

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Josip Spišić

**ENERGETSKI UČINKOVIT SENZORSKI  
SKLOP ZA PROCJENU  
MORFO-FIZIOLOŠKOG STANJA BILJAKA  
KORIŠTENJEM NIR SPEKTROMETRA S  
PRIMJENOM U PRECIZNOJ  
POLJOPRIVREDI**

Doktorska disertacija

Osijek, 2026.

Doktorska disertacija izrađena je na:

Zavodu za komunikacije,

Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek,

Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

**Mentor:** prof. dr.sc. Davor Vinko

Disertacija ima **XXXXX** stranica

Disertacija broj: **XXXXX**

# Sadržaj

|   | Stranica |
|---|----------|
| 1. Uvod . . . . .   | 1        |
| 1.1. Ciljevi istraživanja . . . . .   | 6        |
| 1.2. Organizacija i struktura doktorskog rada . . . . .   | 7        |
| 2. Suvremene metode i senzori za mjerenje fiziološkog stanja usjeva<br>kukuruza . . . . .   | 9        |
| 2.1. Izravna procjena fenotipskih svojstava usjeva kukuruza . . .   | 14       |
| 2.2. Metode za mjerenje fluorescencije klorofila . . . . .  | 15       |
| 2.3. Komercijalni senzori . . . . .   | 20       |
| 2.4. Bežične senzorske mreže . . . . .  | 21       |
| 2.5. Tehnologije dugog dometa i male potrošnje energije . . . . .   | 25       |
| 3. Dizajn i realizacija senzorskog sklopa . . . . .   | 33       |
| 3.1. Mikroupravljač STM32G030K8T6 . . . . .   | 34       |
| 3.2. Primopredajni modul RFM95W . . . . .   | 38       |
| 3.3. Baterijski sustav . . . . .  | 38       |
| 3.4. Istosmjerni pretvarač napona . . . . .   | 41       |
| 4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za po-<br>većanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj po-<br>ljoprivredi . . . . . | 44       |
| 4.1. Simulacijska analiza topologija i utjecaja prometa . . . . .   | 45       |
| 4.2. LoRaWAN protokol . . . . .   | 51       |
| 4.2.1. Usporedba zvjezdaste i linijske topologije . . . . .   | 54       |
| 4.2.2. Utjecaj količine prometa na potrošnju energije. . . . .  | 63       |
| 4.2.3. Utjecaj radijskih parametara . . . . .   | 70       |

|   |     |
|---|-----|
| 4.3. Mjerenje komunikacijskog dometa i prigušenja signala na realnom kanalu . . . . .   | 75  |
| 4.3.1. Metodologija . . . . .   | 76  |
| 4.3.2. Scenariji mjerenja . . . . .   | 76  |
| 4.3.3. Konfiguracija sustava . . . . .  | 77  |
| 4.3.4. Pokazatelji performansi . . . . .  | 77  |
| 4.3.5. Rezultati mjerenja po scenarijima . . . . .  | 79  |
| 4.3.6. Sinteza rezultata mjerenja . . . . .   | 84  |
| 4.4. Optimizacija prijenosa: ADR, potvrđeni prijenosi i veličina paketa . . . . .   | 85  |
| 4.4.1. Adaptivna brzina prijenosa, potvrđeni prijenosi i optimizacija parametara. . . . .   | 90  |
| 4.4.2. Optimizacija veličine paketa . . . . .   | 95  |
| 4.5. Implementacija mreže u realnom okruženju . . . . .   | 97  |
| 4.6. Rasprava . . . . .   | 99  |
| 5. Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra .                                    | 101 |
| 5.1. Terenski pokusi. . . . .   | 102 |
| 5.2. Metodologija . . . . .   | 103 |
| 5.2.1. Analiza podataka i vegetacijski indeksi . . . . .  | 105 |
| 5.2.2. Algoritmi strojnog i dubokog učenja . . . . .  | 106 |
| 5.2.3. Postupci validacije modela . . . . .   | 110 |
| 5.3. Rezultati . . . . .  | 111 |
| 5.4. Vrednovanje algoritama strojnog učenja za predviđanje rolanja lista . . . . .  | 114 |
| 5.5. Rasprava . . . . .   | 117 |
| 6. Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra . . . . . | 121 |
| 6.1. Terenska istraživanja i eksperimentalni postav. . . . .  | 123 |
| 6.2. Arhitektura i konfiguracija SPD čvora. . . . .   | 124 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>6.3. Analiza podataka i matematički okvir . . . . .</b>        | <b>126</b> |
| 6.3.1. Parcijalna regresija najmanjih kvadrata (PLSR) . . . . .   | 131        |
| 6.3.2. Obrada podataka u stvarnom vremenu na SPD uređaju. . . . . | 133        |
| <b>6.4. Rezultati . . . . .</b>                                   | <b>133</b> |
| <b>6.5. Analiza energetske učinkovitosti . . . . .</b>            | <b>139</b> |
| <b>6.6. Rasprava . . . . .</b>                                    | <b>140</b> |
| <b>7. Zaključak. . . . .</b>                                      | <b>141</b> |
| <b>Literatura. . . . .</b>  | <b>143</b> |
| <b>Popis slika . . . . .</b>                                      | <b>163</b> |
| <b>Popis tablica . . . . .</b>                                    | <b>168</b> |
| <b>Prilozi . . . . .</b>  | <b>171</b> |
| Shema STM32 mikrokontrolera . . . . .                             | 171        |
| Shema napajanja i punjenja baterije . . . . .                     | 173        |
| Shema RFM95 LoRa modula . . . . .                                 | 174        |
| Shema AS7263 NIR spektrometra . . . . .                           | 175        |
| <b>Sažetak . . . . .</b>  | <b>176</b> |
| <b>Abstract . . . . .</b>   | <b>178</b> |
| <b>Životopis . . . . .</b>  | <b>180</b> |

# 1. Uvod

Svi fotosintetski organizmi posjeduju sposobnost pretvorbe svjetlosne energije u kemijsku procesom fotosinteze. Svjetlost koja dospije do biljnog lista može se iskoristiti za proizvodnju kemijske energije biokemijskim procesima koje omogućuju molekule klorofila, što se naziva primarnom fotokemijom, a može se disipirati u obliku topline iz biokemijskih podjedinica fotosustava i iz molekula klorofila u obliku slabe svjetlosti na većim valnim duljinama u crvenome spektru, odnosno u obliku fluorescencije.

U poljoprivrednim proizvodnim sustavima fiziološkim statusom biljaka upravlja se primjenom mnogih agrotehničkih postupaka poput gnojidbe, suzbijanja korova, plodoreda itd. Međutim, navedeni upravljački postupci još uvijek ne mogu u potpunosti zaštititi biljke od slučajnih odstupanja koja se javljaju u agroekosustavu. Biljke su u polju stoga izložene mnogim nekontroliranim čimbenicima koji uzrokuju morfo-fiziološke poremećaje poznate kao stresna stanja. Smatra se da trenutačno stanje fotosustava odražava sva prethodna stanja kroz koja je biljka prošla [1] i moguće stresove koji se javljaju u sadašnjem trenutku. U mnogim se istraživanjima JIP-test pokazao korisnim za praćenje statusa biljaka u odnosu na stres te je poznato da reagira na sušu [2, 3], visoku gustoću sadnje [4], visoke i niske temperature i uvjete slabog osvjetljenja [5, 6], nedostatak hranjivih tvari [7], povećani udio soli [8], toksičnost teških metala [9, 10].

Međutim, primjena JIP-testa ima nekoliko ograničenja:

1. Uzorak se mora adaptirati na mrak. Trajanje adaptacije je 30 minuta, a biljke danju gotovo nikada nisu u mračnim uvjetima,
2. Samo mjerenje u trajanju od jedne sekunde koristi se za procjenu statusa cijele biljke koja raste tjednima ili mjesecima, pa je potreban velik broj tih "točkastih" mjerenja kako bi se pokrilo neko razdoblje rasta,
3. Primijenjeno pobuđujuće svjetlo za indukciju fluorescencije ne nalikuje sunčevoj svjetlosti kojoj je biljka izložena u poljskim uvjetima.

Kako bi se riješio problem navedenih ograničenja, predloženo je nekoliko pristupa. Jedan je od takvih pristupa mjerenje fluorescencije inducirane snažnim laserskim diodama s većih udaljenosti i dobivanje stacionarnih razina fluorescencije [11]. Drugi je pristup postavljanje nadzornih uređaja s više senzora te provođenje kratkoročnoga i dugoročnoga praćenja fluorescencije [12]. Sve popularnija metoda jest i fluorescentno snimanje biljnih uzoraka [13]. Međutim, te metode omogućuju analizu samo ograničenoga broja uzoraka. Jedan od perspektivnijih pristupa mjerenju fluorescencije klorofila jest uporaba zračnih hiperspektralnih snimaka prikupljenih iz bespilotnih letjelica [14] i satelita [15]. U tom se pristupu pasivna fluorescencija koju neprekidno inducira Sunčeva svjetlost izračunava primjenom Fraunhoferovih linija i ekstrahira iz svakog čistog piksela snimke na temelju nekoliko spektralnih pojaseva. Utvrđeno je da postoji značajna korelacija između parametara fluorescencije izmjerenih na tlu i onih izračunatih iz snimaka prikupljenih hiperspektralnim kamerama. Učinci stresa na biljnu fotosintezu [16] mogu se predvidjeti analizom hiperspektralnih snimaka te je moguće modelirati bruto iznos primarne fotosintetske proizvodnje [17, 18]. Suncem inducirana fluorescencija (SIF, *engl. Solar Induced Fluorescence*) može ponuditi metodu za visokoprotoknu procjenu stanja biljke. Iako već postoji nekoliko rješenja koja primjenjuju automatizirane senzore u praksi [19–21] i dalje postoji prostor za unaprjeđenje modeliranja poljoprivredne proizvodnje.

Pojavom novih tehnologija, poput interneta stvari (IoT, *engl. Internet of Things*), povećanje produktivnosti poljoprivrednih aktivnosti postalo je ključno za poboljšanje prinosa i isplativosti. Tehnologije IoT-a mogu poboljšati učinkovitost poljoprivrednih procesa smanjenjem ljudske intervencije u proizvodnji i upravljanju usjevima. Navedene promjene mijenjaju paradigmu tradicionalne poljoprivredne prakse i nude nove mogućnosti poljoprivrednicima, no istodobno ih suočavaju s različitim izazovima. Daljinsko očitavanje (*engl. Remote Sensing*) i praćenje reakcija vegetacije na stres posljednjih su godina postali iznimno relevantni za održivu i preciznu poljoprivredu. Kontinuirani razvoj optičkih tehnologija i senzora omogućio je razvoj metoda i procesa koji povećavaju razumijevanje kompleksnih morfo-fizioloških procesa povezanih sa stresom biljaka. Rast biljaka može biti narušen različitim abiotičkim poput nedostatka vode i nutritivnoga stresa te biotičkim stresovima poput utjecaja štetnika i patogena. Pravodobno otkrivanje morfo-fizioloških promjena biljaka te dijagnosticiranje stresnih stanja od velike su važnosti za poboljšanje otpornosti biljaka na stres i osiguranje većega prinosa. Za prikupljanje informacija o usjevima i praćenje stresa rabe se različiti sen-

zori npr. spektrometri te multispektralne i hiperspektralne kamere. Navedeni senzori mogu biti montirani na mobilne robote, bespilotne letjelice (UAV, engl. Unmanned Aerial Vehicle) ili satelite, čime prikupljaju informacije o stanju biljaka. Razvijene su brojne tehnologije za detekciju stresa primjenom umjetne inteligencije (AI, engl. Artificial Intelligence) kako bi se zadovoljile potrebe u različitim scenarijima primjene. Stoga se ova doktorska disertacija bavi tehnologijama za prikupljanje i obradu informacija o poljoprivrednim usjevima, praćenjem čimbenika stresa tijekom rasta biljaka, metodama za analizu stresnih stanja te razvojem energetski učinkovitih senzorskih sklopova za procjenu morfo-fiziološkoga stanja usjeva kukuruza primjenom NIR spektrometra i LoRaWAN (engl. *Long Range Wide Area Network*) protokola za prijenos podataka na udaljenosti veće od kilometar uz nisku potrošnju energije.

