$aws/things/{thingName}/shadow`. Budući da pregled sjene uređaja u AWS-u sam po sebi nije osobito koristan, po uzoru na proces pohrane senzorskih očitavanja, kreirana je ruta koja poruke dospjele na temu ažuriranja sjene prosljeđuje Lambda funkciji, koja pak obrađuje podatke i sprema ih u postojeću bazu InfluxDB. Kreiran je SQL upit koja sve poruke dospjele na temu uspješnog ažuriranja, odnosno poruke prijavljenog stanja, prosljeđuje posebno funkciji.

```

SELECT * FROM '$aws/things/+/shadow/update/accepted'

```

Isječak koda 5.18: SQL upit rute za sjene uređaja

Iako sami uređaji u prijavljenom stanju ne postavljaju serijski broj na temelju kojeg bi se izvorišni uređaji mogli razlučiti, svaka poruka sadrži ranije opisani klijentski identifikator na temelju kojeg se kasnije grupiraju podaci. Poruka u formatu JSON koja se rutom proslijedi Lambda funkciji nalazi se u sljedećem programskom isječku.

```

{
  "state": {
    "reported": {
      "color": "WHITE"
    }
  },
  "metadata": {
    "reported": {
      "color": {

```

```

        "timestamp": 1719764472
    }
}
},
"version": 15299,
"timestamp": 1719764472,
"clientToken": "deviceNumber123"
}

```

Isječak koda 5.19: Poruka ažurirane sjene

Lambda funkcija sjene uređaja *ESP32ShadowLambda* gotovo je identična funkciji za pohranu podataka, s manjim izmjenama dohvaćanja identifikatora uređaja i promjene vremenske oznake. Biblioteka razvojnog sustava za sjenu uređaja automatski pridjeljuje vremensku oznaku u obliku sekunde, dok API prihvaća podatke na razini milisekunde. Kreirana je nova kanta *esp32state* u bazi InfluxDB koja služi za pohranu stanja sjene. Generiran je i odgovarajući token pisanja u novu kantu, i shodno tome stvorene su nove varijable okoline. Ova se funkcija također bazira na dodatnom sloju koji sadrži paket *Requests* programskog jezika Python za komunikaciju putem API-ja. Isto tako, napravljena je provjera postoji li polje *desired* u JSON objektu, za slučaj da se na temi nađe poruka željenog stanja koja se ne sprema u bazu. Pohrana je namijenjena samo stvarnim ažuriranjima koji dolaze iz poruka prijavljenog stanja.

```

import json
import requests
import time
import os

BUCKET = os.getenv('BUCKET')
ORG = os.getenv('ORG')
INFLUXDB_URL = os.getenv('INFLUXDB_URL')
TOKEN = os.getenv('TOKEN')

def lambda_handler(event, context):
    if "reported" not in event["state"].keys():
        print("Desired event, skip storing")
        return

    try:

```

```

measurement = 'esp32'
timestamp = event["timestamp"]
current_state = event["state"]["reported"]
device_id = event["clientToken"]
fields = ",".join([f"{key}=\"{value}\"" for key, value in
current_state.items() if key != "timestamp" and key != "
clientToken"])
data = f"{measurement},{device_id}={device_id} {fields} {
timestamp * 1000}"
headers = {
    'Authorization': f'Token {TOKEN}',
    'Content-Type': 'text/plain'
}
params = {
    'org': ORG,
    'bucket': BUCKET,
    'precision': 'ms'
}
response = requests.post(
    INFLUXDB_URL,
    headers=headers,
    data=data,
    params=params
)
response.raise_for_status()
print("Data sent to InfluxDB successfully")
except Exception as e:
    print("Error:", e)

return {
    'statusCode': 200,
    'body': json.dumps('Data processed and sent to InfluxDB')
}

```

Isječak koda 5.20: Lambda funkcija za preusmjeravanje poruka sjene uređaja

Slika 5.10 prikazuje podatke sjene uređaja u sučelju baze InfluxDB. Vidljive su promjene stanja kroz vrijeme, odnosno različite vrijednosti boje LED diode koje je uređaj prijavio.

_start	_stop	_time	_value	_field	_measurement	device_id
2024-06-30 06:37:44 GMT...	2024-06-30 09:37:44 GMT...	2024-06-30 06:37:56 GMT...	RED	color	esp32	4UMCN4Jula
2024-06-30 06:37:44 GMT...	2024-06-30 09:37:44 GMT...	2024-06-30 06:38:13 GMT+2	BLUE	color	esp32	4UMCN4Jula
2024-06-30 06:37:44 GMT...	2024-06-30 09:37:44 GMT...	2024-06-30 06:38:22 GMT...	RED	color	esp32	4UMCN4Jula
2024-06-30 06:37:44 GMT...	2024-06-30 09:37:44 GMT...	2024-06-30 06:38:30 GMT...	BLUE	color	esp32	4UMCN4Jula
2024-06-30 06:37:44 GMT...	2024-06-30 09:37:44 GMT...	2024-06-30 06:38:40 GMT...	YELLOW	color	esp32	4UMCN4Jula
2024-06-30 06:37:44 GMT...	2024-06-30 09:37:44 GMT...	2024-06-30 06:38:50 GMT...	YELLOW	color	esp32	4UMCN4Jula
2024-06-30 06:37:44 GMT...	2024-06-30 09:37:44 GMT...	2024-06-30 06:39:08 GMT...	GREEN	color	esp32	4UMCN4Jula

Query 1 (0.09s) +
View Raw Data
CSV
Past 3h
QUERY BUILDER
SUBMIT

```

1 from(bucket: "esp32state")
2   |> range(start: v.timeRangeStart, stop: v.timeRangeStop)
3   |> filter(fn: (r) => r["_measurement"] == "esp32")
4   |> filter(fn: (r) => r["_field"] == "color")

```

Filter Functions...
Transformations
Functions

Slika 5.10: Sučelje za pregled stanja uređaja u bazi InfluxDB

5.2.4. Ažuriranje softvera

Kako bi se mogao kreirati posao OTA ažuriranja i poslati uređaju, potrebno je nekoliko preduvjeta. Najprije, certifikat koji uređaj dobije mora imati omogućenu politiku poslova odnosno *JobPolicy*. AWS nakon kreiranja certifikata na zahtjev automatski dodjeljuje ovu politiku certifikatu odnosno uređaju. Nadalje, potrebno je kreirati S3 kantu koja će služiti kao pohrana binarnih datoteka ažuriranja. Isto tako, potrebno je kreirati novu ulogu u sigurnosnom centru AWS-a koja će omogućava pristup usluzi AWS IoT Jobs, S3 pohrani te resursima za potpisivanje koda. Naposljetku, certifikat potpisivanja koda mora se učitati u oblak kako bi se njime potpisivale datoteke za slanje putem HTTP zahtjeva.

Što se tiče kreiranja spremnika u S3 pohrani, moguće je odabrati između dvije vrste spremnika - spremnik opće namjene (engl. *general purpose*) ili spremnik imenika (engl. *directory bucket*). Spremnik opće namjene zadana je vrsta spremnika koji se koristi za većinu slučajeva upotrebe u S3. Podržavaju sve S3 značajke i većinu klasa pohrane. Spremnici imenika koriste se za poslove koji zahtijevaju nisku latenciju. Mogu podržati stotine tisuća transakcija u sekundi, neovisno o broju direktorija unutar spremnika. Za razliku od spremnika opće namjene, spremnici imenika organiziraju ključeve hijerarhijski u direktorije umjesto korištenja prefiksa za organizaciju objekata. Spremnici se kreiraju na globalnoj razini te se regionalno repliciraju za visoku dostupnost i otpornost od ispadanja. Za potrebe razvijenog sustava kreiran je spremnik opće namjene *esp32ota-jgavran*. U njega je pohranjena binarna datoteka koja služi za demonstraciju OTA ažuriranja, a to je jednostavan program *blink.bin* koji periodički pali i gasi LED diodu. Svi korisnici imaju pravo čitanja iz kreiranog spremnika za lakši pristup objektu.

Lokalno kreirani certifikat s pripadnim privatnim ključem učitani su u sustav kako bi se njime digitalno potpisala binarna datoteka prije slanja na uređaj i tako potvrdila

valjanost i cjelovitost datoteke. Isto tako, kreirana je uloga *OTARole* koja će stvorenom OTA poslu omogućiti pristup uslugama AWS IoT Jobs, pohrani te potpisivanju koda. Popis dozvola koje uloga ima nalazi se na slici 5.11.

Policy name	Type	Attached entities
AmazonFreeRTOSOTAUpdate	AWS managed	1
AWSIoTLogging	AWS managed	1
AWSIoTRuleActions	AWS managed	1
AWSIoTThingsRegistration	AWS managed	3
OTAPolicy	Customer inline	0
S3Policy	Customer inline	0

Slika 5.11: Popis dozvola uloge *OTARole*

Posao se stvori tako što se u sučelju odabere opcija za stvaranje FreeRTOS OTA posla te unese ime posla. Nadalje, odabiru se uređaji za ažuriranje kao i protokol kojim će se podaci slati. AWS istovremeno može slati ažuriranje putem MQTT i HTTP veze, a uređaj će poslati zahtjev u obliku u kojem podržava preuzimanje. Nadalje je potrebno odabrati datoteku iz S3 pohrane, kao i certifikat kojim će se datoteka potpisati. Potpisana datoteka, osim što se šalje odabranim protokolom na ciljne uređaje, automatski se pohranjuje u S3 spremnik. Ovisno o konfiguraciji ciljnog uređaja, potrebno je navesti i putanju gdje će se datoteka pohraniti na uređaj. Zadnji korak prije kreiranja posla potrebno je odabrati hoće li posao biti kontinuirani ili jednokratni. Budući da ne postoji grupa uređaja kojoj je moguće dodijeliti kontinuirani posao, odabire se jednokratni. Također je moguće postaviti i konfiguraciju postupnog uvođenja, bilo statičkom stopom definirajući maksimalan broj uređaja u minuti, ili eksponencijalnom stopom s faktorom povećanja. Dostupne su i postavke otkazivanja posla ukoliko su zadovoljeni kriteriji, poput broja uređaja koji su posao izvršili s porukom *rejected* ili *failed*. Slika 5.12 prikazuje kako se mijenjaju stanja OTA posla nakon kreiranja.