Istraživanje obuhvaća metodu detekcije rolanja lišća kukuruza u stvarnom vremenu primjenom metoda strojnog učenja i NIR spektrometra, metodu optimizacije parametara protokola LoRaWAN za povećanje udjela dostavljenih paketa pri primjeni u preciznoj poljoprivredi, metodu određivanja normaliziranog diferencijskog vegetacijskog indeksa (NDVI, engl. *Normalized Difference Vegetation Index*) uporabom NIR spektrometra te energetski učinkovitu metodu za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjivu na senzorskom sklopu. Na samo morfo-fiziološko stanje biljaka može se utjecati nizom agrotehničkih mjera, poput prihrane gnojivima, suzbijanja korova, primjene ispravnoga plodoreda i navodnjavanja. Međutim, navedeni agrotehnički postupci još uvijek ne mogu u potpunosti zaštititi biljke od slučajnih odstupanja koja se javljaju u agroekosustavu.

| Karakteristike         | Spektrometar   | Multispektralni senzor   | Hiperspektralni senzor                                       |
|------------------------|--|--|--|
| Broj pojasa            | Jedan ili nekoliko kanala                                  | 3–10 diskretnih kanala   | Stotine kontinuiranih kanala                                 |
| Spektralna razlučivost | Visoka   | Umjerena   | Vrlo visoka  |
| Prostorna razlučivost  | Niska  | Visoka   | Varijabilna, obično niža od multispektralnih                 |
| Vremenska razlučivost  | Kontinuirana (kod stacionarnih IoT senzora) ili na zahtjev | Ovisi o platformi (npr. 5 dana za satelite, na zahtjev za dronove) | Ovisi o platformi (rjeđa za satelite, na zahtjev za dronove) |
| Izlazni podatci        | Detaljni spektralni grafovi                                | Multipojasne slike   | Hiperspektralne koce podataka                                |
| Tipične primjene       | Kemijska analiza, identifikacija materijala                | Praćenje zdravlja biljaka, ekološka istraživanja                   | Detaljna identifikacija materijala, napredna poljoprivreda   |
| Cijena                 | Niska do umjerena (\$35 USD za AS7263)                     | Umjerena (\$4.500 – \$7.000 USD)                                   | Visoka (\$75.000 – \$220.000 USD)                            |

**Tablica 1.1:** *Usporedba spektrometra, multispektralnog i hiperspektralnog senzora*

Postojeći senzori koji se upotrebljavaju u poljoprivredi mogu se klasificirati prema nekoliko parametara (Tablica 1.1), uključujući spektralnu, prostornu i vremensku razlučivost. Spektrometrijski senzorski sklopovi u okviru IoT-a omogućuju vrlo visoku spektralnu i vremensku razlučivost, no njihova je prostorna razlučivost ograničena. Međutim, navedeno je ograničenje moguće nadomjestiti primjenom velikog broja energetski učinkovitih i jeftinih senzorskih sklopova. Zahvaljujući sposobnosti kontinuiranoga prikupljanja podataka s različitih lokacija, IoT čvorovi omogućuju stvaranje detaljnog i pravodobnog uvida u morfološko stanje biljaka. Navedeni IoT čvorovi, u kombinaciji sa spektrometrima, mogu pružiti vrlo precizne podatke o promjenama u okolišu, zdravlju biljaka i drugim ključnim čimbenicima za poljoprivrednu proizvodnju. Primjerice, senzori postavljeni na poljima mogu pratiti promjene u spektralnom odzivu, vlazi, temperaturi i ostalim uvjetima te slati te podatke u stvarnom vremenu za analizu i donošenje odluka. Takva metoda praćenja biljaka omogućuje poljoprivrednicima pravodobnu reakciju na promjene terenskih uvjeta, čime se poboljšavaju učinkovitost i produktivnost proizvodnje. Primjena velikog broja senzora koji komuniciraju u mreži LoRaWAN smanjuje operativne troškove i omogućuje široku primjenu. Suvremene metode detekcije stresa i mjerenja vegetacijskih indeksa, poput NDVI-a, u poljoprivredi često uključuju primjenu bespilotnih letjelica i satelita. Međutim, obje se tehnologije suočavaju s izazovima vezanima uz vremensku razlučivost. Bespilotne letjelice, iako pružaju

visoku prostornu razlučivost, ne mogu se upotrebljavati svakodnevno zbog visokih operativnih troškova i vremenskih ograničenja. S druge strane, sateliti imaju fiksne cikluse preleta, obično svakih nekoliko dana, a prikupljeni podatci mogu biti nepouzdana u slučaju naoblake, što značajno ograničava dostupnost kvalitetnih podataka. Jedan od načina za prevladavanje tih ograničenja primjena je prostorno-vremenske fuzije podataka prikupljenih IoT čvorovima i satelitima. Ta metoda omogućuje sintezu vrlo gustih podataka visoke prostorne razlučivosti uz niske troškove, čime se vremenska razlučivost poboljšava do dnevne ili satne razine, čak i kada su satelitski podatci diskontinuirani. Sentinel-2 je satelitska misija Europske svemirske agencije koja pruža besplatne multispektralne snimke prilagođene praćenju poljoprivrednih površina. Primjerice, te satelitske snimke, čija vremenska razlučivost iznosi pet dana, mogu se kombinirati s podatcima predloženoga spektralnog IoT senzora [22] kako bi se dobio prikaz usjeva kukuruza visoke prostorne i vremenske razlučivosti. Navedena kombinacija omogućuje precizno praćenje rasta biljaka i detekciju stresa, čime se unaprjeđuje upravljanje usjevima i smanjuju troškovi [23]. Uporaba velikog broja energetski učinkovitih i jeftinih senzorskih sklopova dodatno poboljšava vremensku i spektralnu razlučivost prikupljenih podataka. Senzorski sklopovi omogućuju neprekidno praćenje terenskih uvjeta. Prikupljeni se podatci zatim mogu analizirati u stvarnom vremenu, omogućujući brze reakcije na promjene u okolišu i zdravlju biljaka.

U doktorskoj disertaciji biti će opisana metoda detekcije rolanja lišća kukuruza primjenom AS7263 NIR spektrometra i algoritama strojnog učenja, kao i optimizacija parametara protokola LoRaWAN za uporabu u preciznoj poljoprivredi. Ova metoda uključuje prikupljanje spektralnih podataka u polju s pomoću jeftinih, niskoenergetskih senzorskih sklopova u okviru IoT-a, opremljenih AS7263 NIR spektrometrom. AS7263 NIR spektrometar mjeri refleksiju svjetlosti u šest kanala unutar bliskoga infracrvenog područja (NIR, *engl. Near Infrared*) (610 nm, 680 nm, 730 nm, 760 nm, 810 nm i 860 nm), što omogućuje precizno praćenje morfo-fizioloških promjena na listovima kukuruza, uključujući rolanje lista, koje predstavlja indikator stresa. Senzorski sklopovi sa spektrometrima bit će postavljeni na poljima kukuruza radi kontinuiranog prikupljanja spektralnih podataka. Ovi će senzorski sklopovi putem IoT mreže slati podatke u stvarnom vremenu u središnji sustav za pohranu i analizu, čime se omogućuje vrlo visoka vremenska razlučivost. Prikupljeni spektralni podatci prolazit će kroz proces kalibracije i normalizacije kako bi se uklonile sve nepravilnosti i osigurala točnost mjerenja. Podatci će se analizirati s pomoću algoritama strojnog uče-

nja koji će identificirati obrasce povezane s rolanjem lista. Rezultati analize omogućit će poljoprivrednicima pravodobnu reakciju na morfo-fiziološke promjene kod biljaka. Također, bit će razvijena metoda izračunavanja NDVI-a uporabom AS7263 NIR spektrometra. NDVI je ključan za procjenu zdravlja vegetacije te će se upotrebljavati za daljnju analizu morfo-fiziološkoga stanja biljaka. Osim toga, istražiti će se metoda optimizacije parametara protokola LoRaWAN radi povećanja udjela dostavljenih paketa u preciznoj poljoprivredi. To je ključno za osiguravanje pouzdanog prijenosa podataka, posebice u područjima s ograničenom infrastrukturom. Nadalje, istražiti će se energetske učinkovite metode za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenom podataka prikupljenih AS7263 NIR spektrometrom. Kombinacija navedenih podataka omogućit će cjelovitu procjenu stanja biljaka uz minimalne energetske troškove. Time će se osigurati sveobuhvatan i kontinuiran nadzor stanja usjeva, omogućujući pravodobne intervencije i optimizaciju resursa. Usporedba korištenja bespilotnih letjelica i satelita pokazuje da je, iako bespilotne letjelice pružaju visoku prostornu razlučivost, njihova uporaba ograničena visokom cijenom i operativnim ograničenjima. Sateliti, s druge strane, nude široku pokrivenost, ali njihova vremenska razlučivost i ovisnost o meteorološkim uvjetima predstavljaju značajne izazove. Metoda koja uključuje uporabu AS7263 NIR spektrometra i IoT čvorova predstavlja učinkovitiji i ekonomičniji pristup kontinuiranom praćenju stresa biljaka. Nadalje, svi razvijeni modeli na poslužiteljskoj strani eksperimenta bit će implementirani na krajnje senzorske čvorove kao jednostavni linearni modeli. Navedeni modeli izravno će na samom polju određivati stresno stanje biljaka te će moći alarmirati korisnika kako bi pravodobno djelovao.

### 1.1. Ciljevi istraživanja

Cilj je ovoga istraživanja razviti energetske učinkovit senzorski sklop za procjenu morfo-fiziološkoga stanja biljaka uporabom NIR spektrometra, čime se omogućuje pravodobna detekcija stresa uzrokovanog sušom ili nepovoljnim vremenskim uvjetima. Hipoteza je da će razvijeni sustav omogućiti preciznije i učinkovitije praćenje stanja biljaka, čime se smanjuje potreba za ljudskom intervencijom i povećava prinos optimalnom primjenom agrotehničkih mjera. Cilj je također istražiti primjenjivost novorazvijenoga prototipa za rad u stvarnim uvjetima, kao i njegovu usporedbu s postojećim sustavima za praćenje morfo-fizioloških stanja biljaka. Očekuje se da će ovo istraživanje pružiti značajan doprinos razumijevanju i primjeni novih tehnologija za ranu detekciju stresa biljaka u poljoprivredi, osobito razvojem

učinkovitih i ekonomičnih metoda za kontinuirano praćenje morfo-fizioloških stanja biljaka. Kombinacija daljinskog praćenja i novog senzorskog sklopa može značajno poboljšati točnost i pravodobnost detekcije stresnih stanja kod biljaka. Fokus će biti na primjeni indeksa NDVI za praćenje zdravlja vegetacije uz nadopunu mjerenja satelitskim podacima.

Doprinosi ovoga istraživanja uključuju:

- Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi.
- Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra.
- Metoda određivanja normaliziranog diferencijalnog vegetacijskog indeksa (NDVI) u stvarnom vremenu korištenjem NIR spektrometra s primjenom u preciznoj poljoprivredi.
- Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra.

Ovo će istraživanje omogućiti razvoj sustava za kontinuirano i precizno praćenje stanja biljaka, što će pomoći u optimizaciji resursa i poboljšanju prinosa u poljoprivredi.

## 1.2. Organizacija i struktura doktorskog rada

U ovom dijelu rada dan je detaljan pregled strukture i sadržaja pojedinih dijelova disertacije. Rad je organiziran u sedam poglavlja koja prate logički slijed od pregleda postojećih rješenja, preko razvoja senzorskog sklopa i analize komunikacijskog protokola, do primjene strojnog učenja i prediktivnog modeliranja za procjenu fizioloških parametara biljaka.

**1. poglavlje** uvodi problematiku praćenja fiziološkog stanja usjeva u kontekstu suvremene precizne poljoprivrede. U poglavlju se definira motivacija za razvojem energetski učinkovitih senzorskih rješenja, postavljaju se ciljevi istraživanja i opisuje organizacijska struktura disertacije.

**2. poglavlje** donosi pregled suvremenih (engl. *state-of-the-art*) metoda i senzora za mjerenje fiziološkog stanja usjeva kukuruza. Razmatraju se izravne metode procjene fenotipskih svojstava, fluorescentne metode (PAM, *LIFT* i *SIF*), komercijalno dostupni senzori, bežične

senzorske mreže te tehnologije dugog dometa i male potrošnje energije. Identificirani su ključni nedostaci postojećih rješenja koji motiviraju razvoj predloženog senzorskog sustava.

**3. poglavlje** opisuje dizajn i hardversku realizaciju autonomnog senzorskog sklopa. Detaljno se predstavljaju sastavnice sustava: mikroupravljač STM32G030K8T6 kao središnja procesorska jedinica, primopredajni modul RFM95W za bežičnu komunikaciju LoRaWAN protokolom, baterijski sustav s jednom ćelijom litijske baterije, te istosmjerni pretvarač napona za stabilno napajanje analognih i digitalnih dijelova sklopa.

**4. poglavlje** obrađuje prvi znanstveni doprinos disertacije eksperimentalnu analizu parametara protokola LoRaWAN s ciljem povećanja postotka uspješno dostavljenih paketa. Poglavlje obuhvaća simulacijsku analizu zvjezdaste i linijske mrežne topologije, utjecaj prometa i radijskih parametara na potrošnju energije, mjerenja komunikacijskog dometa i prigušenja signala u stvarnom okruženju, te optimizaciju prijenosa kroz adaptivnu brzinu prijenosa (ADR), potvrđene prijenose i veličinu paketa. Rezultati su validirani implementacijom mreže u realnom poljoprivrednom okruženju.

**5. poglavlje** predstavlja drugi znanstveni doprinos metodu detekcije rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na podacima NIR spektrometra. Opisuju se terenski pokusi, metodologija prikupljanja podataka, izračun vegetacijskih indeksa te primjena četiriju modela strojnog i dubokog učenja: jednoslojnog perceptrona (SLP), višeslojnog perceptrona (MLP), konvolucijske neuronske mreže (CNN) i metode potpornih vektora (SVM). Modeli su uspoređeni s obzirom na točnost klasifikacije i računalnu složenost u kontekstu izvođenja na samom uređaju.

**6. poglavlje** obrađuje treći i četvrti znanstveni doprinos energetske učinkovite metode za procjenu prinosa, visine biljke i vlažnosti zrna kukuruza primjenjivu na LoRaWAN senzorskom sklopu. Predstavlja se arhitektura SPD (engl. *Single Pixel Detector*), matematički okvir parcijalne regresije najmanjih kvadrata (PLSR), izračun normaliziranog diferencijalnog vegetacijskog indeksa (NDVI) izravno na uređaju te analiza energetske učinkovitosti sustava tijekom radnog ciklusa.

**7. poglavlje** sažima ključne rezultate istraživanja, raspravlja o ograničenjima predloženog pristupa i identificira smjernice za buduća istraživanja u području energetske autonomnih senzorskih sustava za primjenu u preciznoj poljoprivredi.

Na kraju rada navedeni su popis korištene literature, popis slika i tablica, prilozi, sažetci na hrvatskom i engleskom jeziku te životopis autora.