AFR_OTA-OTAJob_v1	Snapshot	🔄 In progress - Rollout in progress
AFR_OTA-OTAJob_v1	Snapshot	🔄 In progress - Rollout completed
AFR_OTA-OTAJob_v1	Snapshot	✅ Completed

Slika 5.12: Stanja pokrenutog jednokratnog OTA posla

6. Web aplikacija

Svi podaci koji su pohranjeni u bazi podataka trebaju biti korisnicima na raspolaganju jednostavno i intuitivno. U tu je svrhu kreirana aplikacija radi prikaza i vizualizacije podataka korisnicima u stvarnom vremenu. Web aplikacija treba biti javno dostupna na internetu kako bi korisnici razvijenog sustava mogli pregledavati podatke poslane s uređaja. Za objavu web aplikacije na internet (engl. *deployment*) kreirani su vlastiti resursi na kojima se izvršava aplikacija. Za infrastrukturu aplikacije korišteni su resursi platforme AWS koji pružaju iznajmljivanje virtualnih računala te se na njima mogu pokrenuti vlastite računalne aplikacije. Za web aplikaciju koja će korisnicima pružati uvid u podatke odabrana je Grafana koja nudi brojne funkcionalnosti za vizualizaciju podataka. Nadalje, kreiran je i alarmni sustav koji obavještava o promjenama stanje koja dolaze od uređaja.

6.1. Infrastruktura aplikacije

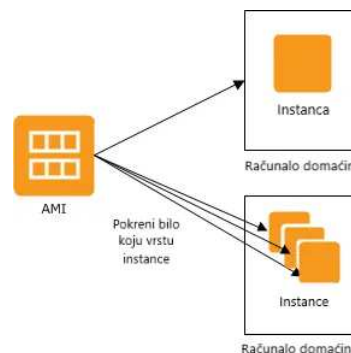
Temelj cijele infrastrukture aplikacije jest usluga Amazon EC2 (engl. *Elastic Compute Cloud*). Ova usluga pruža skalabilni računalni kapacitet na zahtjev u oblaku platforme AWS. Ova usluga omogućava pokretanje neograničenog broja virtualnih poslužitelja, ovisno o zahtjevima aplikacije i razvijenog sustava, konfiguriranje sigurnosti i umrežavanja te upravljanje pohranom. Usluga EC2 nudi razne prednosti [4]:

- fleksibilno skaliranje: omogućava brzo povećanje ili smanje kapaciteta u kombinaciji s uslugom EC2 Auto Scaling za automatsko skaliranje radi prilagodbe troškova,
- potpuna kontrola nad instancom: pruža pristup instanci kao i bilo kojem stroju, moguće pokretanje i zaustavljanje spajanjem na udaljeno računalo, ali i API pozivom,
- fleksibilne usluge objave u oblaku: nudi izbor između više vrsta instanci, operacijskih sustava i softverskih paketa te nudi konfiguraciju memorije, procesora

i pohrane,

- integracija s drugim uslugama: jednostavno se integrira s ostalim uslugama u sklopu platforme AWS,
- pouzdanost: nudi vrlo pouzdano okruženje u kojem se zamjenske instance mogu brzo pokrenuti, te je obaveza ugovora o razini usluge Amazon EC2 (engl. *Service Level Agreement* - *SLA*) dostupnost od 99,99% za svaku regiju,
- sigurnost: arhitektura nudi različite sigurnosne značajke i postavljanje virtualnih privatnih mreža za ograničen pristup resursima.

EC2 instance virtualni su poslužitelji koji rade na infrastrukturi računalstva u oblaku tvrtke Amazon. Jedan fizički AWS poslužitelj uslužuje više EC2 virtualnih poslužitelja koje pokreće hipervizor na računalu domaćinu. Ova usluga pružanja virtualne infrastrukture dio je skupa IaaS usluga koje AWS nudi. EC2 virtualni poslužitelji kopije su izvornog predloška na kojem se temelje. AMI (engl. *Amazon Machine Image*) temeljna je komponenta koja omogućava pokretanje virtualnih poslužitelja u AWS infrastrukturi. Predstavlja virtualni stroj koji sadrži sve potrebne informacije za pokretanje instance, uključujući operacijski sustav, aplikacije te konfiguracijske podatke. To je prilagodljivi predložak za EC2 instance. Iz jednog AMI predloška, odnosno slike stroja, moguće je kreirati više istih EC2 instanci, što olakšava njihovo stvaranje i objavu na internet. Ovo je korisno za horizontalno skaliranje aplikacija. Slika 6.1 prikazuje način na koji funkcionira AMI predložak - kreira instance bilo koje vrste te ih pokrene na domaćinskim računalima [5].



Slika 6.1: AMI predložak i distribucija slika stroja na instance [5]

AMI predlošci podržavaju dva tipa virtualizacije: hardversku virtualizaciju i paravirtualizaciju. Predložak s hardverskom virtualizacijom pruža mogućnost pokretanja operacijskog sustava izravno na vrhu virtualnog stroja bez ikakvih izmjena, kao da se pokreće na samom hardveru (engl. *bare-metal hardware*). Domaćinski sustav usluge

EC2 emulira dio ili sav temeljni hardver koji je predstavljen gostu odnosno AMI slici. Moguće je isto tako koristiti hardverska proširenja koji pružaju brzi pristup domaćinskom hardveru. Paravirtualizacija koristi poseban pokretački program koji lančano učitava jezgru u AMI sliku. Paravirtualni gosti mogu se pokretati na domaćinskom hardveru koji nema eksplicitnu podršku za virtualizaciju. Ovaj tip ne simulira hardver, nego pravi hiperpozive (engl. *hypercalls*) za izvršavanje osjetljivih CPU naredbi. Preporuča se odabir hardverske virtualizacije, iako generalno paravirtualizacija pruža bolje performanse, zbog poboljšanja hardverske virtualizacije i novih upravljačkih programa koji izjednačava rad obje vrste virtualizacije.

Pri kreiranju instance potrebno je definirati i njezinu vrstu. Vrsta koja se navede određuje hardver dostupan instanci. Svaka vrsta nudi različitu ravnotežu računalnih, memorijskih i mrežnih resursa. Vrste su grupirane u skupine na temelju potreba ciljnih aplikacija. AWS pruža sljedeće vrste instanci:

- opće namjene (engl. *general purpose*),
- optimiziranog računanja (engl. *compute optimized*),
- optimizirane memorije (engl. *memory optimized*),
- optimizirane pohrane (engl. *storage optimized*),
- ubrzanog računanja (engl. *accelerated computing*),
- računanja visokih performansi (engl. *high-performance computing*).

Vrstu instance potrebno je odabrati na temelju zahtjeva same aplikacije. Isto tako, pri kreiranju instance, uvijek je potrebno voditi računa o odabiru regije - optimalno je odabrati regiju kojoj je klijentski promet najbliži.

Za potrebe razvijenog sustava, kreirana je EC2 instanca opće namjene s najmanjim resursima budući da je klijentski promet jako malen, odnosno vrlo malo korisnika pristupa aplikaciji. Također, pridružena joj je instanca spremnika za pohranu veličine 8 GB. Operacijski sustav na kreiranoj instanci aplikacije jest Linux radi lakšeg spajanja na instancu i pokretanja web aplikacije putem komandne linije. Pri stvaranju instance kreirana je nova sigurnosna grupa koja omogućava spajanje na virtualno računalo putem SSH klijenta.

Instanci je automatski dodijeljena virtualna privatna mreža (engl. *Virtual Private Cloud* - VPC) koja predstavlja izolirani virtualni mrežni prostor unutar AWS infrastrukture. Omogućava potpunu kontrolu nad mrežnim okruženjem, uključujući izbor vlastitog IP adresnog prostora, konfiguraciju podmreža, postavljanje usmjeravanja i pristupnih kontrola mreže. Svaka je virtualna privatna mreža podijeljena na manje di-

jelove mreže zvane podmreže. One mogu biti privatne ili javne te se automatski za svaku mrežu kreiraju tri podmreže. Svaka je kreirana podmreža prema zadanim postavkama privatna, te je za pristup instanci odnosno aplikaciji koja se nalazi za njom potreban javni pristup. Iako omogućavanje javnog pristupa znači da svatko može pristupiti IP adresi instance s interneta, unošenje IP adrese pri svakom pristupu aplikaciji nije prilagođeno korisniku, što narušava korisničko iskustvo korištenja aplikacije. Stoga je potrebno uvesti komponentu za balansiranje opterećenja (engl. *load balancer*). Balanseri preusmjeravaju korisničke zahtjeve na manje opterećene instance i tako ravnomjerno raspoređuju ulazni promet. Budući da je u razvijenom sustavu korištena samo jedna instanca na kojoj se pokreće aplikacija, ovdje je primarna svrha balansera pružiti DNS naziv koji će biti javno dostupan korisnicima, i tako poboljšati iskustvo korištenja aplikacije.

Aplikacijskoj instanci potrebno je dodijeliti pravila za ulazne zahtjeve, odnosno omogućiti TCP komunikaciju s podmreže u kojoj se nalazi balanser. Tim se pravilom omogućuje prolaz zahtjeva s balansera prema aplikacijskoj instanci. Isto tako, iz sigurnosnih razloga poželjno je koristiti protokol HTTPS za pristup balanseru. Za korištenje protokola HTTPS potrebno je učitati certifikat, no budući da domena na kojoj se nalazi balanser nije službeno registrirana, ne posjeduje niti službeno potpisani certifikat. Stoga je lokalno kreiran samopotpisani certifikat pomoću biblioteke *OpenSSL* i zatim učitani u oblak. Slika 6.2 prikazuje mrežnu povezanost balansera i instance na kojoj se nalazi aplikacija. Balanser sluša promet na vratima 443, što su vrata za protokol HTTPS. Dolazni zahtjevi prosljeđuju se skupini ciljnih instanci, ovdje pod nazivom *GrafanaTargetGroup*, u kojoj se mogu nalaziti sve buduće stvorene instance na kojima se pokreće aplikacija. Nadalje, promet se prosljeđuje ciljnoj instanci koja je dostupna na vratima 3000. Na tim je istim vratima pokrenuta aplikacija.