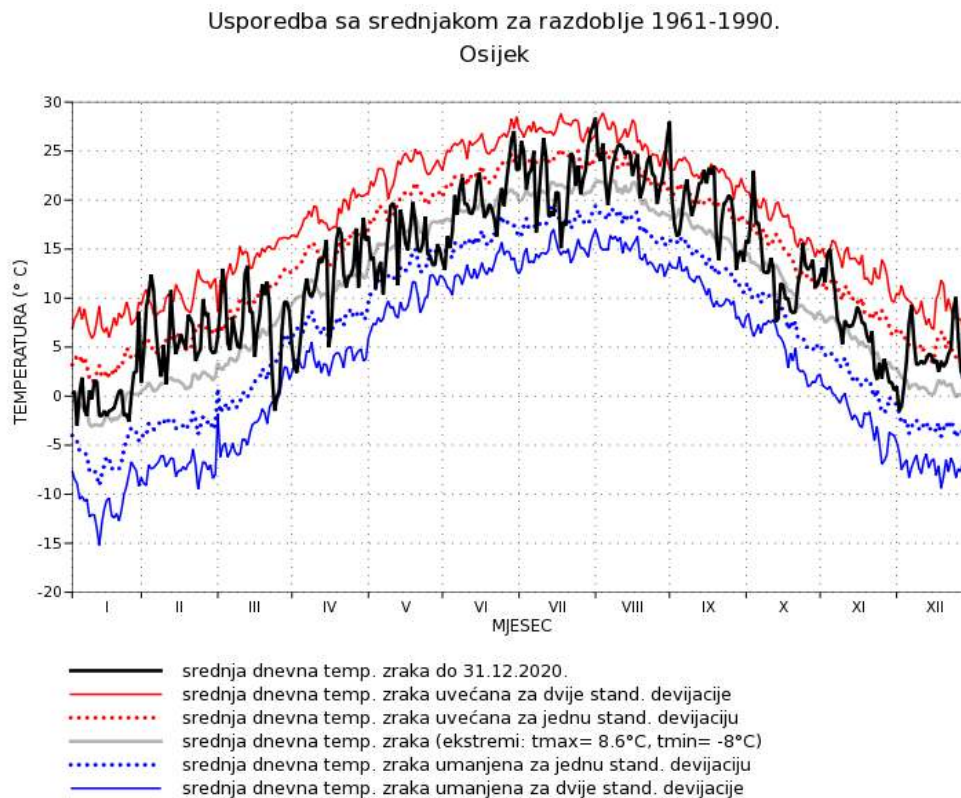
## 2. Suvremene metode i senzori za mjerenje fiziološkog stanja usjeva kukuruza

Fenotip predstavlja sve razine biljnog organizma, morfološku i fizičko-strukturnu, ali i sve razvojne, biokemijske i fiziološke procese. Svaka promjena fenotipa biljaka odvija se tijekom određenoga vremena, pa su stoga uvjeti okoline, uz genetičke i fiziološke čimbenike, presudni za razvoj fenotipa [21, 24]. Biljke su statični organizmi koji u slučaju devijacije okolišnih čimbenika od optimuma ne posjeduju mogućnost izmicanja, pa stoga učinke tih devijacija na fenotip uspješnije ili manje uspješno otklanjaju morfo-fiziološkim adaptivnim mehanizmima. Učinci nepovoljnih okolišnih devijacija na fenotip na bilo kojoj od opisanih razina podrazumijevaju stresna stanja koja mogu biti prolazna i bez trajnih posljedica na daljnje stanje organizma, ili akutna, koja ostavljaju trajne posljedice na stanje organizma. Na razini morfologije, biljke u slučaju nedostatka vode ili povišene temperature zraka usporavaju procese staničnog disanja i reguliraju transpiraciju zatvaranjem puči. Na listovima je vidljivo povlačenje vode iz stanica, što rezultira porastom osmotskog potencijala unutar stanica i padom staničnog turgora, koji u konačnici dovodi do pojavnosti venuća listova. Na fiziološkoj razini dolazi do akumulacije različitih metabolita i reaktivnih spojeva koji načelno proizlaze iz dvaju tipova procesa uvjetovanih stresom, procesa koji olakšavaju preživljavanje organizma u suboptimalnim uvjetima (npr. akumulacija osmolita, antioksidacijskih enzima i drugih antioksidansa te lakopristupačnih šećera) i procesa koji su izravna posljedica narušenog fiziološkog stanja (poput akumulacije reaktivnih kisikovih i dušikovih jedinica te amonijaka).

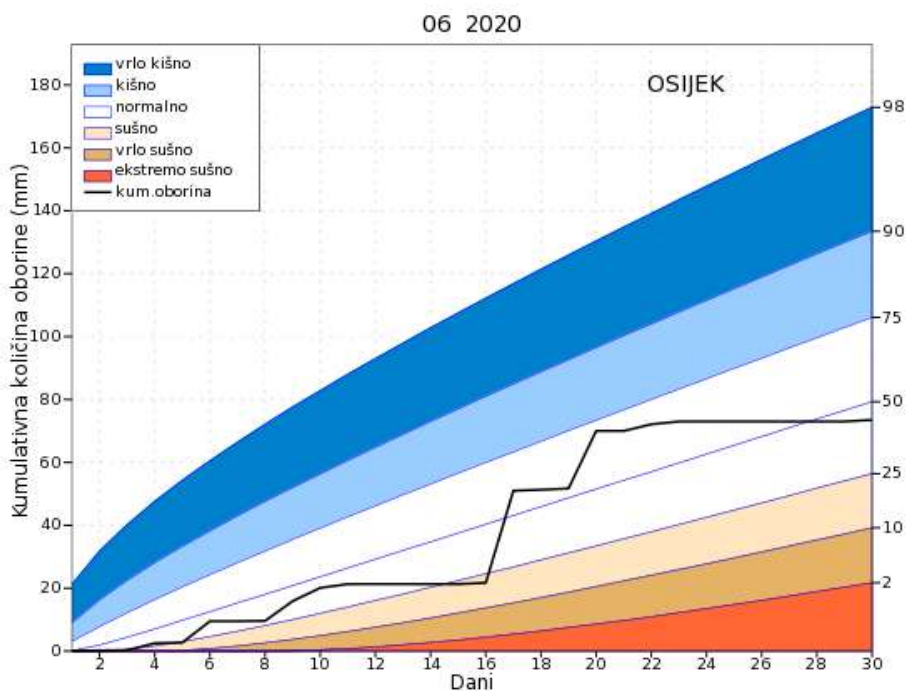
Na elektrokemijskoj razini dolazi do promjena u elektrokemijskom potencijalu membrana stanica i organela, što rezultira promjenama energetske bilance biljnog organizma na svim razinama. Jedan od aspekata takvih promjena jesu i promjene u fluorescenciji molekula klorofila koje provode fotolizu vode suprotno elektrokemijskom gradijentu [25]. Učinci suboptimalnih okolišnih uvjeta na fenotip stoga se mogu pratiti na mnogim razinama, pri

čemu učinci na nižim razinama (genetskoj, epigenetskoj i transkriptomskoj) utječu na ekspresiju fenotipa na prijelaznim razinama (fiziološkoj, citološkoj i elektrokemijskoj), dok te prijelazne razine konačno utječu na ekspresiju fenotipa na morfološkoj, fizičko-strukturnoj i reproduktivnoj razini, što se očituje promjenama u kutu listova, obliku lista, gustoći puči, visini biljaka i prinosu zrna.

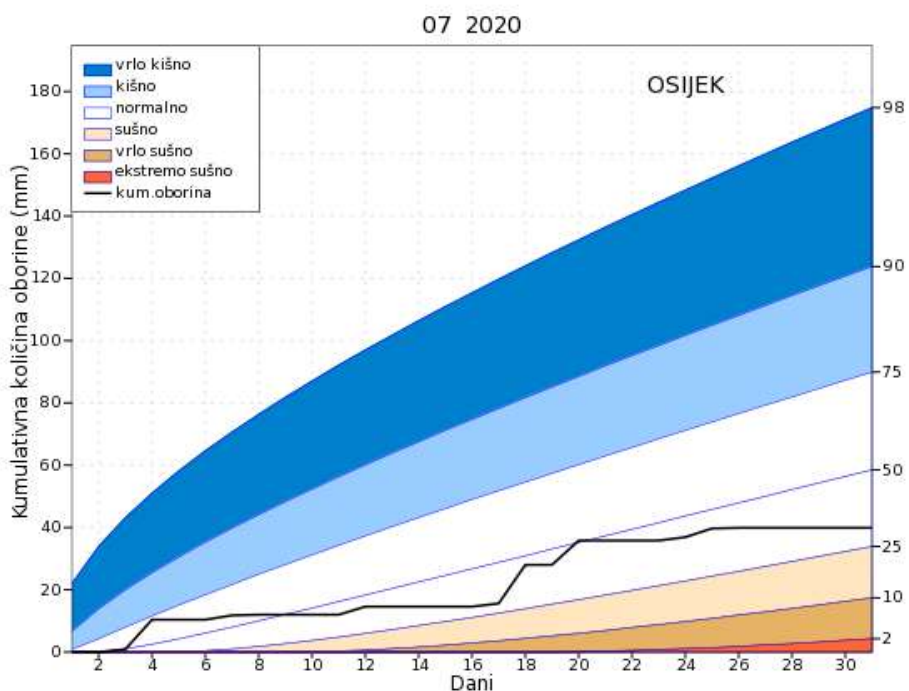
Kukuruz je proljetna kultura čiji vegetacijsko-tehnološki ciklus traje od 150 do 200 dana. U agroekološkim uvjetima Slavonije sjetva se najčešće provodi u prvoj polovini travnja, dok se u zapadnim i sjeverozapadnim dijelovima Hrvatske rokovi sjetve često pomiču i do kraja travnja ili početka svibnja, a berba se provodi od sredine rujna do kraja listopada. U tom razdoblju biljka prolazi kroz mnoga suboptimalna stanja, od kojih je većina uzrokovana nekontroliranim abiotičkim čimbenicima, poput nedostatka vode i visokih temperatura, uz znatan udio površina pod utjecajem nedostatka pojedinih hranjivih tvari te neadekvatne agrotehničke i fitomedicinske prakse. Kukuruz je najosjetljiviji na stres u reproduktivnim fazama metličanja i svilanja te pri nalijevanju zrna. Te se reproduktivne faze najčešće odvijaju u lipnju i srpnju, kada su i temperature zraka najviše slika 2.1, a čest je i nedostatak oborina slika 2.2 i slika 2.3.



**Slika 2.1:** Srednjaci dnevnih temperatura za 2020. godinu u usporedbi s podacima od 1961.-1990. godine (Izvor: Državni hidrometeorološki zavod, <https://meteo.hr/>)



**Slika 2.2:** Kumulativna oborina (mm) za Osijek za lipanj 2020. s dnevnim percentilima izračunatim na temelju višegodišnjeg prosjeka za mjesec lipanj (Izvor: Državni hidrometeorološki zavod, <https://meteo.hr/>)



**Slika 2.3:** Kumulativna oborina (mm) za Osijek za srpanj 2020. s dnevnim percentilima izračunatim na temelju višegodišnjeg prosjeka za mjesec srpanj (Izvor: Državni hidrometeorološki zavod, <https://meteo.hr/>)

Izravna procjena stanja usjeva kukuruza podrazumijeva mjerenje svojstava izravno povezanih sa suboptimalnim stanjima ili mjerenje određenih primarnih i sekundarnih produkata metabolizma koji kvantificiraju njegove pojedine procese. Primjerice, za potpuno izravno mjerenje fotosintetske učinkovitosti biljke potrebno je kvantificirati ulazne parametre fotosintetskog sustava, poput neto asimilacije CO<sub>2</sub>, intenziteta ambijentalne svjetlosti i temperature zraka, te izlazne parametre, poput učinkovitosti fotosustava I i II te disipacije u obliku topline i fluorescencije. Drugi je primjer mjerenje RWC-a (*engl. Relative Water Content*), čiji pad ispod određene razine izaziva trajna oštećenja organizma. Izravna mjerenja biljnih metabolita uglavnom podrazumijevaju invazivne metode koje je moguće provoditi isključivo u laboratorijskim uvjetima. Kod poljoprivrednih kultura najznačajnija metoda procjene fiziološkog stanja usjeva kukuruza jest mjerenje biološkog i tehnološkog prinosa, no takva procjena onemogućuje reparativnu intervenciju. Neizravna procjena omogućuje donošenje zaključaka o fiziološkom stanju usjeva kukuruza bez njegovog izravnog mjerenja, na temelju određenih teorijskih postavki. Primjerice, pri opadanju RWC-a primjetan je gubitak turgora u biljci, što rezultira rolanjem listova. Rolanje listova može predstavljati genotipsko adaptivno svojstvo, ali i akutni štetni učinak suše na biljni organizam, a mjerljivo je u uvjetima visokih temperatura i nedostatka vode. Jedna od popularnih i brzih metoda neizravnog mjerenja stanja usjeva kukuruza jest mjerenje fluorescencije klorofila a [26]. Mjerenje polifaznog rasta fluorescencije klorofila a (JIP-test) omogućuje na temelju teorije membrana neizravnu kvantifikaciju primarne elektrokemije fotosustava II nakon adaptacije fotosustava na tamu (slika 2.4).



**Slika 2.4:** *Štipaljka za adaptaciju na tamu na listu na klipu cvatuće biljke kukuruza (lijevo) i mjerenje fluorescencije klorofija a u polju ručnim fluorometrom (desno)*

Fluorescencija klorofila mjerena JIP-testom predstavlja dobro poznatu i informacijski bogatu metodu za procjenu fiziološkog stanja usjeva kukuruza. Međutim, operativna ograničenja, uključujući potrebu za adaptacijom uzorka na tamu, primjenu vanjskog izvora intenzivne pobude i značajan udio terenskog rada, čine ovu metodu neprikladnom za daljinska i kontinuirana terenska mjerenja.

Za razliku od toga, fotosintetski aktivni organizmi emitiraju fluorescenciju i u prirodnim uvjetima, pod utjecajem Sunčeva zračenja, pri čemu nastaje signal SIF (*engl. Solar-Induced Fluorescence*). Iako je intenzitet SIF-a relativno nizak i nevidljiv golim okom, njegova spektralna raspodjela u crvenom i dalekom crvenom području nosi informacije o fotosintetskoj aktivnosti. SIF je povezan s fluorescencijom izmjerenom u kontroliranim uvjetima (npr. nakon tamne adaptacije), budući da se dinamički procesi, uključujući OJIP kinetiku, manifestiraju i pri promjenama okolišnih uvjeta u prirodnom okruženju.

Kada se biljni uzorci, prethodno prilagođeni na tamu, izlože intenzivnom izvoru svjetlosti, dolazi do karakteristične promjene intenziteta fluorescencije klorofila. Inicijalno se opaža nagli porast fluorescencije, nakon čega slijedi postupno smanjenje i stabilizacija na

kvazistacionarnoj razini. Ovaj fenomen poznat je kao Kautskyjev efekt [27] i predstavlja osnovu za analizu funkcionalnog stanja fotosintetskog aparata.

Razvojem preciznijih mjernih tehnika utvrđeno je da se unutar prve sekunde nakon osvjetljavanja, u vremenskom rasponu od mikrosekundi do milisekundi, mogu razlikovati karakteristične faze porasta fluorescencije, koje čine tzv. OJIP krivulju. Te faze označene su kao O (inicijalna razina, 0 ms), J ( 200  $\mu$ s), I ( 30 ms) i P (maksimalna razina, 1 s) [28]. Analiza OJIP tranzijenta omogućuje izvođenje niza biofizičkih parametara koji opisuju energetske tokove kroz fotosustav II (PSII), uključujući učinkovitost prijenosa elektrona i razinu fotokemijske aktivnosti. Ovaj analitički pristup poznat je kao JIP-test [1, 29, 30].

Neizravna procjena fiziološkog stanja usjeva može se ostvariti i primjenom spektrometrijskih metoda. Ove metode temelje se na mjerenju emisije i reflektancije elektromagnetskog zračenja u unaprijed definiranim spektralnim područjima. Emisijska komponenta primarno proizlazi iz biokemijskih procesa, posebice fotosinteze (fluorescencija), dok reflektirano zračenje predstavlja modificiranu Sunčevu svjetlost, čija spektralna svojstva ovise o apsorpciji specifičnih kemijskih spojeva u biljnom tkivu pri određenim valnim duljinama [31]. Takav pristup omogućuje neinvazivno i kontinuirano praćenje stanja vegetacije u stvarnim uvjetima.

Prednosti spektrometrijske procjene stanja usjeva očituju se u širokom rasponu mjerljivih parametara i mogućnosti neinvazivnog nadzora. Primjenom ovih metoda moguće je kvantificirati emisiju fluorescencije povezanih fotosintetskih procesa, procijeniti sadržaj i omjere biljnih pigmenata (npr. klorofila i karotenoida), kao i odrediti sadržaj vode u biljnom tkivu. Dodatno, analizom reflektancije na odabranim valnim duljinama omogućeno je izračunavanje vegetacijskih indeksa, poput NDVI-a, koji se koriste za praćenje rasta, razvoja i općeg stanja vegetacije [32].

Značajna prednost ovakvog pristupa jest smanjena potreba za ljudskom intervencijom, što omogućuje implementaciju automatiziranih mjernih sustava za kontinuirano praćenje usjeva u stvarnim terenskim uvjetima. Time se osigurava pravovremena detekcija biljnih stresova i donošenje odluka temeljenih na objektivnim i kvantitativnim podacima.

## 2.1. Izravna procjena fenotipskih svojstava usjeva kukuruza

U uzgoju kukuruza, svojstva od najvećeg interesa za poljoprivredne proizvođače jesu prinos zrna i njegova vlaga u optimalnim rokovima berbe. Navedena svojstva predstavljaju

produkt svih stanja u kojima se biljka nalazila tijekom vegetacijskoga ciklusa, pri čemu suboptimalna stanja na njih imaju izrazito negativan utjecaj. S obzirom na nemogućnost procjene tih svojstava tijekom vegetacije, potrebno je primijeniti tehnike matematičkoga i statističkoga modeliranja. Utjecaj suboptimalnih stanja na konačni prinos najizraženiji je u fazama svilanja i metličanja, kada je biljka ujedno i najosjetljivija na stres. Istraživanja su pokazala da su parametri JIP-testa u fazama svilanja i metličanja kukuruza povezani s prinosom zrna [33], dok je spektrometrijsko motrenje povezano s izmjerenim vrijednostima fluorescencije na tlu [32]. Istraživanja su pokazala da su parametri JIP-testa, zabilježeni u ključnim fazama svilanja i metličanja kukuruza, povezani s konačnim prinosom zrna [33], dok su podaci prikupljeni spektrometrijskim motrenjem usklađeni s vrijednostima fluorescencije izmjerenima izravno u polju [32].

Senzorske mreže odabrane su kao rješenje koje će se koristiti u istraživanju jer postižu rezultate usporedive s referentnim podacima dobivenim mjerenjima profesionalnim mjernim uređajima [22, 34], iako je točnost mjerenja na svakom pojedinom senzorskom čvoru manja. Također, korištenjem senzorskih mreža moguće je koristiti cjenovno prihvatljive senzorske sklopove [35, 36], a ostvariti zadovoljavajući rezultat mjerenja. Slijedi pregled dostupnih senzora, metoda i algoritama za mjerenje fluorescencije klorofila.

## 2.2. Metode za mjerenje fluorescencije klorofila

U nastavku se daje pregled dostupnih metoda za mjerenje fluorescencije klorofila, koje se mogu klasificirati u tri osnovne skupine. Prvu skupinu čine metode temeljene na *PAM* (*engl. Pulse Amplitude Modulation*) pristupu [37], koje omogućuju visoku preciznost i detaljan uvid u fotosintetske procese, ali uz ograničenja u pogledu terenske primjene i potrebe za kontroliranim uvjetima mjerenja.

Drugu skupinu čine metode zasnovane na satelitskim i zračnim motrenjima [38, 39], koje omogućuju obuhvat velikih površina i globalno praćenje vegetacije, ali uz ograničenu prostornu i vremensku rezoluciju te povećanu osjetljivost na atmosferske utjecaje i šum.

Treću skupinu čine metode koje koriste optičke senzore [40–45], a koje predstavljaju kompromis između preciznosti i primjenjivosti u stvarnim uvjetima. Ove metode omogućuju razvoj kompaktnih, energetski učinkovitih i cjenovno pristupačnih sustava pogodnih za implementaciju u bežičnim senzorskim mrežama. U ovu skupinu ubraja se i rješenje razvijeno u okviru ove doktorske disertacije, koje integrira optičke senzore s IoT infrastrukturom za

kontinuirano i distribuirano praćenje stanja usjeva.

U radu [37] predložena je metoda koja kombinira FLD (engl. Fraunhofer Line Depth) i LISP (engl. Laser-Induced Saturation Pulse) pristupe za procjenu parametara fluorescencije klorofila na većim prostornim razmjerima. Procijenjeni parametri uključuju kvantni prinos fotosustava II (engl. *PSII*), nefotokemijsko prigušivanje te brzinu prijenosa elektrona povezanog s *PSII*. Validacija metode provedena je na trima biljnim vrstama (paprika, kukuruz i pahira) u različitim razvojnim fazama lišća, uz referentna mjerenja primjenom *PAM* metode. Rezultati pokazuju da FLD-LISP osigurava zadovoljavajuću razinu preciznosti neovisno o fenološkoj fazi biljke, pri čemu ne zahtijeva kompleksne, vremenski sinkronizirane i modulirane pobudne pulseve karakteristične za *PAM* i *LIFT* (engl. *Light-Induced Fluorescence Transient*) metode, što pojednostavljuje implementaciju.

Metoda za globalno praćenje SIF-a putem satelitskih mjerenja prikazana je u [38]. Ključni izazov identificiran u radu odnosi se na kompromis između omjera signal-šum i spektralne razlučivosti. Preporučuje se uporaba spektralnog prozora u rasponu od 670 do 780 nm kako bi se omogućilo pouzdano određivanje SIF-a u crvenom i bliskom infracrvenom području. Također je istaknuta mjerna nesigurnost pri rekonstrukciji spektralne krivulje SIF-a i izračunu učinkovitosti prijenosa energije, pri čemu dodatni izvor pogreške predstavlja aproksimacija oblika SIF-a Gaussovom funkcijom.

U radu [39] predložen je algoritam za rekonstrukciju cjelokupnog fluorescentnog spektra na razini krošnje, temeljen na mjerenjima zračenja na TOA (engl. *Top of Atmosphere*). Kao ulazni podaci koriste se S3 i FLORIS TOA mjerenja prikupljena unutar sustava FLEX/E2ES putem modula L2RM, čime se omogućuje integracija podataka iz različitih senzorskih izvora.

Predloženi pristup zahtijeva visoku razinu točnosti u postupcima registracije i geolokacije snimki, pri čemu je nužno uzeti u obzir geometriju akvizicije svakog pojedinog senzora. To uključuje parametre poput kuta promatranja, prostorne rezolucije i vremenske sinkronizacije mjerenja. Precizna usklađenost navedenih čimbenika ključna je za pouzdanu prostornu i spektralnu rekonstrukciju fluorescentnog signala, osobito u kontekstu heterogenih površina vegetacije i varijabilnih atmosferskih uvjeta.

U radu [40] dodatno se analizira problem mjerne nesigurnosti te se predlaže mjerni sustav temeljen na spektrometru i aktivnoj pobudi pomoću svjetlećih dioda koje emitiraju na valnim duljinama karakterističnim za SIF. Predloženi sustav *SIF-Sys*, koji koristi infracrvene

LED izvore, poboljšava omjer signal-šum i ukupnu točnost mjerenja. Sustav uključuje spektrometar, upravljačku platformu Arduino DUE, LED komponentu ELD-740-524 te optička vlakna za prijenos signala. Usporedba metoda spektralnog uklapanja (SFM, engl. Spectral Fitting Method) i poboljšane metode iFLD (iFLD, engl. *improved Fraunhofer Line Depth*) [41] pokazuje da, iako obje metode omogućuju točnu procjenu SIF-a, iFLD pokazuje veću osjetljivost na instrumentalni šum, dok SFM osigurava robusnije i stabilnije rezultate.

Nadalje, rad [42] usmjeren je na unapređenje senzorskih sklopova i integriranih mjernih sustava. Predloženi sustav temelji se na višesenzorskoj arhitekturi koja uključuje RGB senzor ISL29125, razvojnu pločicu Arduino UNO s RTC modulom, QR sustav za identifikaciju (kamera i čitač), GPS modul, LCD zaslon te komunikacijski modul. Integracijom navedenih komponenti omogućen je poboljšani nadzor sadržaja klorofila, što se koristi za optimizaciju agrotehničkih mjera, primjerice određivanje optimalne učestalosti gnojidbe različitih poljoprivrednih kultura.

U usporedbi s prethodnim radom, autori u radu [43] razvili su bežičnu senzorsku mrežu vrlo niske potrošnje energije temeljenu na *Bluetooth* komunikacijskom modulu CSR1010. Predloženi komunikacijski protokol CSRmesh zasnovan je na tehnologiji Bluetooth Low Energy te omogućuje pouzdanu distribuciju podataka uz minimalnu energetske potrošnje. Prijenos poruka ostvaren je primjenom mehanizma preplavlivanja (engl. *flooding*), pri čemu svaki čvor prosljeđuje zaprimljene pakete ostalim čvorovima u mreži.

Hardverska arhitektura sustava, osim Bluetooth modula, uključuje optički mjerni podsustav sastavljen od monolitne fotodiode OPT101, ultraljubičaste svjetleće diode valne duljine 470 nm te infracrvene svjetleće diode valne duljine 627 nm, mikrokontroler MSP430G2553 te pripadajuće analogne filtre. Mikrokontroler upravlja radom sustava sinkronizirajući aktivaciju izvora svjetlosti i optičkog senzora unutar svakog mjernog ciklusa, čime se osigurava konzistentnost i ponovljivost mjerenja.

U svrhu poboljšanja selektivnosti mjerenja implementiran je optički filtar za prigušenje svjetlosti izvan spektralnog područja od 690 do 740 nm, čime se smanjuje utjecaj neželjenih smetnji iz okoline. Iako mehanizam preplavlivanja inherentno može dovesti do zagušenja mreže i pojave uskih grla pri većem prometu, predložena senzorska mreža ublažava navedene nedostatke zahvaljujući dobroj prostornoj pokrivenosti i visokoj razini skalabilnosti sustava.

Druga vrsta senzorske mreže za mjerenje fluorescencije klorofila (*CF*, engl. *Chlorophyll Fluorescence*) predložena je u radu [44]. Sustav se temelji na jednostavnijoj hardverskoj

arhitekturi koja uključuje ultraljubičastu svjetleću diodu kao pobudni izvor, optički senzor OPT101, dva spektralna filtra te mikrokontrolersku platformu LaunchPad MSP430G2553.

Ultraljubičasta svjetleća dioda odabrana je zbog visoke energetske učinkovitosti i povećane sposobnosti pobude fluorescencije klorofila, čime se postiže bolji omjer signal-šum u odnosu na neke druge izvore pobude. Optički i spektralni filtri koriste se za selektivno izdvajanje željenog dijela emisijskog spektra, čime se smanjuje utjecaj ambijentalnog osvjetljenja i neželjenih smetnji.