Slika 6.2: Mrežna povezanost balansera i aplikacijske instance

Kako bi se maksimalno izoliralo izvođenje aplikacije i tako ostavilo prostora za izvršavanje drugih procesa na virtualnom računalu, na instanci EC2 aplikacija je pokrenuta pomoću alata Docker radi kontejnerizacije aplikacije. Sljedeći programski isječak prikazuje naredbu za preuzimanje i pokretanje Docker slike za Grafanu. Isto tako, potrebno je izložiti vrata na kojoj se pokreće aplikacija kako bi joj se moglo pristupiti.

Grafana nudi dvije verzije - otvorenog koda i *enterprise*, koja nudi više značajki. Za potrebe razvijenog sustava korištena je slika verzije otvorenog koda. Potrebno je također i postaviti varijable okoline za povezivanje s SMTP poslužiteljem (engl. *Simple Mail Transfer Protocol*), koji će kasnije služiti za slanje e-pošte obavijesti. Korišten je poslužitelj koji dolazi uz uslugu Gmail tvrtke *Google*, te je potrebno navesti aplikacijsku lozinku koja se može kreirati u Gmail računu.

```
sudo docker run -d -p 3000:3000 --name grafana
-e "GF_SMTP_ENABLED=true" \
-e "GF_SMTP_HOST=smtp.gmail.com:587" \
-e "GF_SMTP_USER=gmail.address@gmail.com" \
-e "GF_SMTP_PASSWORD=GeneratedPassord123" \
grafana/grafana-oss
```

Isječak koda 6.1: Pokretanje Docker slike za Grafanu

6.2. Grafana

Grafana je platforma otvorenog koda za vizualizaciju i analizu podataka koja omogućava korisnicima stvaranje interaktivnih i prilagodljivih nadzornih ploča (engl. *dashboards*). Cilj platforme jest olakšati analize vremenskih nizova podataka te integrira podatke iz različitih izvora podataka (engl. *data source*), što mogu biti različite baze ili sustavi. Nudi jednostavnu vizualizaciju pomoću različitih grafičkih elemenata, uključujući linijske, stupčaste i tortne grafove. Široko je korištena zbog svoje sposobnosti da prezentira podatke na intuitivan način, omogućujući korisnicima donošenje informiranih odluka na temelju stvarnim podataka u stvarnom vremenu. Također, Grafana nudi alarmni sustav koji se koristi za izvještavanje korisnika o promjenama u podacima [26].

Grafana se najčešće koristi za nadzor infrastrukture, performansi aplikacija i poslovnih metrika. Često je korištena za praćenje stanja poslužitelja, mrežnog prometa i performansi aplikacija. Također se koristi u poslovnoj analitici za praćenje poslovnih metrika. Isto tako, Grafana je korisna za IoT sustave upravo zbog sposobnosti vizualizacije velike količine podataka u stvarnom vremenu. Količine podataka koje IoT uređaji generiraju moraju se analizirati kako bi se dobili uvidi u očitana mjerenja, zdravlje sustava, kao i same performanse uređaja. Upravo zbog jednostavnog povezivanja s više različitih izvora podataka, njome se ostvaruje središnje mjesto za praćenje i analizu podataka iz cijele IoT mreže. Koristeći interaktivne nadzorne ploče, moguće

je pratiti očitavanja sa senzora u stvarnom vremenu i kreirati mnoge vizualizacije ovisno o potrebama sustava. Također podržava složene upite i transformacije podataka, što omogućuje njihovu dubinsku analizu. Korištenjem grafičkih elemenata i filtriranja podataka, mogu se lako identificirati trendovi, obrasci i anomalije u podacima [36].

Kako bi web aplikacija mogla prikazivati podatke iz baze InfluxDB, na Grafani je potrebno stvoriti izvor podataka koji će služiti kao spojnica aplikacije i baze. Kako bi Grafana koristila InfluxDB kao izvor, koristi se dodatak (engl. *plugin*) koji služi kao poveznica između dva sustava. Osim što omogućuje njihovo povezivanje na razini dohvaćanja podataka, istovremeno preslikava vremenske okvire odabrane u Grafani u stvarne vremenske točke koje baza može parsirati. Budući da se u bazi nalaze dvije kante, *esp32data* i *esp32state*, za svaku je od njih potrebno napraviti poseban izvor podataka. Kako bi se Grafana uspješno spojila na bazu, potrebno je korisničko ime i lozinka, kao i token koji će omogućavati čitanje iz baze. U bazi InfluxDB kreiran je novi korisnik *grafana* koji služi samo za potrebe web aplikacije i generirana su dva tokena, svaki za jednu kantu. Tokeni omogućavaju isključivo čitanje iz kante. Važno je također napomenuti kako se novi korisnici ne mogu kreirati putem sučelja baze InfluxDB, nego je potrebno lokalno preuzeti alat za upravljanje bazom te se udaljeno putem komandne linije spojiti na bazu InfluxDB i tako kreirati korisnika.

Za kreiranje upita prema bazi koristi se jezik Flux. To je skriptni jezik za podatke (engl. *functional data scripting language*) namijenjen postavljanju upita i analizi podataka vremenskih serija. Upiti mogu sadržavati agregacije i transformacije. Iako jezik dolazi sa predefiniranim skupom funkcija za rad nad vremenskim serijama, moguće je definirati i vlastite prilagođene funkcije. Većina upita u jeziku Flux prate jednaki slijed koji se lančano izvodi:

1. definiranje izvora,
2. filtriranje,
3. oblikovanje,
4. obrada.

Prvi korak je odabir izvora podataka, što se odnosi na izbor kante. Podaci su vraćeni u tabličnom obliku. Funkcije filtriranja iteriraju po svim redovima dobivene tablice i provjeravaju zadovoljavaju li unosi tražene kriterije. Primarne funkcije za filtriranje su `range()` i `filter()`. Prva funkcija filtrira podatke na temelju vremenskog okvira, dok `filter()` filtrira vrijednosti na temelju sadržaja redaka. Koristi se predikatna funkcija definirana unutar izraza za evaluaciju retka. Svaki se redak predikatnoj

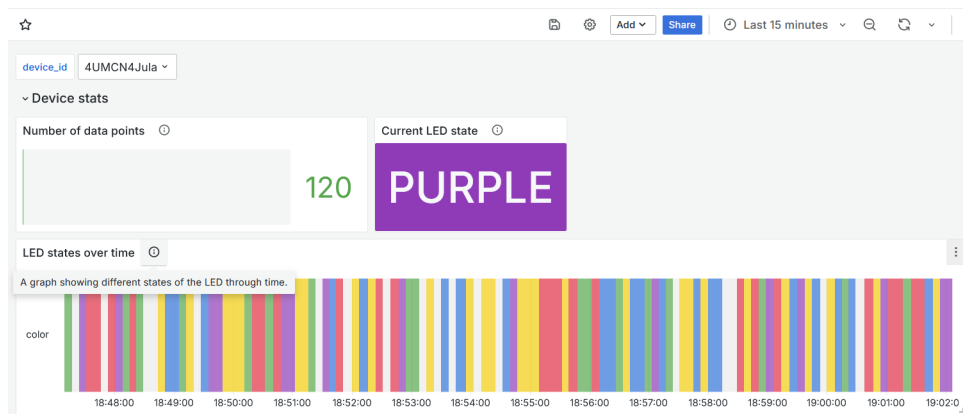
funkciji prosljeđuje kao zapis koji sadrži parove ključ-vrijednost za svaki stupac u retku. Oblikovanje podataka odnosi se na grupiranje ili modifikaciju same strukture podataka prije slanja na daljnju obradu. Funkcija `group()` grupira podatke na temelju danog ključa, `window()` stvara skupine na temelju danih vremenskih okvira, dok `keep()` i `drop()` zadržavaju odnosno uklanjaju pojedine stupce. Funkcija `pivot()` vrijednosti stupca pretvara u redak. Obrada podataka odnosi se nad sve ostale operacije manipulacije podacima: agregiranje, preslikavanje, prepisivanje te odabir pojedinih točaka u vremenu [23].

Za potrebe razvijenog sustava, kreirana je nadzorna ploča koja prikazuje mjerenja pojedinih senzora: temperatura, vlažnost zraka i vlaga tla. Svaka je vizualizacija predstavljena jednim panelom kojem je dodijeljen naziv i opis. Paneli mogu biti različite vrste grafova vremenskih serija, no mogu biti i tekst ili jedna vrijednost. Svaki je panel moguće stilizirati bojama, veličinom i debljinom linija. Također, filtriranjem i transformacijama vrijednosti mogu se dobiti nove varijable za prikazati na panelu. Ovisno o vrijednostima varijabli koje se nalaze na panelu, moguće je mijenjati izgled i boju samih grafova. Paneli se mogu grupirati u redove, ovisno o njihovom zajedničkom značaju. Također, važna značajka jest definiranje varijabli na razini nadzorne ploče. Moguće je korištenjem upita ili pak vlastitim proizvoljnim unosom definirati varijable koje se zatim mogu koristiti u svim panelima. Tako će korisnik, odabirom vrijednosti varijable, vidjeti i željena mjerenja odnosno grafove samo za one vrijednosti varijabli koje ga zanimaju.