Predloženi sustav omogućuje razlikovanje biljaka izloženih stresnim uvjetima od zdravih biljaka na temelju promjena u intenzitetu fluorescencije klorofila. Međutim, zbog pojednostavljene konstrukcije i ograničenih mjernih mogućnosti, rješenje pokazuje nižu razinu preciznosti u usporedbi s kompleksnijim i skupljim sustavima, iako zadržava prednost u pogledu nižih troškova implementacije i energetske učinkovitosti.

U radu [45] predložen je novi tip senzora nazvan senzor prinosa fluorescencije klorofila (*CFY, engl. Chlorophyll Fluorescence Yield*), namijenjen distribuiranim mjerenjima u bežičnim senzorskim mrežama. Iako pojedinačni senzor pokazuje nižu razinu preciznosti, ukupna pouzdanost sustava poboljšava se primjenom prostorne redundancije, odnosno agregacijom istodobno prikupljenih mjernih podataka iz susjednih senzorskih sklopova, čime se smanjuje vjerojatnost pogreške.

Predložena bežična senzorska mreža omogućuje paralelno mjerenje fluorescencije klorofila na većem broju pojedinačnih biljaka, što je posebno pogodno za primjene u preciznoj poljoprivredi. Eksperimentalna konfiguracija sustava sastoji se od CFY senzora integriranih s bežičnim IoT čvorovima koji su zaduženi za prikupljanje, obradu i prijenos podataka. Povezivanje između senzora i IoT sklopova ostvareno je putem serijskog komunikacijskog sučelja, što osigurava jednostavnu integraciju i modularnost sustava.

U usporedbi s referentnim sustavom Mini-PAM, predloženi CFY senzor pokazuje povoljniji omjer cijene i performansi te veću fleksibilnost u odabiru komunikacijske platforme. Međutim, unatoč navedenim prednostima, ključan nedostatak sustava ostaje ograničena preciznost mjerenja, što upućuje na potrebu za dodatnim unaprjeđenjima u dizajnu senzora i obradi signala.

Unatoč značajnom napretku ostvarenom posljednjih godina, područje mjerenja fluorescencije klorofila i dalje sadrži niz otvorenih istraživačkih pitanja koja motiviraju daljnja unapređenja senzorskih sustava. Fluorometrija zasnovana na PAM metodi pretežito je ograničena na laboratorijske uvjete, male biljke i pojedinačne listove, što otežava njezinu primjenu u realnim poljskim uvjetima i na razini krošnje [46, 47]. Metoda zasnovana na *LIFT* signalima, predložena u [37], suočava se s tehničkim izazovima vezanima uz pouzdana i precizna mjerenja na većim udaljenostima, osobito u uvjetima promjenjivog ambijentalnog osvjetljenja i atmosferskih utjecaja. Metode temeljene na *SIF* zahtijevaju daljnja poboljšanja u pogledu spektralne razlučivosti i dinamičkog raspona mjernih sustava, uz istodobno povećanje omjera signal-šum optimizacija navedenih parametara ključan je preduvjet za točniju rekonstrukciju fluorescentnog spektra i pouzdaniju procjenu fiziološkog stanja biljaka u stvarnim uvjetima [40].

Pregled postojećih sustava koji integriraju različite senzore i IoT tehnologije pokazuje potrebu za razvojem nove metode pobude fluorescencije koja bi omogućila rezultate usporedive s referentnim fluorometrima, uz istodobno zadržavanje prednosti niske cijene i energetske učinkovitosti. Nužno je provesti validaciju predloženih rješenja na većim i reprezentativnijim skupovima uzoraka kako bi se osigurala pouzdanost i robusnost sustava u stvarnim uvjetima primjene. Studije [44, 45] dodatno naglašavaju potrebu za proširenjem funkcionalnosti senzorskih sklopova integracijom senzora za mjerenje okolišnih parametara intenziteta ambijentalnog osvjetljenja, temperature i relativne vlažnosti zraka koji izravno utječu na izmjerene vrijednosti fluorescencije klorofila. Ističe se i potreba za razvojem senzora s poboljšanom osjetljivošću i većom spektralnom selektivnošću u odnosu na signal klorofila.

Suvremeni sustavi pokazuju ograničenja u uvjetima jakog ambijentalnog osvjetljenja, što ukazuje na potrebu za unapređenjem optičkih filtara i cjelokupnog dizajna senzora radi smanjenja utjecaja neželjenih spektralnih komponenti. Uočava se i nedostatak sustava koji omogućuju mjerenja u stvarnom vremenu primjenom velikih i distribuiranih senzorskih mreža uz integriranu automatiziranu statističku obradu podataka. Evidentan je relativno mali broj IoT rješenja optimiziranih za ovakve primjene, osobito u kontekstu opsežnih terenskih mjerenja, čime se otvara mogućnost razvoja skalabilnih, energetski učinkovitih i komunikacijski pouzdanih sustava sposobnih za dugotrajno i prostorno distribuirano praćenje morfo-fiziološkog stanja biljaka.

Imajući u vidu navedena ograničenja fluorescentnih metoda u poljskim uvjetima osobito

osjetljivost na ambijentalno osvjetljenje i zahtjevnost mjerne opreme ova doktorska disertacija istražuje alternativni pristup zasnovan na multispektralnim mjerenjima u NIR području. Predloženi i realizirani energetske učinkovit senzorski sklop omogućuje nedestruktivnu i kontinuiranu procjenu morfo-fizioloških parametara usjeva kukuruza, zaobilazeći ključne tehničke prepreke s kojima se suočavaju fluorometrijske metode u realnim agrookruženjima.

### 2.3. Komercijalni senzori

U biološkim i agronomskim istraživanjima biljaka najčešće se primjenjuju fluorometri koji su duže vrijeme dostupni na tržištu. Za mjerenje CEF-a (*engl. Continuous Excitation Fluorescence*) najčešće se upotrebljavaju fluorometri Pocket PEA i Handy PEA britanske tvrtke Hansatech. Navedeni sustavi rabe se uz pribor za prilagodbu uzoraka na tamu, iako se mjerenja mogu provoditi i na svjetlosti. Isti proizvođač nudi i druge sustave, poput PAM fluorometrijskih sustava FMS 1<sup>TM</sup> i FMS 2<sup>TM</sup> koji primjenjuju brzo pulsirajuće pobudno svjetlo koje inducira odgovarajuću impulsnu fluorescentnu emisiju.

Drugi je proizvođač PAM sustava, koji se često primjenjuje u praksi, tvrtka Walz s nizom uređaja koji pokrivaju širok raspon primjena. Vodeći uređaj te tvrtke jest PAM-2500<sup>TM</sup>, iako postoje i druga rješenja koja nude kontinuirano dugoročno praćenje stanja usjeva kukuruza, poput sustava Monitoring-PAM<sup>TM</sup> ili Micro-PAM<sup>TM</sup>. Biološki robusniji, ali niskoprotlačni sustavi jesu sustavi s mogućnošću mjerenja fluorescentnog signala, zajedno sa stomatalnom vodljivosti i asimilacijom CO<sub>2</sub> u funkcionirajući fotosustav. Takve fotosintetske sustave proizvode tvrtke PP SYSTEMS (CIRAS-3<sup>TM</sup>) i LI-COR (LI-6800<sup>TM</sup>).

Međutim, nekoliko tvrtki proizvodi komercijalne spektrometre za biljnu analizu, poput uređaja LI-COR LI-180<sup>TM</sup>, koji bilježe valne duljine iz plavoga i dalekocrvenoga spektra. Spektrometri koje proizvodi tvrtka Spectral Evolution, poput SR-6500<sup>TM</sup> i SR-6500A<sup>TM</sup>, nude ultravisoku razlučivost od 1,5 do 3,8 nm te spektralnu pokrivenost od 350 do 2500 nm.

Prikladna rješenja proizvodi tvrtka nanoLambda, kao što je sustav XL-500<sup>TM</sup> povezan s pametnim telefonom s pomoću Bluetooth veze, koji nudi razlučivost od 10 do 40 nm, uz raspon valnih duljina od 390 do 1000 nm. Tvrtka Apogee Instruments proizvođač je često primjenjivanih terenskih spektrometara SS-110<sup>TM</sup> i SS-120<sup>TM</sup> koji nude visoku razlučivost (3 nm), široko vidno polje (od 25° do 180°) i raspone valnih duljina od 340 do 820 nm te od 635 do 1100 nm. Svi sustavi navedeni u ovom pregledu nude bogate podatke o mjerenju

fluorescencije klorofila te su sposobni detektirati različita morfo-fiziološka stanja biljaka. Međutim, mjerenja *HS/MS* (engl. *Headspace Mass Spectrometry*) mogu se odnositi na morfo-fiziološka stanja biljaka [48] te mogu ponuditi ekonomičan resurs podataka koji se može povezati s drugim izvorima podataka (tj. satelitskim motrenjima) i lako su primjenjiva u okviru IoT rješenja.

Uzimajući u obzir napredak postignut posljednjih godina, još uvijek ima puno otvorenih pitanja i prostora za poboljšanje postojećih sustava i razvoj novih sustava i senzora za mjerenje fluorescencije klorofila. Autori u [46, 47] ističu nedostatke *PAM* fluorometrije s obzirom da je ograničena na primjenu na malim biljkama i pojedinačnim listovima. Iako autori u [37] predlažu metodu temeljenu na tehnici *LIFT*, još uvijek postoje neriješeni problemi vezani uz učinkovita mjerenja na velikim udaljenostima. Također postoji prostor za unaprjeđenje procjene *SIF*-a povećanjem spektralne rezolucije i dinamičkog raspona uz poboljšanje SNR-a [40]. Pregledom sustava koji koriste različite senzore i IoT rješenja zaključeno je da je potrebno razviti novu metodu pobuđivanja fluorescencije koja postiže rezultate bliže onima dobivenim fluorometrima. Također, potrebno je testirati predloženi sustav na većim uzorcima od onih u postojećim bazama podataka. Autori u [44, 45] navode i da senzorske čvorove treba proširiti dodatnim sensorima koji mjere ostale parametre koji mogu utjecati na fluorescenciju poput okolnog svjetla, vlage i temperature. Autori u [45] ističu potrebu za novim sensorima koji imaju poboljšanu osjetljivost s obzirom na selektivnost klorofila. Naj-suvremenija rješenja i dalje su podložna problemima u uvjetima jakog osvjetljenja i stoga je potrebno poboljšati metode za optičko filtriranje i dizajn senzora. Trenutnim dostignućima u istraživanju još uvijek nedostaju mjerenja u stvarnom vremenu provedena koristeći velike senzorske mreže uz automatiziranu statističku analizu.

## 2.4. Bežične senzorske mreže

Kontinuirani razvoj u područjima digitalne elektronike, bežičnih komunikacija i senzorskih tehnologija omogućio je pojavu bežičnih senzorskih mreža (BSM, engl. *Wireless Sensor Network*) kao specijalizirane klase distribuiranih komunikacijskih sustava [49]. Takve mreže sastoje se od većeg broja autonomnih senzorskih sklopova male potrošnje, koji integriraju senzorske, procesorske i komunikacijske funkcionalnosti u kompaktnom obliku.

Senzorski sklopovi opremljeni su odgovarajućim sensorima za prikupljanje podataka iz

okoline, ugrađenim mikrokontrolerima za lokalnu obradu i agregaciju podataka te bežičnim komunikacijskim modulima koji omogućuju prijenos podataka na različitim udaljenostima, ovisno o primijenjenoj tehnologiji. Takva arhitektura omogućuje prikupljanje podataka neposredno u blizini promatranog fenomena, čime se smanjuje potreba za centraliziranim mjerenjima i povećava prostorna rezolucija sustava.

Jedna od ključnih prednosti BSM-a je mogućnost distribuirane obrade podataka, pri čemu se dio analize provodi lokalno na razini čvora, čime se smanjuje količina podataka za prijenos i optimizira potrošnja energije. Prikupljeni i obrađeni podatci zatim se prenose prema središnjoj jedinici ili poslužitelju za daljnju analizu i pohranu.

Fleksibilnost u odabiru senzora omogućuje širok spektar primjena, uključujući praćenje okolišnih parametara, industrijske procese i sustave precizne poljoprivrede. Integracijom aktuatora u senzorske čvorove omogućuje se realizacija zatvorenih upravljačkih petlji, pri čemu sustav može autonomno reagirati na promjene u okolini u stvarnom vremenu, čime se povećava razina automatizacije i učinkovitosti.

BSM često se sastoji od velikog broja sklopova raspoređenih na relativno malim međusobnim udaljenostima. U takvim uvjetima komunikacija između udaljenih sklopova, kao i prema baznoj stanici, ostvaruje se višeskokovnim prijenosom (*engl. multihop*), pri čemu se podaci prosljeđuju preko posrednih sklopova. Ovakav pristup u pravilu smanjuje ukupnu potrošnju energije u odnosu na izravnu komunikaciju na velike udaljenosti, budući da se izbjegava potreba za visokim izlaznim snagama odašiljača.

Energetska ograničenja predstavljaju jedan od ključnih izazova u dizajnu BSM-a. Kapacitet napajanja senzorskih sklopova, koji se najčešće temelji na baterijama, ograničen je, a njihova zamjena u mnogim primjenama nije izvediva ili je logistički zahtjevna. Zbog toga je nužno primijeniti tehnike optimizacije potrošnje energije, uključujući učinkovite komunikacijske protokole, upravljanje radnim ciklusima i lokalnu obradu podataka. U nekim slučajevima baterijski sustavi dopunjuju se rješenjima za prikupljanje energije iz okoline, poput solarnih modula.

Budući da je raspored senzorskih sklopova u prostoru unaprijed definiran, mjerni podatci mogu se povezati s točnom mikrolokacijom, što omogućuje prostornu analizu i mapiranje promatranih veličina. Ovisno o zahtjevima primjene, senzorski sklopovi mogu biti dodatno opremljeni sustavima za satelitsko pozicioniranje, čime se osigurava precizno određivanje lokacije i olakšava integracija u šire geoinformacijske sustave.