Unutar nadzorne ploče kreirana je varijabla *device_id*, koja pruža odabir između postojećih serijskih brojeva odnosno identifikatora uređaja na temelju podataka u bazi. Tako se jednostavno može pregledati statistika samo za željeni uređaj na pregled, budući da je svaki panel povezan s definiranom varijablom. Isto tako, varijabla omogućava odabir i svih dostupnih vrijednosti, čime je omogućen pregled za sve uređaje odjednom. Naravno, podaci su na panelima i dalje grupirani po serijskom identifikatoru uređaja. U nastavku se nalazi upit koji je korišten za definiranje varijable *device_id*. Bojama su prikladno označene različite vrste funkcija upita.

```
from(bucket: "esp32data")
|> range(start: v.timeRangeStart, stop: v.timeRangeStop)
|> filter(fn: (r) => r._measurement == "esp32")
|> group(columns: ["device_id"])
|> map(fn: (r) => ({ device_id: r.device_id })))
```

Isječak koda 6.2: Upit za dohvat identifikatora uređaja



Slika 6.3: Prikaz stanja uređaja na Grafani u posljednjih petnaest minuta

Slika 6.3 prikazuje red nadzorne ploče koji sadrži panele stanja uređaja tijekom posljednjih petnaest minuta. Odabran je jedan identifikator uređaja, stoga se prikazuju podaci samo za taj jedan uređaj. Prvi panel prikazuje koliko se ukupno vremenskih točaka nalazi u bazi odabranom vremenskom okviru, drugi prikazuje posljednje zabilježeno stanje LED diode, a posljednji panel prikazuje promjenu stanja LED diode kroz vrijeme. Svako je stanje LED diode označeno prikladnom bojom koristeći preslikavanja koje nudi Grafana. Jedno takvo preslikavanje prikazano je na slici 6.4.

Value mappings			
RED	→	RED	●
GREEN	→	GREEN	●
BLUE	→	BLUE	●
YELLOW	→	YELLOW	●
PINK	→	PURPLE	●
WHITE	→	WHITE	●
PURPLE	→	PURPLE	●
Edit value mappings			

Slika 6.4: Preslikavanje vrijednosti LED dioda na boje

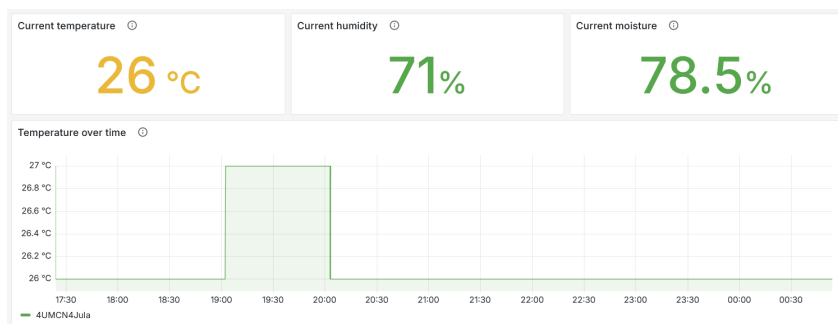
Podaci svih prikazanih panela dobiveni su iz kante *esp32state*. Sljedeći je upit korišten za prikaz stanja tijekom vremena. Za vremenski raspon koristi varijable za početak i kraj odabranog vremenskog okvira u Grafani koje nudi (engl. *plugin*) za bazu InfluxDB. Vrijednost za identifikator uređaja dobiva se iz varijable nadzorne ploče.

```
from(bucket: "esp32state")
|> range(start: v.timeRangeStart, stop: v.timeRangeStop)
|> filter(fn: (r) => r._measurement == "esp32")
|> filter(fn: (r) => r.device_id == "${device_id}")
```

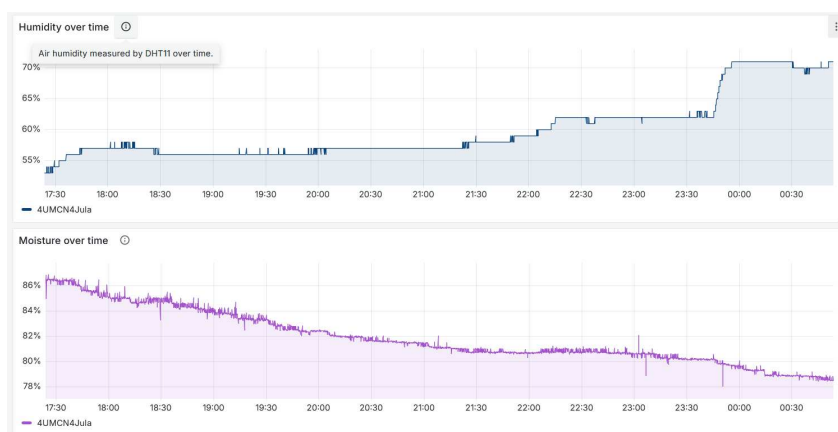
```
|> map(fn: (r) => ({ color: r._value, time: r._time })))
```

Isječak koda 6.3: Upit za dohvat stanja LED diode u vremenskom okviru

Sljedeće slike prikazuju red sa senzorskim očitanjima. Prva tri panela sa slike 6.5 prikazuju trenutno izmjerene senzorske vrijednosti, dok drugi panel prikazuje temperaturu tijekom vremena. Isto tako, moguće je primijetiti kako su trenutna mjerenja drukčije obojana. Definirane su granične vrijednosti (engl. *thresholds*) na temelju kojih se evaluira koje će boje biti panel. Boja simbolizira kritičnost stanja u kojem se uređaj nalazi. Žuta boja signalizira upozorenje, dok crvena predstavlja ozbiljno stanje izmjerene vrijednosti. Ostala dva panela na slici 6.6 prikazuju vlažnost zraka i vlagu zemlje kroz vrijeme. Na dnu svakog linijskog grafa vidljiv je i serijski broj uređaja, stoga ukoliko je odabrano više uređaja, moguće je i dalje zaključiti koje su vrijednosti vezane za pojedini uređaj. Isto tako, na svakom je panelu odabrana prikladna mjerna jedinica.



Slika 6.5: Trenutno izmjerena senzorska mjerenja i temperatura kroz vrijeme



Slika 6.6: Vlažnost zraka i zemlje kroz vrijeme

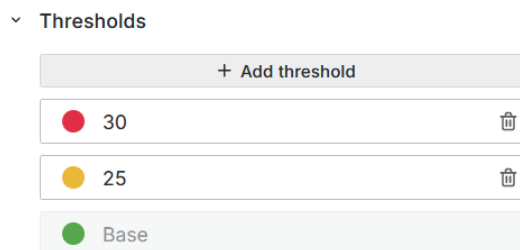
Sljedeći programski isječak prikazuje upit za dohvat temperature kroz vrijeme. Kao što je ranije spomenuto, koristi se kanta *esp32data* za izvor podataka o senzorskim

očitanjima. Grupiranje po serijskom broju uređaja važno je za točan prikaz podataka. Funkcijom `keep()` zadržani su stupci za vrijeme, uređaj te sama vrijednost odabrane temperature, dok su ostali stupci automatski odbačeni.

```
from(bucket: "esp32data")
|> range(start: v.timeRangeStart, stop: v.timeRangeStop)
|> filter(fn: (r) => r._measurement == "esp32" and r._field ==
    "temperature")
|> filter(fn: (r) => r.device_id == "${device_id}")
|> group(columns: ["device_id"])
|> keep(columns: ["_time", "_value", "device_id"])
```

Isječak koda 6.4: Upit za dohvat temperature

Slika 6.7 prikazuje ranije spomenute granične vrijednosti za stiliziranje panela. Ove se vrijednosti odnose na panel s trenutnim senzorskim mjerenjem temperature. Srednja granica jest 25°C, dok je kao gornja granica postavljena 30°C. Sve vrijednosti ispod srednje granice označene su zelenom bojom te se smatraju prihvatljivima.



Slika 6.7: Granične vrijednosti za temperaturu zraka

6.2.1. Alarmni sustav

Korisnici ne prate uvijek stanje uređaja niti očitavanja mjerenih senzora, stoga je korisno slati obavijesti korisniku pri svakom neželjenom očitanom stanju. Grafana nudi alarmni sustav (engl. *alerting system*) koji omogućuje definiranje uvjeta pod kojima se generiraju obavijesti, na temelju podataka i metrika prikupljenih iz različitih izvora podataka. Mogu se kreirati pravila za alarme, postaviti pragovi za različita mjerenja, kao i definirati vremenski intervali za provjeru tih uvjeta. Kada su uvjeti ispunjeni, Grafana može poslati obavijesti putem raznih kanala, od kojih su neki e-pošta, Slack i Discord.

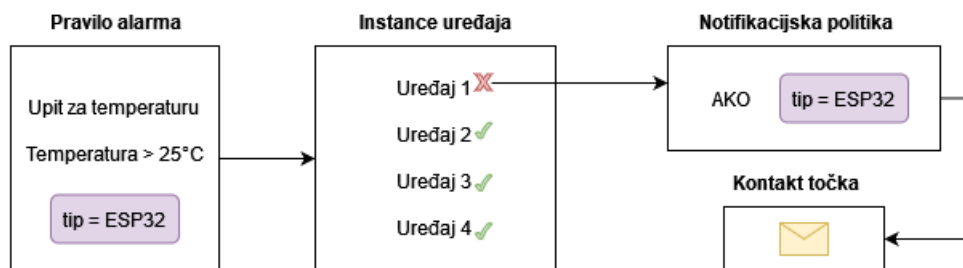
Alarmni sustav omogućuje proaktivno praćenje performansi i dostupnosti sustava, osiguravajući pravovremenu obaviještenost o potencijalnim problemima. Isto tako,

moguće je detaljno konfigurirati obavijesti, uključujući opcije za ponavljanje alarma i kreiranje eskalacijskih lanaca kako bi se osiguralo da obavijest dosegne tražene osobe. Povijest alarma se pohranjuje i može se pregledavati, što olakšava analizu i rješavanje problema [26].

Dijagram na slici 6.8 prikazuje princip rada alarmnog sustava na Grafani. Alarmni sustav Grafane periodički ispituje izvore podataka i procjenjuje uvjet zapisan u pravilu alarma. Ako je uvjet prekršen, uključi se alarm za pojedinu instancu koja je prouzrokovala alarm. Šalju se obavijesti za aktivirane i razriješene alarme direktno kontakt točki ili prolaze notifikacijsku politiku za detaljnije preusmjerenje. Alarmi se također mogu pridružiti panelima na nadzornim pločama za jednostavniji pregled alarma.

Grafanin alarmni sustav sastoji se od dvije ključne komponente:

- generator alarma: procjenjuje pravila i šalje aktivne ili razriješene alarme primatelju alarma,
- primatelj alarma (*Alertmanager*): prima alarme, odgovoran za njihovo rukovanje i slanje obavijesti.



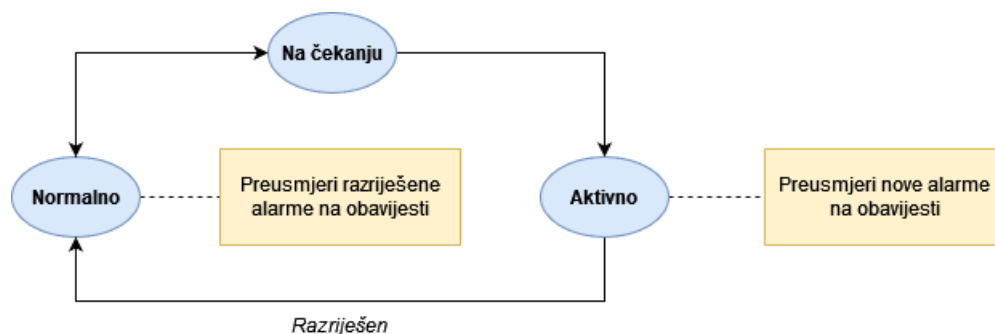
Slika 6.8: Princip rada alarmnog sustava na Grafani [26]

U nastavku su pobliže objašnjeni pojmovi ključni za razumijevanje alarmnog sustava.

Pravilo alarma (engl. *alert rule*) sastoji se od jednog ili više upita i izraza koji odabiru podatke koji se žele mjeriti. Također sadrži uvjet, a to je prag koji pravilo alarma mora ispuniti ili premašiti da bi se aktivirao. Unutar pravila alarma potrebno je odabrati točku kontakta ili notifikacijsku politiku kako bi se odredio način slanja obavijesti. Svako pravilo alarma može proizvesti više instanci, i svako pojavljivanje pravila naziva se alarm. Alarm se generira za svaku vremensku seriju, što je korisno jer se time omogućava praćenje više uređaja samo jednim pravilom. Ako su podaci grupirani po identifikatoru uređaja, alarm će se aktivirati za svaki pojedini identifikator. Pravila se često procjenjuju i njihova se stanja sukladno ažuriraju. Sustav obavještava isključivo

o instancama koje ispunjavaju uvjete ili na koji su upravo razriješeni (engl. *resolved*).

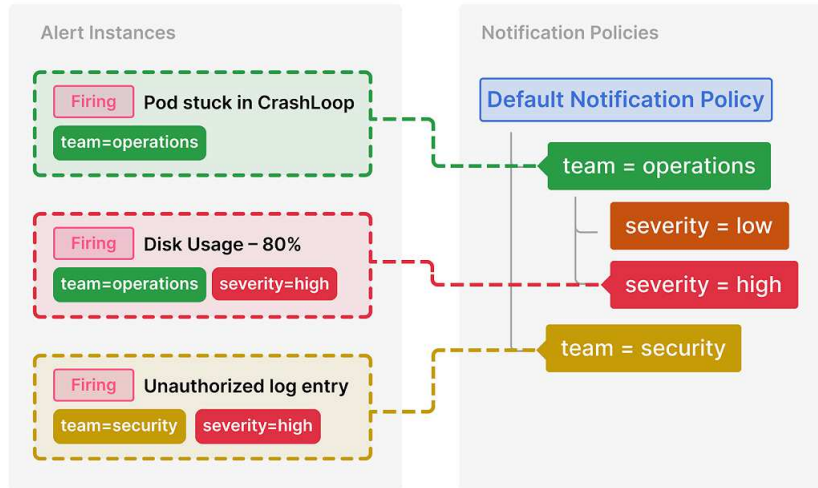
Svako pravilo alarma mora imati evaluacijsku grupu te period čekanja (engl. *pending period*). Svaka evaluacijska grupa ima razdoblje evaluacije odnosno procjene, i određuje koliko se često alarm procjenjuje. Period čekanja definira koliko dugo uvjet mora biti ispunjen prije nego se alarm pokrene, što smanjuje mogućnost lažno pozitivnih alarma. Period čekanja se isto tako može postaviti na nulu, čime se alarm efektivno pokreće odmah čim je uvjet ispunjen. Slika 6.9 prikazuje promjene stanja alarma i obavijesti koje se šalju u svakom stanju. Početno je normalno stanje kada uvjet nije ispunjen i alarm nije pokrenut. Kada se uvjet ispuni, alarm prelazi u stanje čekanja (engl. *pending*) dok period čekanja ne istekne. Na kraju perioda, ako je uvjet i dalje ispunjen, alarm prelazi u aktivno stanje i šalje obavijesti o promjeni stanja. Po završetku ispunjavanja uvjeta, alarm je razriješen i vraća se u normalno stanje, te se šalje obavijest o razriješenju alarma. Isto tako, ako je alarm u stanju čekanja, a uvjet se prestane ispunjavati tokom perioda čekanja, alarm se vraća u početno normalno stanje.



Slika 6.9: Promjena stanja alarma [26]

Notifikacijske politike pružaju fleksibilan način preusmjeravanja obavijesti. One usmjeravaju alarme na točke kontakta pomoću uparivanja oznaka (engl. *label matching*) s alarma. Notifikacijske politike nisu lista, nego stablasta struktura, čiji je korijen zadana notifikacijska politika te iz nje proizlaze mnoge politike. Svaka politika ima skup oznaka na temelju kojih se uparuje s kontaktnim točkama. Unutar alarma definiraju se oznake koje se nakon aktiviranja alarma uparuju s notifikacijskim politikama. Slika 6.10 prikazuje princip uparivanja oznaka alarma s notifikacijskim politikama. Što je više oznaka definirano u alarmu, to dublje prolazi u strukturu notifikacijskih politika. Kako bi se odredilo koje notifikacijske politike trebaju rukovati alarmom, oznake se uparuju od početka stabla, odnosno zadane notifikacijske politike. Ona je uparena sa svim alarmima, što sprječava propuštanje preusmjeravanje alarma. Ako se pronađe podudarna politika, sustav nastavlja procjenjivati politike dublje u strukturi re-

dom kojim su navedene. Ako je ugniježđena politika s alarmom, evaluiraju se i njezine podpolitike. Ovaj se proces odvija rekurzivno dok se ne dođe do najdublje politike u strukturi koja se podudara s oznakama alarma. U ovom slučaju, samo politika najdublje u strukturi obrađuje alarm. Ako alarm treba obraditi više politika, treba omogućiti uparivanje sa hijerarhijski srodnim odnosno sestrinskim pravilima na željenoj razini.

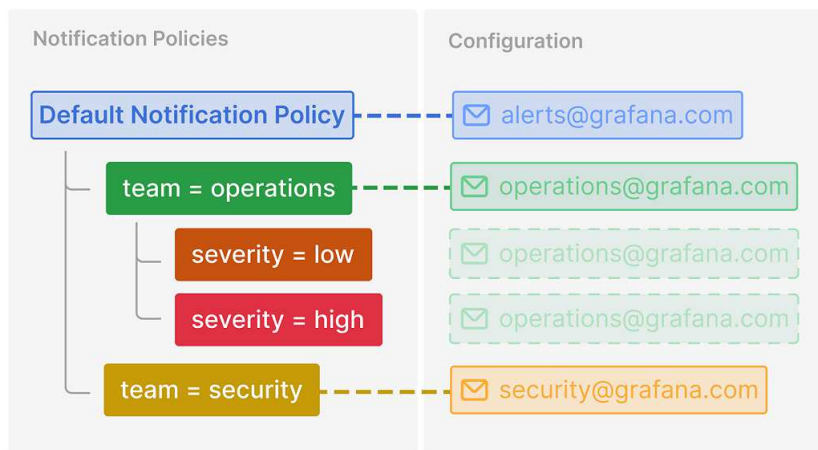


Slika 6.10: Uparivanje oznaka alarma i notifikacijskih politika [26]

Kao što je spomenuto, svaka je notifikacijska politika vezana za jednu točku kontakta (engl. *contact point*). Točke kontakta sadrže konfiguraciju za slanje obavijesti o alarmima. To je popis integracija od kojih svaka šalje obavijest na određeni kanal. Grafana pruža integraciju s brojnim sustavima i aplikacijama za slanje pošte ili obavijesti. Unutar svake točke također se definira poruka obavijesti koja se šalje, a može koristiti unaprijed kreirane predloške ili poruku. Moguće je definirati i kontaktnu točku bez ikakve integracije, no u tom slučaju ona ne šalje nikakve obavijesti. Slika 6.11 prikazuje vezu notifikacijskih politika i točaka kontakta.

Moguće je kreirati i predloške za slanje poruka u obavijesti. Za kreiranje predložaka koriste se predlošci programskog jezika Go. Naime, primatelj obavijesti odnosno komponenta *Alertmanager* jest aplikacija napisana u programskom jeziku Go, te se kreirani predlošci proslijeđuju toj komponenti i izravno integriraju u njezin izvorni kod. Predlošci pružaju mogućnost definiranja strukture i sadržaja obavijesti o alarmima, čime postaju informativnije i prilagođenije potrebama. Važno je napomenuti kako postavljanjem predloška za točku kontakta sve obavijesti koje dolaze s te točke poprimaju oblik definiran predloškom.