S obzirom na mogućnost integracije različitih tipova senzora, BSM nalaze primjenu u širokom rasponu domena, uključujući vojnu i medicinsku primjenu, poljoprivredu, zaštitu okoliša, pametna kućanstva i industrijske sustave. Takva fleksibilnost omogućuje prilagodbu sustava specifičnim zahtjevima pojedine primjene, uz optimizaciju mjernih i komunikacijskih karakteristika.

Zahvaljujući umrežavanju velikog broja minijaturnih i funkcionalno autonomnih senzorskih sklopova, BSM predstavljaju temeljnu infrastrukturu za razvoj paradigme interneta stvari. U okviru te paradigme, globalna mreža evoluirala prema sustavu međusobno povezanih objekata koji su jedinstveno adresabilni i sposobni za međusobnu komunikaciju primjenom standardiziranih internetskih protokola. Takvi objekti prikupljaju podatke iz okoline putem senzora te ostvaruju interakciju s okolinom putem aktuatora, čime se omogućuje implementacija distribuiranih i autonomnih sustava.

IoT okruženje karakterizira visoka razina heterogenosti, budući da uključuje različite tehnologije, komunikacijske protokole i arhitekture sustava. Upravo ta heterogenost omogućuje optimizaciju rješenja u skladu sa zahtjevima konkretne primjene, jer ne postoji univerzalna tehnologija koja bi bila optimalna za sve scenarije. Stoga je u svakom pojedinom slučaju nužan pažljiv odabir hardverskih i komunikacijskih komponenti, s ciljem postizanja pouzdane, sigurne i energetske učinkovite komunikacije.

U kontekstu ovoga istraživanja provedena je analiza različitih komunikacijskih tehnologija prikladnih za primjenu u bežičnim senzorskim mrežama, s naglaskom na kriterije pouzdanosti, sigurnosti i energetske učinkovitosti. Odabrana rješenja validirat će se kroz laboratorijska ispitivanja i terenska mjerenja, nakon čega će se odabrati optimalna konfiguracija za širu implementaciju u realnim uvjetima primjene.

Uređaji u senzorskim mrežama povezuju se radi međusobne razmjene podataka ili komunikacije sa središnjim poslužiteljem, gdje se prikupljeni podatci agregiraju i obrađuju te čine dostupnima putem korisničkog sučelja. Takva komunikacija između uređaja ostvaruje se prema paradigmi M2M (*engl. Machine-to-Machine*), pri čemu pojedini čvorovi, iako različitih funkcionalnosti, djeluju kao dio jedinstvene mrežne infrastrukture.

U okviru ovoga rada razmatraju se bežične senzorske mreže, u kojima se komunikacija ostvaruje putem radiospektra definirane frekvencije, širine pojasa i izlazne snage, pri čemu je prijenosni medij zrak. Senzorski sklopovi predstavljaju specijalizirane fizičke uređaje namijenjene prikupljanju podataka o stanju okoliša, koji se zatim putem mreže prenose do središnje

lokacije radi daljnje analize i obrade. Osim prijenosa podataka, sustav mora podržavati i povratnu komunikaciju prema krajnjim uređajima, primjerice za promjenu konfiguracije ili iniciranje mjerenja u neperiodičnim vremenskim intervalima.

Primarna funkcija senzorske mreže je pouzdan i energetski učinkovit prijenos podataka s distribuiranih sklopova prema središnjoj infrastrukturi. U kontekstu ovoga istraživanja ključni kriteriji za odabir komunikacijske tehnologije uključuju domet veći od nekoliko kilometara, nisku potrošnju energije, te visoku pouzdanost i sigurnost prijenosa podataka. Posebna se pozornost posvećuje minimiziranju gubitaka paketa i zaštiti od vanjskih utjecaja i potencijalnih sigurnosnih prijetnji.

Radi sustavnog pristupa odabiru tehnologije, postojeća bežična rješenja klasificirana su u skupine prema ključnim parametrima, ponajprije komunikacijskom dometu i energetskoj potrošnji. Takva klasifikacija omogućuje sužavanje izbora na tehnologije koje zadovoljavaju zadane zahtjeve primjene. Većina razmatranih tehnologija djeluje unutar nelicenciranih industrijskih, znanstvenih i medicinskih (ISM, *engl. Industrial, Scientific and Medical*) frekvencijskih pojaseva [50, 51], uključujući područja oko 900 MHz (902–928 MHz), 2,4 GHz (2,4–2,4835 GHz) i 5,7 GHz (5,728–5,750 GHz). Korištenje tog pojasa ne zahtijeva posebne dozvole niti koncesije, što dodatno olakšava implementaciju i smanjuje troškove sustava.

Senzorski sklopovi opremljeni su mjernim modulima za praćenje ključnih parametara relevantnih za procjenu stanja usjeva, uključujući temperaturu, relativnu vlažnost, fluorescenciju klorofila i druge agrometeorološke veličine [52–54]. Kontinuiranim prikupljanjem i analizom tih podataka omogućuje se pravodobno donošenje odluka vezanih uz održavanje i optimizaciju uzgoja, kao i predviđanje potencijalnih problema, poput pojave stresa ili potrebe za navodnjavanjem. Sustav nadzora omogućuje ranu detekciju nepovoljnih uvjeta te pravovremenu intervenciju.

Razvoj IoT-a doveo je do pojave brojnih bežičnih komunikacijskih tehnologija prilagođenih različitim zahtjevima primjene. Kao ilustrativan primjer može se navesti rad [55], u kojem je razvijen sustav za nadzor poljoprivrednih površina u Australiji. Sustav koristi radio-modul proizvođača Nordic za komunikaciju na frekvencijama od 433 MHz, odnosno 915 MHz u novijim verzijama, pri čemu ostvaruje domet veći od 1 km. Napajanje uređaja realizirano je baterijom u kombinaciji sa solarnim punjačem, uz mjesečnu potrošnju energije u rasponu od 80 do 400 kJ. Integrirani senzori omogućuju mjerenje vlažnosti tla, čime se detektira potreba za navodnjavanjem.

## 2.5. Tehnologije dugog dometa i male potrošnje energije

Niskoenergetske mreže velikog dometa (LPWAN, *engl. Low Power Wide Area Network*) predstavljaju skup bežičnih komunikacijskih tehnologija optimiranih za prijenos malih količina podataka na velikim udaljenostima uz minimalnu potrošnju energije. Ključne značajke LPWAN tehnologija su vrlo niska energetska potrošnja i veliki komunikacijski domet, koji u otvorenim područjima tipično iznosi od 10 do 40 km, dok se u urbanim uvjetima smanjuje na približno 1 do 5 km. Zahvaljujući optimiziranim komunikacijskim protokolima i kratkim radnim ciklusima, moguće je ostvariti vijek trajanja baterije dulji od 10 godina.

Uz navedene prednosti, LPWAN tehnologije karakterizira i relativno niska cijena implementacije i održavanja, osobito u usporedbi s rješenjima koja se oslanjaju na infrastrukturu mobilnih operatera. S druge strane, ograničenja se očituju u niskim brzinama prijenosa podataka i, kod pojedinih tehnologija, u ograničenju količine podataka koja se može prenijeti unutar određenog vremenskog intervala. Međutim, takva ograničenja u većini IoT primjena nisu kritična, budući da senzorski sustavi obično generiraju male količine podataka.

U Europi većina LPWAN tehnologija koristi frekvenijski pojas od 868 MHz, koji pripada nelicenciranom ISM spektru. Zbog dijeljenja spektra s drugim tehnologijama moguća je pojava interferencije, a dodatno ograničenje predstavlja regulirani radni ciklus od 1 %, što znači da uređaj može odašiljati podatke samo tijekom 1 % ukupnog vremena. Iznimku čine tehnologije poput NB-IoT-a koje rade u licenciranom spektru te ne podliježu istim ograničenjima.

Zbog kombinacije velikog dometa i niske potrošnje energije, LPWAN tehnologije posebno su pogodne za primjenu u ruralnim i teško dostupnim područjima, gdje uređaji moraju raditi autonomno i osigurati pouzdanu komunikaciju na velikim udaljenostima. Takve karakteristike čine ih prikladnima za implementaciju u bežičnim senzorskim mrežama i IoT sustavima, uključujući primjene u preciznoj poljoprivredi. Niska brzina prijenosa i ograničen kapacitet poruka u pravilu ne predstavljaju značajan nedostatak, budući da većina senzorskih aplikacija ne zahtijeva prijenos velikih količina podataka.

U nastavku se daje pregled ključnih karakteristika najvažnijih predstavnika LPWAN tehnologija.

1. LoRa je LPWAN tehnologija koja koristi nelicencirani ISM frekvenijski pojas, pri čemu se u Europi primjenjuje područje oko 868 MHz, u Sjevernoj Americi 915 MHz,

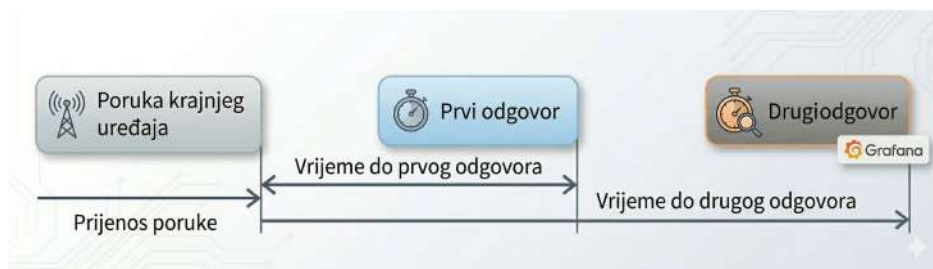
a u Aziji 433 MHz. Prednost tehnologije je relativno jednostavna implementacija i fleksibilnost primjene. Međutim, korištenje nelicenciranog spektra podrazumijeva i mogućnost interferencije s drugim sustavima, što može utjecati na pouzdanost komunikacije.

LoRa definira fizički sloj komunikacije, koji je razvila tvrtka Semtech Corporation, dok LoRaWAN predstavlja otvorenu specifikaciju mrežnog i MAC sloja razvijenu od strane organizacije LoRa Alliance. Fizički sloj temelji se na modulaciji proširenog spektra (CSS, *engl. Chirp Spread Spectrum*), koja omogućuje postizanje velikog komunikacijskog dometa uz visoku otpornost na šum i smetnje te nisku potrošnju energije.

Ključni parametri sustava uključuju faktor širenja (SF), kodnu brzinu (CR) i širinu frekvencijskog pojasa. Povećanjem faktora širenja postiže se veći domet, ali uz smanjenje brzine prijenosa podataka i produženje trajanja prijenosa. Kodna brzina (tipično 4/5 do 4/8) utječe na razinu redundancije i otpornost na pogreške, dok širina pojasa (125 kHz, 250 kHz ili 500 kHz) utječe na propusnost i robusnost komunikacije. Ovisno o kombinaciji navedenih parametara, brzina prijenosa podataka kreće se u rasponu od približno 0,3 do 50 kbit/s, uz ograničenu veličinu paketa.

LoRaWAN definira tri klase uređaja (A, B i C) s različitim energetske i komunikacijskim karakteristikama. Klasa A predstavlja energetski najučinkovitiji način rada, pri čemu uređaj većinu vremena provodi u stanju mirovanja, a komunikacija se inicira slanjem poruke nakon čega slijede dva vremenski definirana prozora za prijem. Klasa C omogućuje gotovo kontinuirani prijem podataka uz minimalno kašnjenje, ali uz značajno povećanu potrošnju energije.

Sigurnosni mehanizmi u LoRaWAN sustavu uključuju primjenu 128-bitne AES enkripcije te mogućnost autentifikacije uređaja, čime se osigurava povjerljivost i integritet prenesenih podataka.



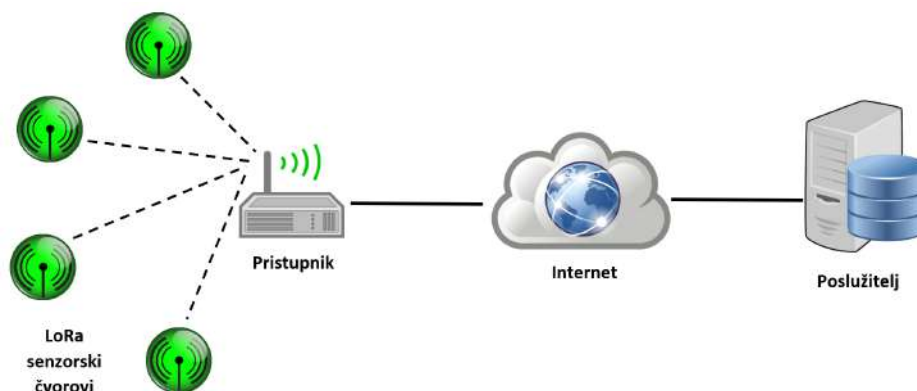
Slika 2.5: *LoRa, klasa A*

Specifikacije LoRaWAN mreže definiraju otvoreni standard za mrežne protokole i arhitekturu sustava temeljenih na LoRa fizičkom sloju. Standard se oslanja na MAC sloj utemeljen na ALOHA pristupnom protokolu, čime se smanjuje složenost implementacije na razini krajnjih uređaja, uz prihvatljiv kompromis u pogledu učinkovitosti iskorištenja kanala.

Arhitektura LoRaWAN mreže temelji se na zvjezdastoj topologiji (*engl. star-of-stars*), u kojoj krajnji uređaji komuniciraju s jednim ili više pristupnika (*engl. gateway*). Pristupnici služe kao posrednici koji primaju podatke s krajnjih uređaja i prosljeđuju ih prema mrežnom poslužitelju. Iako je tehnički moguća lokalna komunikacija između krajnjih uređaja, za prijenos podataka prema centralnoj infrastrukturi nužno je korištenje pristupnika.