Predlošci se pišu koristeći sintaksu dvostrukih zagrada `{ { . . . } }` koje označavaju mjesta gdje će se dinamički umetnuti sadržaj. Unutar ovih zagrada mogu se koristiti



Slika 6.11: Uparivanje notifikacijskih oznaka i točaka kontakta [26]

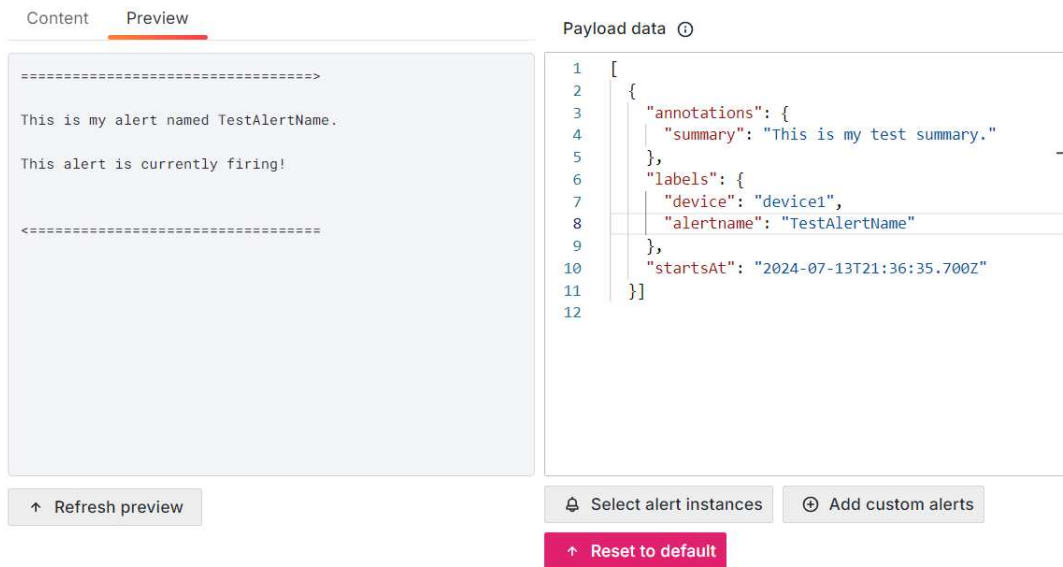
različite naredbe poput varijabli, funkcija, petlji i uvjetnih izraza. Podaci se u predloške ubacuju kroz kontekst koji je struktura ili rječnik podataka proslijeđen predlošku pri njegovu izvršavanju. Unutar primatelja obavijesti, predložak se učitava i obrađuje, nakon čega se izvršava s određenim podacima pomoću posebnih funkcija izvršavanja. Pri izvršavanju, dinamički podaci zamjenjuju odgovarajuće oznake unutar predloška, generirajući konačni izlazni sadržaj. Sustav predložaka omogućuje i definiranje prilagođenih funkcija koje se mogu koristiti unutar predložaka. Ovo omogućuje proširenje funkcionalnosti predložaka dodavanjem specifičnih operacija koje se mogu izvršavati nad podacima, čime se povećava fleksibilnost cijelog sustava predložaka [20].

Sljedeći je isječak primjer jednog predloška kakav bi se mogao naći u točki kontakta. Unutar definiranog predloška prolazi se po svim generiranim alarmima i za svaki alarm iz popisa oznaka odabere se oznaka s ključem *alertname*. Isto tako, provjerava se trenutno stanje alarma i na temelju dobivene varijable generira se ostatak poruke.

```
{{ define "custom_alert_template" }}
  {{ range .Alerts }}
    This is my alert named {{ index .Labels "alertname" }}
    {{ if eq .Status "resolved" }}
      This alert is resolved.
    {{ else }}
      This alert is currently firing!
    {{ end }}
  {{ end }}
{{ end }}
```

Isječak koda 6.5: Primjer predloška u programskom jeziku Go

Predlošci u jeziku Go prate određenu strukturu, te se varijable predloška mijenjaju podacima iz samog alarma. Sučelje za kreiranje predloška nudi i provjeru napisanog testirajući predložak nad testnim alarmom. Također je moguće verificirati valjanost predloška s podacima iz trenutno aktivnog alarma. Slika 6.12 prikazuje testiranje gornjeg predloška nad kreiranim testnim alarmom. Alarmi su podaci u formatu JSON koji se dinamički učitaju u taj predložak.



Slika 6.12: Primjer testiranja predloška nad probnim alarmom

Za potrebe razvijenog sustava kreirano su dva alarma: alarm za vlažnost tla te alarm kada u bazi nema novih podataka duži vremenski period. Najprije je kreiran alarm kada je u kanti *esp32state* vrlo malo ili nema uopće podataka u posljednjih deset minuta. Alarm je kreiran pomoću sljedećeg upita:

```
from(bucket: "esp32state")
|> range(start: v.timeRangeStart, stop: v.timeRangeStop)
|> filter(fn: (r) => r._measurement == "esp32")
|> group(columns: ["device_id"])
|> count()
|> yield(name: "count")
```

Isječak koda 6.6: Upit za alarm o nedostatku podataka

Upit je vrlo sličan ranijem upitu za dohvat podatkovnih točaka, no razlika jest što sljedeći upit vraća isključivo broj pronađenih točaka. Ako se u kanti nalazi manje od pet točaka, ili ako ih nema uopće, alarm se aktivira. Također je postavljeno aktiviranje

alarma ako upit ne vrati nikakvu vrijednost, ili vrati praznu vrijednost. Evaluacijski period je pet minuta, te uvjet mora biti ispunjen još sljedećih pet minuta kako bi se alarm aktivirao. Slika 6.13 prikazuje kreirani alarm. Alarmu su dodijeljene dvije oznake: jedna za vrstu uređaja, dok druga definira primatelja alarma. Notifikacijska politika povezuje ovu oznaku sa kontaktnom točkom. Alarm je također moguće utišati na željeni vremenski period. Utišanja alarma (engl. *alert silences*) stvaraju se na temelju oznaka i imena alarma. Obavezno je definirati trajanje utišanja budući da nije moguće neograničeno utišati alarme.



State	Name	Health	Summary
Normal	ESP32State missing data	ok	

Buttons: [Silence](#) [Show state history](#)

Evaluate: Every 5m

Pending period: 5m

Labels: device: ESP32 receiver: jgavran_mail

Description: Bucket ESP32State has received little to none data points for the last 10 minutes. Check device connectivity.

Slika 6.13: Alarm za podatke koji nedostaju posljednjih deset minuta

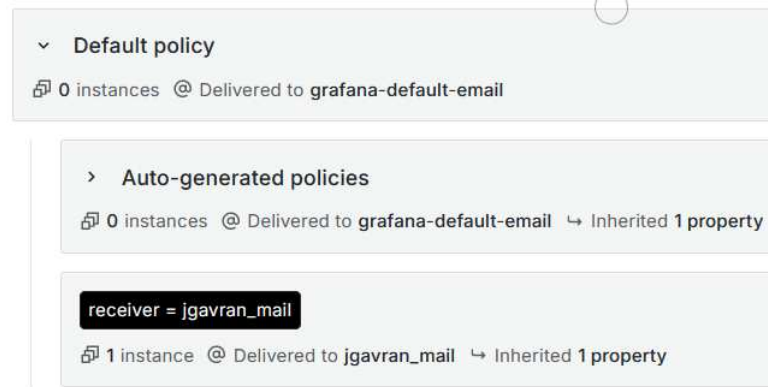
Na slici 6.14 nalaze se stanja alarma kroz vrijeme. Vremenski najstarije stanje prikazano je na dnu tablice stanja. Kao što je vidljivo na slici, alarm je bio aktivan određeni vremenski period. Oznaka *Nodata* indikator je da je alarm aktiviran jer upit nije vratio nikakav rezultat, što je također znak da se u kanti ne nalaze nikakvi podaci. Nakon toga je alarm pauziran, čime se vratio u normalno stanje. Nakon toga je ponovno pokrenut, te budući da se u idućih pet minuta u bazi nisu pojavili nikakvi podaci, alarm prelazi u stanje čekanja označeno žutom bojom. Po isteku vremena čekanja alarm se ponovno aktivirao.

State	
Alerting (Nodata)	ESP32State missing data -
Pending (Nodata)	ESP32State missing data -
Normal (Paused)	ESP32State missing data -
Alerting (Nodata)	ESP32State missing data -

Slika 6.14: Promjena stanja alarma za podatke

Slika 6.15 sadrži prikaz notifikacijskih politika. Vidljiva je ugniježđena stablasta

struktura politika. Isto tako, na dnu se nalazi nova notifikacijska politika koja sve alarme s oznakom primatelja postavljenom na *jgavran_mail* preusmjerava na kontaktnu točku *jgavran_mail*. Ta kontaktna točka sadrži popis adresa e-pošte na koje se šalje obavijest o alarmu.



Slika 6.15: Popis notifikacijskih politika i pripadajućih oznaka

Kreirani su predlošci za naslov i tijelo obavijesti alarma. Kao što je ranije opisano, korišteni su predlošci programskog jezika Go. Svaka poruka e-pošte koja se pošalje putem točke kontakta formatirana je na temelju kreiranog predloška. U nastavku su navedeni predlošci za naslov i tijelo poruke. Predložak za naslov je jednostavan, te osim naziva alarma sadrži jedino provjeru je li poslana obavijest o aktivaciji ili razrješenju alarma. S druge strane, predložak za tijelo koristi puno više sadržaja samog alarma za generiranje obavijesti. Na početku samog predloška definirane su varijable za poruku, sažetak i opis alarma. Sve tri varijable su navedene jer postoji mogućnost da će kreirani alarm imati jedno ili pak više od opisnih polja, stoga je važno uzeti u obzir sve opcije. Nakon toga, ovisno o tome postoje li varijable ili ne, uključuju se u predložak. Budući da je alarme moguće pridružiti nadzornim pločama, ako je navedenom alarmu pridružen panel odnosno nadzorna ploča, prikazat će se izravna poveznica na ploču. Nadalje se prikazuju sve oznake definirane u alarmu kao i vrijednosti samih izraza korištenih u alarmu kako bi obavijest bila potpunog sadržaja i kako bi korisnik zaključio je li potrebno brzo reagirati na obavijest. Spojnice na početku i kraju pojedinih izraza služe za uklanjanje praznih znakova.

```
{{ define "jgavran_title_template" }}
  {{ range .Alerts }}
    {{if eq .Status "resolved" }}
    [OK] {{ index .Labels "alertname" }}
    {{ else }}
```

```

    [FIRING] {{ index .Labels "alertname" }}
    {{ end }}
  {{ end }}
{{ end }}

{{ define "jgavran_body_template" }}

{{ range .Alerts }}

  {{- $message := index .Annotations "message" -}}
  {{- $summary := index .Annotations "summary" -}}
  {{- $description := index .Annotations "description" -}}

  {{- if $message }}
  {{$message -}}
  {{ end }}
  {{- if $summary }}
  {{$summary -}}
  {{ end }}
  {{- if $description }}
  {{$description -}}
  {{ end }}

  Dashboard: {{ .DashboardURL }}
  Labels:
  {{ range .Labels.SortedPairs -}}
    - {{ .Name }} = {{ .Value }}
  {{ end }}
  Values:
    {{ .ValueString }}

{{ end }}

{{ end }}

```

Isječak koda 6.7: Predlošci za naslov i tijelo obavijesti alarma

Sljedeća slika prikazuje obavijest dobivenu na temelju opisanog alarma koji je preusmjeren na točku kontakta e-pošte i zatim obrađen gornjim predloškom. Iz naslova je

moguće vidjeti kako je alarm razriješen, a u samom tijelu nalaze se detaljnije informacije o samom alarmu.

[OK] ESP32State missing data



Alerts › ESP32State missing data

Bucket ESP32State has received little to none data points for the last 10 minutes. Check device connectivity.

Dashboard:

Labels:

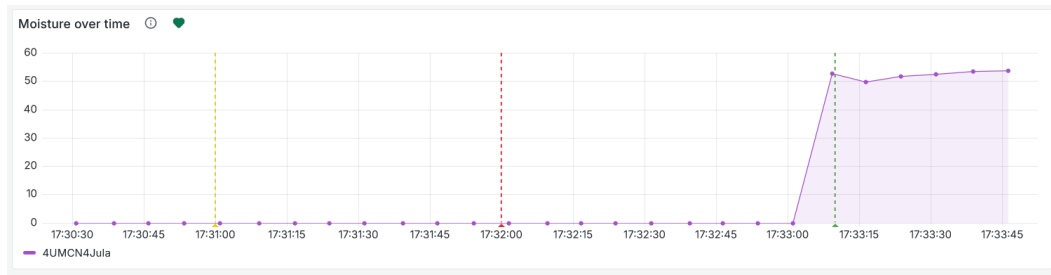
- alertname = ESP32State missing data
- datasource_uid = bdqxp55azy6f4d
- device = ESP32
- grafana_folder = Alerts
- receiver = jgavran_mail
- ref_id = A

Values:

Slika 6.16: E-pošta o razriješenom alarmu

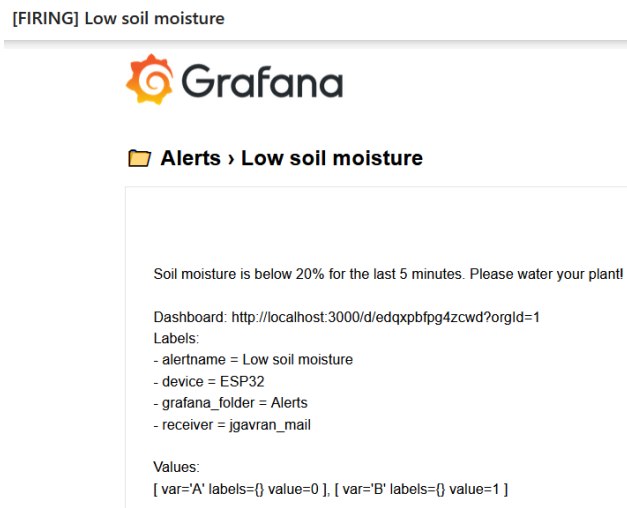
Kao što je već spomenuto, alarmi se mogu pridružiti pojedinim panelima. Tako je kreiran alarm za senzorsko očitavanje vlažnosti tla i pridružen je pripadnom linijskom vremenskom grafu. Važno je napomenuti kako se alarmi mogu pridružiti samo panelima koji prikazuju vremenske serije. Upit za vlažnost tla dohvaća samo posljednje vrijednosti za svaki uređaj i u postavkama alarma izraz se evaluira svakih deset sekundi, što je ujedno i minimalno dozvoljeni evaluacijski period. Period čekanja odnosno vremenski okvir u kojem uvjet mora biti ispunjen jest jedna minuta. Periodi su postavljeni tako nisko radi jednostavnijeg testiranja alarma, no nakon provjere valjanosti alarma jednostavno ih je prilagoditi. Kao granica prihvatljivosti vlažnosti zemlje uzeta je vrijednost od 20%. Na slici 6.17 nalazi se ranije prikazan graf za vlažnost tla kroz vrijeme, no ovaj mu je put pridružen alarm. Ikona srca pokraj naziva panela upućuje da je alarm vezan za njega. Na grafu je vidljivo kako je na početku vlažnost tla jednaka nuli, stoga je poslije prve evaluacije nakon kreiranja alarma alarm promijenio stanje u čekanje, što je označeno okomitom žutom crtom. Nakon isteka perioda čekanja, a vlažnost tla je i dalje ispod dozvoljene vrijednosti, alarm prelazi u aktivno stanje. Aktivacija alarma signalizira se crvenom okomitom crtom. Vlažnost tla je zatim promijenila vrijednost u otprilike 50%, zbog čega je stanje alarma nakon jedne

minute vraćeno u normalno, i to se očituje okomitom zelenom crtom.



Slika 6.17: Alarm za vlažnost tla kroz vrijeme

Sljedeće dvije slike 6.18 i 6.19 prikazuju obavijesti dobivene pri aktivaciji i razrješenju alarma. Vrijednosti izraza A i B odnose se na strukturu samog alarma. Izraz A jest vrijednost samog upita, dok je izraz B procjena postavljenog uvjeta. Iz prve se obavijesti može vidjeti da je vrijednost izraza A bila jednaka nuli, što je vidljivo i na gornjem grafu. Budući da je uvjet postavljen u izrazu B zadovoljen, odnosno vrijednost izraza A je manja od 20, vrijednost izraza B jednaka je jedinici, što signalizira aktivaciju alarma. S druge strane, u obavijesti razrješenja alarma vrijednost izraza A jednaka je 52.68, što je više od postavljenog uvjeta izraza B, stoga je njegova vrijednost jednaka nuli.



Slika 6.18: Obavijest o aktivaciji alarma niske vlažnosti tla

Alarmi se mogu sukladno napraviti za vlagu i temperaturu zraka. Preporuča se kreirati odvojene alarme za sva senzorska očitavanja kako bi imali različite granične vrijednosti. Isto tako, ako korišteni uređaji prate drukčije uvjete gdje su granične vrijednosti različite od postavljenih, moguće je kreirati i alarme specifične uređajima. Potrebno je samo u upit alarma navesti specifičan uređaj nad kojim se ispituju podaci.

[OK] Low soil moisture



Alerts › Low soil moisture

Soil moisture is below 20% for the last 5 minutes. Please water your plant!

Dashboard: <http://localhost:3000/d/edqxpbfpg4zcwd?orgId=1>

Labels:

- alertname = Low soil moisture
- device = ESP32
- grafana_folder = Alerts
- receiver = jgavran_mail

Values:

[var='A' labels={} value=52.68428421020508], [var='B' labels={} value=0]

Slika 6.19: Obavijest o razrješenju alarma niske vlažnosti tla

Osim e-pošte, alarmi se mogu preusmjeravati na različite kanale i mobilne aplikacije koje podržavaju obavješćavanje. Aplikacije koje se često koriste za slanje obavijesti su PagerDuty i Opsgenie. To su vodeće aplikacije za upravljanje incidentima i obavješćavanje koje pomažu organizacijama da odgovore na kritične probleme i smanje vrijeme odgovora na incident. Aplikacije se jednostavno integriraju s različitim sustavima za praćenje i omogućavaju definiranje složenih pravila obavješćavanja i automatizaciju eskalacijskih postupak. Osim *push* notifikacijama, aplikacije mogu slati obavijesti i putem SMS poruke te poziva, ovisno o definiranoj eskalacijskoj politici [42]. Navedene aplikacije mogu se integrirati s Grafanom pomoću API ključa kreiranog u aplikaciji. Tako se obavijesti o promjenama stanja u razvijenom sustavu mogu detaljnije i pozornije pratiti.

7. Zaključak

Na razvojnom sustavu ESP32-C3-DevKitM-1 implementiran je sustav za nadzor poljoprivredne površine. Na uređaj je spojena senzorska mreža koja mjeri uvjete okoline, odnosno temperaturu i vlagu zraka te vlažnost zemlje. Razvojni je sustav dinamički spojen na Wi-Fi mrežu te se očitana mjerenja šalju protokolom MQTT na platformu AWS. Platforma obrađuje primljene podatke i pohranjuje ih u bazu podataka InfluxDB. Uređaj isto tako šalje posljednje poznato stanje LED diode koje platforma također sprema u bazu. Pohranjeni podaci vizualizirani su u web aplikaciji temeljenoj na aplikaciji Grafana. Kreirani su grafovi koji prikazuju mjerene parametre kroz vrijeme, kao i njihove trenutne vrijednosti. Stvoren je i alarmni sustav koji obavještava o nepovoljnim uvjetima poljoprivredne površine.