Komunikacija između pristupnika i mrežnog poslužitelja ostvaruje se putem standardnih IP protokola (*engl. Internet Protocol*), što omogućuje jednostavnu integraciju u postojeću mrežnu infrastrukturu. Mrežni poslužitelj ima ključnu ulogu u sustavu: upravlja mrežnim prometom, provodi autentifikaciju i sigurnosne mehanizme, filtrira duplicirane pakete, obrađuje prikupljene podatke te ih prosljeđuje aplikacijskim poslužiteljima. Također omogućuje dvosmjernu komunikaciju, pri čemu aplikacijski sloj može slati naredbe krajnjim uređajima putem pristupnika [56].

Ovakva arhitektura omogućuje visoku skalabilnost, jednostavno proširenje mreže i učinkovito upravljanje velikim brojem senzorskih sklopova u distribuiranim IoT sustavima.



**Slika 2.6:** *LoRa, mrežna topologija*

Za primjenu LoRaWAN mreže nužno je inicijalno konfigurirati i aktivirati svaki krajnji uređaj. Aktivacija se može provesti na dva načina: bežičnom aktivacijom (OTAA,

engl. Over-The-Air Activation) ili aktivacijom personalizacijom (ABP, engl. *Activation By Personalization*). OTAA se u pravilu preferira zbog veće razine sigurnosti i fleksibilnosti, budući da omogućuje dinamičko generiranje sesijskih ključeva pri svakom pridruživanju mreži.

Tijekom proizvodnje uređaj dobiva jedinstvene identifikatore, uključujući DevEUI (identifikator krajnjeg uređaja) i JoinEUI (identifikator poslužitelja za pridruživanje), koji su nužni za OTAA postupak. Uz njih se definiraju i osnovni kriptografski ključevi AppKey i NwkKey, koji služe kao temelj za generiranje sesijskih ključeva. Ovi ključevi moraju biti pohranjeni u zaštićenoj memoriji uređaja kako bi se spriječio neovlašteni pristup.

Tijekom procesa aktivacije generiraju se sesijski ključevi, među kojima je *AppSKey*, koji se koristi za šifriranje i dešifriranje korisničkih podataka između krajnjeg uređaja i aplikacijskog poslužitelja. Paralelno se iz ključa *NwkKey* generiraju mrežni sesijski ključevi koji služe za osiguravanje integriteta i autentifikacije komunikacije na mrežnoj razini.

Za dodatnu zaštitu svakom se paketu pridružuje kod za provjeru integriteta poruke (*MIC*, engl. *Message Integrity Code*), čime se osigurava detekcija izmjena podataka tijekom prijenosa. Ovakav sigurnosni model omogućuje pouzdanu i sigurnu komunikaciju unutar LoRaWAN mreže [57].

LoRaWAN uređaji projektirani su s naglaskom na minimalnu potrošnju energije, što ih čini prikladnima za dugotrajan autonomni rad u IoT sustavima. Niska izlazna snaga i uski frekvencijski pojas omogućuju učinkovitu komunikaciju uz ograničenu energetska potrošnju, pri čemu ukupna potrošnja ovisi o vremenu provedenom u pojedinim radnim stanjima i odabranoj klasi rada uređaja.

Rad uređaja može se podijeliti na tri osnovna stanja: slanje podataka, primanje podataka i stanje mirovanja. Najmanja potrošnja ostvaruje se u stanju mirovanja, u kojem uređaj provodi većinu vremena kada nema potrebe za komunikacijom. Nakon završetka prijenosa ili prijema podataka uređaj se vraća u stanje mirovanja kako bi se postigla maksimalna energetska učinkovitost. Prijelaz u aktivna stanja uzrokuje značajan porast potrošnje, pri čemu je ona najveća tijekom slanja podataka i ovisi o odabranoj prijenosnoj snazi.

Način rada uređaja definiran je LoRaWAN klasom. U klasi A uređaj je većinu vremena u stanju mirovanja te inicira komunikaciju samo kada je potrebno poslati podatke, nakon čega kratkotrajno otvara prozore za prijem odgovora. Klasa B uvodi dodatne sinkronizirane prijemne prozore, što povećava dostupnost, ali i potrošnju energije. Klasa C omogućuje kontinuirano osluškivanje kanala, čime se minimizira latencija, ali uz znatno povećanu potrošnju energije.

Stoga, iako je hardverska platforma optimirana za nisku potrošnju, stvarna energetska učinkovitost uvelike ovisi o konfiguraciji i obrascu komunikacije. Primjena klase A uz ograničen broj dnevnih prijenosa omogućuje da uređaj većinu vremena provodi u stanju mirovanja, čime se postiže vrlo nizak prosječni energetski zahtjev. U takvim uvjetima moguće je ostvariti vijek trajanja baterije dulji od deset godina [58].

2. Sigfox je bežična LPWAN tehnologija koju je razvila istoimena tvrtka osnovana 2009. godine u Francuskoj [59]. Mrežna infrastruktura sastoji se od baznih stanica povezanih s centralnim poslužiteljima, čime se omogućuje široka, često i globalna pokrivenost u frekvencijskom pojasu ispod 1 GHz. Tehnologija je optimirana za komunikaciju na velikim udaljenostima uz minimalnu potrošnju energije i vrlo niske brzine prijenosa podataka.

Sigfox, slično kao i LoRa, koristi nelicencirani ISM frekvencijski pojas (862–928 MHz), ali se razlikuje po primjeni iznimno uskog frekvencijskog pojasa (UNB, *engl. Ultra Narrow Band*). Modulacija se temelji na binarnoj faznoj modulaciji (BPSK), pri čemu širina kanala za pojedinu poruku iznosi približno 100 Hz. Takav pristup rezultira visokom osjetljivošću prijamnika, niskom razinom šuma i vrlo malom potrošnjom energije, uz brzine prijenosa do približno 600 bit/s, ovisno o regiji i konfiguraciji mreže.

Radi povećanja pouzdanosti prijenosa, svaka poruka odašilje se višestruko (obično tri puta) na različitim frekvencijama i u nesinkroniziranim vremenskim intervalima. Maksimalna veličina korisničkog paketa iznosi 12 bajtova, što predstavlja značajno ograničenje u količini podataka po prijenosu. Dodatno, regulativna ograničenja definiraju maksimalno trajanje prijenosa od 36 sekundi po satu, što odgovara približno 140 poruka dnevno (do 6 poruka na sat).

Downlink komunikacija je ograničena, pri čemu je moguće primiti svega nekoliko poruka dnevno (tipično do četiri puta), što znači da potvrda primitka nije dostupna za

svaki uplink paket. Ovakav komunikacijski model prikladan je za aplikacije koje zahtijevaju povremeni prijenos manjih količina podataka bez potrebe za kontinuiranom dvosmjernom komunikacijom.

Na globalnoj razini Sigfox mreža podijeljena je u više geografskih zona, pri čemu svaka zona ima definirane specifične parametre, uključujući radnu frekvenciju, snagu odašiljanja i brzinu prijenosa podataka. Ova segmentacija omogućuje prilagodbu regulatornim zahtjevima i optimizaciju performansi u različitim dijelovima svijeta kao što je prikazano u tablici 2.1.

| Radio konfiguracija | Prostor   | Frekvencija (MHz) | Snaga (dBm) |
|---------------------|---|-------------------|-------------|
| RC 1                | Europa, ne Europski teritoriji Francuske, Bliski Istok i Afrika | 868,13–869,525    | 16          |
| RC 2                | Brazil, Kanada, Meksiko, Puerto Rico i SAD                      | 902,2–905,2       | 24          |
| RC 3                | Japan   | 923,2–922,2       | 16          |
| RC 4                | Latinska Amerika i dijelovi Azije u Tihom oceanu                | 920,8–922,3       | 24          |
| RC 5                | Južna Koreja  | 923,3–922,3       | 14          |
| RC 6                | Indija  | 865,2–866,3       | 16          |
| RC 7                | Rusija  | 868,8–869,1       | 16          |

**Tablica 2.1:** *Sigfox radio konfiguracija po regijama s pripadajućim frekvencijama i snagama*

Radi povećanja pouzdanosti komunikacije, tehnologija Sigfox primjenjuje metodu suradnje prijammika. U tom pristupu krajnji uređaj nije vezan uz jedan pristupnik, već više baznih stanica u njegovoj blizini može istodobno zaprimiti istu poruku. Time se ostvaruje prostorna redundancija, povećava vjerojatnost uspješnog prijama i poboljšava kvaliteta usluge (*engl. Quality of Service*), osobito u uvjetima smetnji ili djelomične pokrivenosti.

Sigfox koristi ravnu mrežnu arhitekturu s ciljem minimizacije složenosti sustava te smanjenja kapitalnih i operativnih troškova. Krajnji uređaji odašilju prikupljene podatke prema dostupnim prijammicima, koji ih zatim prosljeđuju prema poslužitelju koristeći postojeću komunikacijsku infrastrukturu (DSL, 3G/4G ili, u iznimnim slučajevima, satelitsku vezu). Na razini poslužitelja provodi se filtriranje dupliciranih poruka, pri čemu se pohranjuje samo jedna instanca primljene poruke, dok se ostale odbacuju.

Nakon obrade, podatci postaju dostupni korisničkim aplikacijama [60].

Sigurnosni mehanizmi u Sigfox mreži temelje se na primjeni 128-bitnog AES šifriranja. Međutim, zbog ograničene veličine paketa (12 bajtova), implementacija sigurnosnih funkcija mora biti optimirana kako bi se maksimalno iskoristio raspoloživi prostor za korisničke podatke. Zbog toga se izostavljaju dodatna zaglavlja i kompleksniji sigurnosni mehanizmi, poput opsežnih kontrolnih polja i asimetrične kriptografije, koja zahtijeva veće duljine ključeva i dodatnu komunikaciju. Posljedično, primjenjuje se simetrično šifriranje s jednim tajnim ključem. Analize različitih algoritama pokazuju da AES u brojačkom načinu rada (engl. AES-CTR) ima najmanji utjecaj na potrošnju energije, dok algoritmi poput ChaCha20 nude dodatne sigurnosne značajke uz nešto veći energetska zahtjev [61].

Energetska učinkovitost jedan je od ključnih ciljeva Sigfox tehnologije. Kao i kod drugih LPWAN rješenja, najveća potrošnja energije javlja se tijekom prijenosa podataka, dok je znatno manja tijekom čekanja na prijem poruka, a minimalna u stanju mirovanja. Zbog vrlo malih paketa i ograničenog broja dnevnih prijenosa, ukupna dnevna potrošnja energije ostaje niska čak i pri maksimalnom opterećenju mreže. U usporedbi s drugim bežičnim tehnologijama izvan LPWAN kategorije, Sigfox ostvaruje znatno nižu potrošnju energije, usporedivu s LoRa uređajima u klasi A [62].

3. NB-IoT (engl. *Narrowband Internet of Things*) pripada skupini licenciranih LPWAN tehnologija i temelji se na LTE infrastrukturi (engl. *Long-Term Evolution*). Razvijen je kao proširenje postojećih LTE mreža s ciljem podrške velikom broju IoT uređaja uz smanjenu potrošnju energije i povećan komunikacijski domet. Iako dijeli određene značajke s mobilnim mrežama, klasificira se kao LPWAN tehnologija zbog optimizacije za niske brzine prijenosa i energetska učinkovit rad.

Jedna od ključnih prednosti NB-IoT-a jest mogućnost korištenja postojeće LTE infrastrukture i licenciranog frekvencijskog spektra, čime se izbjegavaju problemi interferencije karakteristični za nelicencirane pojaseve. Tehnologija omogućuje visoku gustoću uređaja, pri čemu broj povezanih sklopova može premašiti 52 000 po kanalu, što je značajno za skalabilne IoT sustave.

NB-IoT može raditi u tri različita režima. U samostalnom načinu rada (engl. *standalone*) koristi se zaseban frekvencijski kanal, primjerice prenamijenjeni GSM kanal

širine 200 kHz. U načinu rada unutar pojasa (*engl. in-band*) koristi se jedan ili više fizičkih blokova resursa (PRB) unutar LTE spektra, pri čemu je širina pojedinog bloka 180 kHz. U načinu rada uz pojas (*engl. guard band*) NB-IoT koristi frekvencijski prostor na rubovima LTE pojasa, čime se omogućuje učinkovito iskorištenje spektra uz minimalnu interferenciju.

Radi izbjegavanja međusobnih smetnji, NB-IoT komunikacija mora biti vremenski i frekvencijski usklađena s LTE prometom, odnosno ne smije se odvijati u istim resursima istovremeno. Ovakva fleksibilnost u načinu implementacije omogućuje operatorima optimizaciju iskorištenja spektra i prilagodbu različitim mrežnim uvjetima [50].