Implementacija ovog sustava za poljoprivredni nadzor značajan je doprinos preciznoj poljoprivredi omogućujući poljoprivrednicima da prate i upravljaju uvjetima na svojim gospodarstvima u stvarnom vremenu. Korištenjem senzorske mreže poljoprivrednici mogu dobiti točne i aktualne informacije o mikroklimatskim uvjetima. Bežično povezivanje i slanje omogućuje kontinuirano praćenje i brzu reakciju na promjene uvjeta, što je ključno za optimizaciju resursa. Isto tako, ispad uređaja iz bežične mreže ne koči funkcionalnost sustava koji pohranjuje posljednje poznato stanje. Alarmni sustav poboljšava sposobnost brzog odgovora i preventivnog djelovanja, smanjujući rizik od oštećenja usjeva i osiguravajući optimalne uvjete za rast biljaka. Na ovaj način, implementirani IoT sustav ne samo da poboljšava efikasnost i produktivnost, već i smanjuje troškove te negativan utjecaj na okoliš, što je u skladu s ciljevima održive i precizne poljoprivrede.

LITERATURA

- [1] Aws regions and availability zones. 2024. URL <https://medium.com/my-experiments-with-aws/aws-regions-and-availability-zones-973b89f6f24c>.
- [2] LVGL, 2024. URL <https://lvgl.io/>.
- [3] Digital Agro. Precizna poljoprivreda. URL <https://digitalagro.eu/revolucija-poljoprivrede-precizna-poljoprivreda/>.
- [4] AWS *Documentation*. Amazon.com, Inc., 2024. URL <https://docs.aws.amazon.com/index.html>.
- [5] Katharine Angelopoulos. Understanding cloud computing: The aws ec2 instance. 2022. URL <https://medium.com/@kangelopoulos/understanding-cloud-computing-the-aws-ec2-instance-e9e0b7d39040>.
- [6] J. Arapović. *Mladi poljoprivrednici i "pametna" poljoprivreda*. University of Zagreb, Faculty of Agriculture, 2019. URL <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:204:136155>.
- [7] Stephen J. Bigelow. What is edge computing? everything you need to know. 2021. URL <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/definition/edge-computing>.
- [8] C. Bormann. *CBOR*, 2020. URL <https://cbor.io/>.
- [9] Marshall Brain i Talon Homer. How wifi works. 2021. URL <https://computer.howstuffworks.com/wireless-network.htm>.
- [10] American Bright. Major benefits of addressable rgb leds with integrated circuits. URL <https://www.americanbrightled.com/>

flexibility-control-and-customization-major-benefits-of-addressable-rgb-leds-with-integrated-circuits/.

- [11] Abdulgani Devlet. Modern agriculture and challenges. *Frontiers in Life Sciences and Related Technologies*, 2021. URL <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1495988>.
- [12] Programming Electronics. How to use spiffs for an esp32 file system. 2024. URL <https://www.programmingelectronics.com/spiffs-esp32/#what-is-spiffs>.
- [13] EPRS. *Precision agriculture and the future of farming in Europe. Scientific Foresight Study*. 2016. URL [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU\(2016\)581892_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU(2016)581892_EN.pdf).
- [14] Espressif. *esp-aws-iot*, 2023. URL <https://github.com/espressif/esp-aws-iot/tree/release/202012.04-LTS>.
- [15] Espressif. *Provisioning API*, 2024. URL <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.1/esp32/api-reference/provisioning/provisioning.html>.
- [16] *ESP32-C3 Series Datasheet*. Espressif Systems, 2023. URL https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf.
- [17] *ESP32-C3-Mini 1 Datasheet*. Espressif Systems, 2023. URL https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3-mini-1_datasheet_en.pdf.
- [18] *ESP-IDF Programming Guide*. Espressif Systems, 2023. URL <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.0.2/esp32c3/index.html>.
- [19] FreeRTOS. *AWS IoT Fleet Provisioning*, 2023. URL <https://aws.github.io/Fleet-Provisioning-for-AWS-IoT-embedded-sdk/v1.1.0/>.
- [20] Google. *Go template*, 2024. URL <https://pkg.go.dev/text/template>.
- [21] Google. *Protocol Buffers - Google's data interchange format*, 2024. URL <https://protobuf.dev/>.

- [22] IBM. Simple network time protocol. 2024. URL <https://www.ibm.com/docs/en/i/7.5?topic=services-simple-network-time-protocol>.
- [23] InfluxData. *Get started with InfluxDB v2*, 2024. URL <https://docs.influxdata.com/influxdb/v2>.
- [24] Intuz. Top 25 iot development board list. 2023. URL <https://www.intuz.com/guide-on-top-iot-development-boards>.
- [25] Akashdeep Kashyap. What you need to know about pkcs11? 2024. URL <https://www.encryptionconsulting.com/what-you-need-to-know-about-pkcs11/>.
- [26] Grafana Labs. *Grafana documentation*, 2024. URL <https://grafana.com/docs/grafana/latest/>.
- [27] Aris S. Linas L. What is a cron job: Understanding cron syntax and how to configure cron jobs. 2024. URL <https://www.hostinger.com/tutorials/cron-job>.
- [28] Microsoft. Wi-fi problems in your home. . URL <https://support.microsoft.com/hr-hr/windows/problemi-s-wi-fijem-i-raspored-va%C5%A1lega-doma-eled42e7-a3c5-d1be-2abb-e8fad00ad32a>.
- [29] Microsoft. What is softap? . URL <https://answers.microsoft.com/en-us/windows/forum/all/what-is-softap-what-does-it-do-where-do-i-get-it/e9e0385b-ad1a-446f-8b75-7973326c2629>.
- [30] Mouser. *DHT11 Humidity and Temperature Sensor*. URL <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>.
- [31] *MQTT*. MQTT.org, 2022.
- [32] Alen Mujčinović. Izazovi i perspektive modernizacije poljoprivredno-prehrambenog sektora u bih. 2022. URL <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/sarajevo/19811.pdf>.

- [33] A. S. Gillis N. Barney. Amazon web services (aws). URL <https://www.techtarget.com/searchaws/definition/Amazon-Web-Services>.
- [34] IoT Net. Poljoprivreda - sigfoxova rješenja. URL <https://www.iotnet.hr/EasyEdit/UserFiles/brochures/iotnet-usecase-poljoprivreda1.pdf>.
- [35] Višacki V. Sedlar A. Bugarin R. Mašan V. Turan J. Janić T. Ponjičan O. Pri-
mena precizne poljoprivrede u ratarskoj proizvodnji: koncept i implementacija.
Savremena poljoprivredna tehnika, 2018.
- [36] Kostiantyn Oliynyk. Using grafana for iot: Benefits, challenges and best prac-
tices. 2023. URL <https://webbylab.com/blog/using-grafana-for-iot-benefits-challenges-and-best-practices/>.
- [37] Germán Portillo. Tradicionalna poljoprivreda. URL <https://www.jardineriaon.com/hr/tradicionalna-poljoprivreda.html>.
- [38] Carol Sliwa Robert Sheldon. Non-volatile storage (nvs). 2021. URL <https://www.techtarget.com/searchstorage/definition/nonvolatile-storage>.
- [39] Aleksandar Stojanović. *Osvrt na NoSQL baze podataka*. 2016. URL <https://hrcak.srce.hr/file/283391>.
- [40] *IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks*. The Working Group for WLAN
Standards, 2023. URL <https://www.ieee802.org/11/>.
- [41] Sherry Tiao. What is big data? 2024. URL <https://www.oracle.com/big-data/what-is-big-data/>.
- [42] Trundl. Pagerduty vs opsgenie. 2023. URL <https://trundl.com/resources/itsm-esm/pagerduty-vs-opsgenie/>.
- [43] Random Nerd Tutorials. Esp32 useful wi-fi library functions. 2021. URL <https://randomnerdtutorials.com/esp32-useful-wi-fi-functions-arduino/>.

Sustav za udaljeni nadzor u poljoprivredi temeljen na platformi ESP32-C3 i AWS-uslugama

Sažetak

U ovom radu implementiran je IoT sustav za preciznu poljoprivredu temeljen na razvojnom sustavu ESP32-C3-DevKitM-1 i platformi za računarstvo u oblaku AWS. Na razvojni je sustav spojena senzorska mreža za praćenje različitih poljoprivrednih uvjeta. Korištena je programska biblioteka ESP-AWS-IoT koja omogućuje povezivanje ugradbenog sustava s AWS oblakom putem Wi-Fi mreže. Korišten je protokol MQTT za prijenos podataka s uređaja na platformu u oblaku. Korištena je baza podataka InfluxDB za pohranu podataka u oblaku. Razvijena je web aplikacija temeljena na aplikaciji Grafana za vizualizaciju prikupljenih podataka. Razvijen je alarmni sustav za obavješćavanje o promjeni nadziranih parametara.

Ključne riječi: IoT, ESP32-C3-DevKitM-1, AWS, MQTT, InfluxDB, Grafana, računarstvo u oblaku, precizna poljoprivreda

System for remote monitoring in agriculture based on ESP32-C3 platform and AWS services

Abstract

This thesis describes an implementation of an IoT system for precision agriculture based on ESP32-C3-DevKitM-1 development system and AWS platform for cloud computing. A sensor network for monitoring agricultural conditions is connected to the development system. ESP-AWS-IoT library is used to connect the embedded system and the cloud platform over Wi-Fi. MQTT protocol is used for data transmission from the device to the cloud platform. InfluxDB database is employed for cloud data storage. A web application based on Grafana was developed for visualization of the collected data. An alerting system was developed with a goal to notify users of changes in the monitored parameters.

Keywords: IoT, ESP32-C3-DevKitM-1, AWS, MQTT, InfluxDB, Grafana, cloud computing, precision agriculture