Usporedba triju razmatranih LPWAN tehnologija, LoRa, Sigfox i NB-IoT, prikazana je u tablici 2.2, pri čemu su analizirani ključni parametri poput komunikacijskog dometa, potrošnje energije, brzine prijenosa podataka, dostupnosti spektra i skalabilnosti sustava. Ovakav komparativni prikaz omogućuje jasnije sagledavanje prednosti i ograničenja pojedine tehnologije te olakšava odabir optimalnog rješenja u skladu sa zahtjevima konkretne IoT primjene.

| <b>Tehnologija</b>           | <b>LoRa</b>                                    | <b>Sigfox</b>                                   | <b>NB-IoT</b>                                   |
|------------------------------|--|---|---|
| Domet                        | < 5 km (urbano),<br>< 15 km (otvoreni prostor) | < 10 km (urbano),<br>< 50 km (otvoreni prostor) | < 10 km (urbano),<br>< 35 km (otvoreni prostor) |
| Licencirani spektar          | Ne   | Ne  | Da  |
| Širina pojasa                | 125/250/500 kHz                                | 100 Hz  | 180/200 kHz                                     |
| Frekvencija rada             | 868 MHz (Europa)                               | 868 MHz (Europa)                                | LTE pojasevi (npr. 800 MHz)                     |
| Prijenos podataka            | 0,3 – 50 kbit/s                                | < 100 bit/s UL, < 600 bit/s DL                  | < 250 kbit/s (DL i UL)                          |
| Kašnjenje                    | ~10 ms   | ~30 ms  | 1,6 s – 10 s                                    |
| Trajanje standardne baterije | > 10 godina                                    | > 10 godina                                     | > 10 godina                                     |
| Cijena                       | Mala   | Mala  | Srednja   |
| Zaštita                      | AES 128 bit                                    | AES 128 bit                                     | 3GPP (128/256 bit)                              |
| Prednosti                    | Otpornost na smetnje, jednostavnost            | Velik domet, niska potrošnja                    | Bez interferencije, visok kapacitet             |
| Ograničenja                  | Smetnje (ISM), ograničen broj poruka           | Ograničen broj poruka (140/dan)                 | Veća složenost, trošak licenciranja             |

**Tablica 2.2:** *Usporedba IoT tehnologija (LoRa, Sigfox i NB-IoT)*

### 3. Dizajn i realizacija senzorskog sklopa

Senzorski sklop predložen u nastavku rada temelji se na principu *SIF* [37, 38, 43], koja predstavlja napredan i nedestruktivan pristup procjeni fotosintetske aktivnosti biljaka. Pri apsorpciji Sunčeva zračenja, biljke inicijalno apsorbiraju širok spektar elektromagnetskog zračenja, nakon čega dolazi do prijenosa energije kroz fotosintetske pigmente, prvenstveno klorofile i karotenoide. Dio apsorbirane energije disipira se kroz fotokemijske procese, dok se ostatak emitira u obliku fluorescencije, pri čemu pobuđene molekule klorofila izravno emitiraju fotone ili induciraju emisiju iz drugih fluorofora.

Intenzitet i spektralna raspodjela fluorescencije ovise o fiziološkom stanju biljke te o okolišnim uvjetima, uključujući pigmentaciju lišća, vodni stres i razinu incidentnog zračenja. Analizom refleksije i emisije na odabranim valnim duljinama moguće je odrediti različite vegetacijske indekse, poput NDVI-a, kao i procijeniti intenzitet fluorescencije klorofila.

Važno je istaknuti da se izmjereni fluorescentni signal može značajno razlikovati među različitim vrstama biljaka, pa čak i među genotipovima unutar iste vrste, primjerice kod kukuruza. Takva varijabilnost omogućuje primjenu *SIF*-a kao pouzdanog indikatora fotosintetske učinkovitosti i ukupne produktivnosti vegetacije, osobito u kontekstu precizne poljoprivrede i praćenja stanja usjeva u stvarnim terenskim uvjetima.

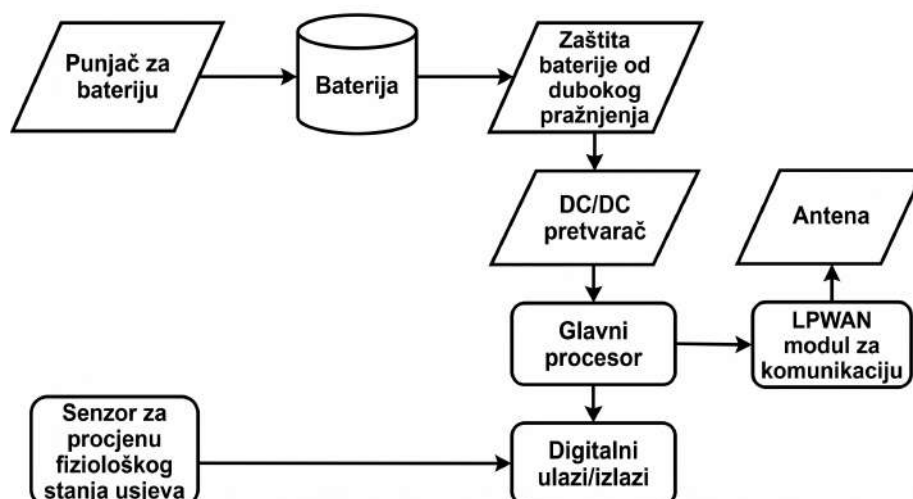
Razvoj prototipa uređaja za procjenu morfo-fiziološkoga stanja usjeva kukuruza proveden je u dvije faze. Prva faza bila je usmjerena na verifikaciju koncepta i osnovnih funkcionalnosti sustava tijekom prve godine istraživanja, dok je u drugoj fazi provedena integracija optimiranih tehničkih rješenja te razvoj konačne verzije uređaja s mogućnošću povezivanja u IoT mreže.

Primarni cilj istraživanja bio je razvoj senzorskog sustava temeljenog na neinvazivnom mjerenju fluorescencije klorofila primjenom naprednih spektralnih metoda, čime se izbjegavaju ograničenja klasičnih invazivnih pristupa koji zahtijevaju umjetnu pobudu i adaptaciju uzorka na tamu. U tu svrhu korištena su mjerenja u NIR području na diskretnim valnim duljinama od 610 nm (R), 680 nm (S), 730 nm (T), 760 nm (U), 810 nm (V) i 860 nm (W).

Na tim valnim duljinama analiziraju se promjene refleksije (R), propusnosti (T) i apsorpcije (A), koje su izravno povezane s fotokemijskom učinkovitošću fotosustava II.

Odabir optimalnih valnih duljina predstavlja ključan korak u dizajnu sustava, s ciljem povećanja osjetljivosti na rane promjene u fotosintetskom aparatu prije pojave vidljivih simptoma stresa, poput rolanja listova. Na temelju prikupljenih podataka razvijen je ugrađeni računalni sustav koji koristi metode strojnog učenja za detekciju i klasifikaciju stresnih uvjeta u usjevima kukuruza, pri čemu je naglasak stavljen na jednostavnost implementacije i robusnost rada u terenskim uvjetima.

Konačna verzija prototipa sastoji se od optičkog senzora, AS7263 NIR spektrometra za procjenu morfo-fiziološkog stanja. Digitalni šesterokanalni NIR spektrometar koristi se za spektralnu analizu u NIR području. Takva integracija omogućuje sveobuhvatno praćenje fizioloških parametara relevantnih za procjenu stanja biljaka. Blokovski prikaz sklopovlja razvijenog prototipa prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1: Blokovski prikaz sklopovlja razvijenog prototipa

### 3.1. Mikroupravljač STM32G030K8T6

Za upravljanje predloženim sustavom odabran je mikroupravljač tvrtke STMicroelectronics, model STM32G030K8T6 [63], koji u kombinaciji s komunikacijskim modulom LoRaWAN tehnologije RFM95W omogućuje energetski učinkovitu i dugodometnu bežičnu komunikaciju. Takva arhitektura osigurava pouzdano, skalabilno i kontinuirano prikupljanje podataka u stvarnom vremenu, što je ključno za primjenu u opsežnim terenskim uvjetima precizne poljoprivrede.

STM32G030K8T6 temelji se na 32-bitnoj Arm® Cortex®-M0+ *RISC* (engl. *Reduced Instruction Set Computer*) arhitekturi te ostvaruje radni takt do 64 MHz. Mikroupravljač se odlikuje visokom razinom integracije perifernih jedinica, uključujući komunikacijska sučelja, tajmera i analogno-digitalne pretvarače, čime se smanjuje potreba za dodatnim vanjskim komponentama i pojednostavljuje dizajn sklopovlja.

Posebno važna značajka ovog mikroupravljača je optimizirana potrošnja energije, koja omogućuje učinkovito upravljanje energetske resursima u baterijski napajanim sustavima. Time se osigurava dugotrajan autonomni rad senzorskog sklopa, što je jedan od ključnih zahtjeva u bežičnim senzorskim mrežama.

S obzirom na kombinaciju dovoljne procesorske snage, niske potrošnje energije i integriranih funkcionalnosti, STM32G030K8T6 predstavlja prikladan izbor za glavni upravljački element uređaja za procjenu morfo-fiziološkog stanja usjeva kukuruza.

| Karakteristika / Sučelje                   | Specifikacija (STM32G030K8T6)                      |
|--|--|
| <b>Glavne karakteristike</b>               |  |
| Jezgra (Core)                              | Arm <sup>®</sup> Cortex <sup>®</sup> -M0+ (32-bit) |
| Radna frekvencija                          | Do 64 MHz  |
| Flash memorija                             | 64 KB  |
| SRAM memorija                              | 8 KB   |
| Radni napon                                | 2.0 V do 3.6 V                                     |
| Radna temperatura                          | -40 °C do 85 °C                                    |
| Broj I/O pinova                            | Do 29 brzih I/O pinova                             |
| Kućičšte (Package)                         | LQFP32 (32 pina)                                   |
| DMA  | 5-kanalni DMA kontroler                            |
| <b>Komunikacijska sučelja (Interfaces)</b> |  |
| I2C  | 2x   |
| USART                                      | 2x   |
| SPI  | 2x   |
| I2S  | 1x   |
| <b>Periferija i timeri</b>                 |  |
| ADC  | 1x 12-bitni ADC                                    |
| Napredni timeri (PWM)                      | 1x 16-bitni timer                                  |
| Opći timeri (General-purpose)              | 4x 16-bitni timeri                                 |
| Watchdog i SysTick                         | 2x Watchdog, 1x SysTick timer                      |
| RTC (Real-time clock)                      | Da (s kalendarom, alarmom i periodičnim buđenjem)  |
| Debugiranje                                | Serial Wire Debug (SWD)                            |

**Tablica 3.1:** Glavne karakteristike i sučelja mikroupravljača STM32G030K8T6

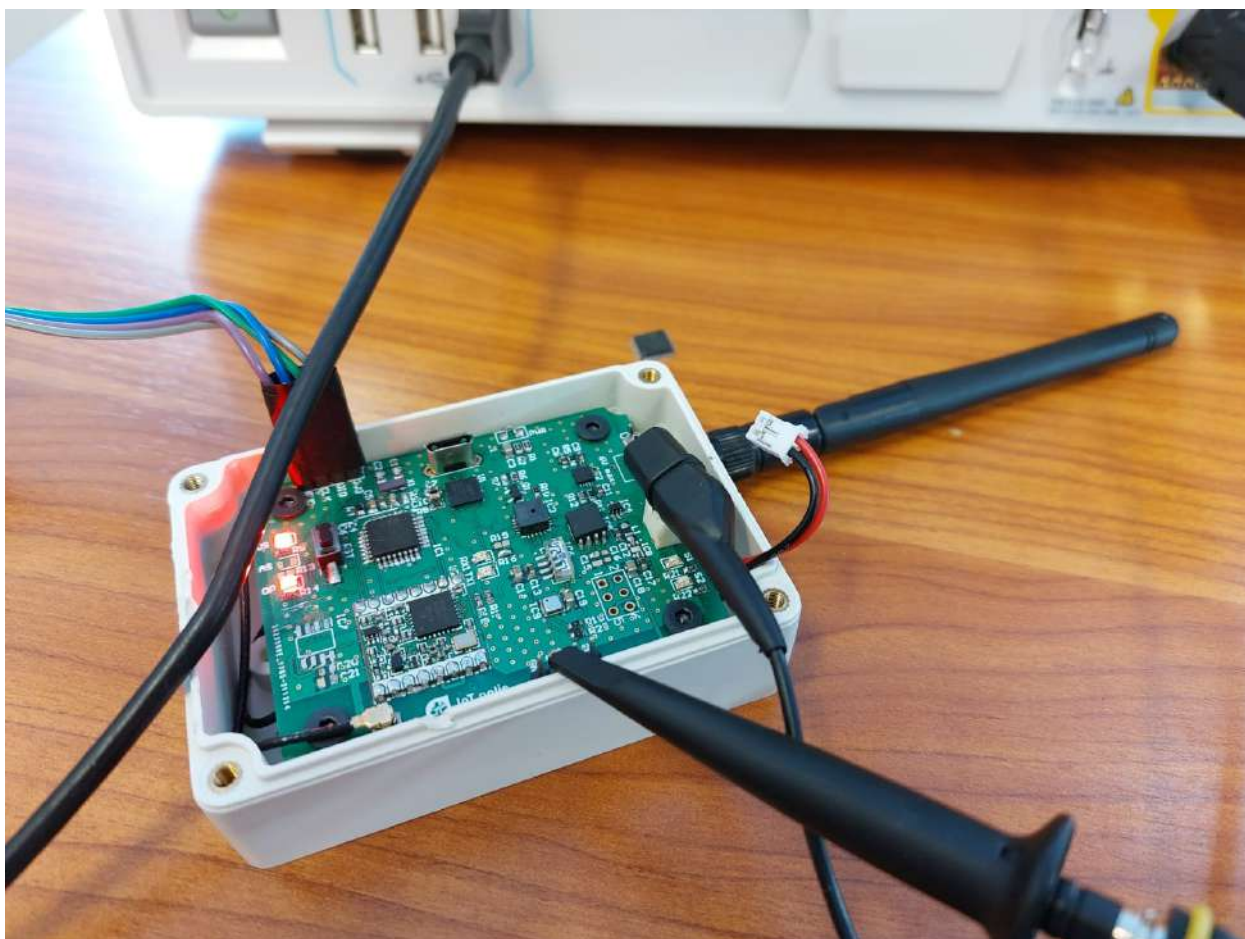
U nastavku poglavlja prikazani su shematski prikaz i fotografije realiziranog senzorskog sklopa. Na shemi u prilogu ?? prikazana je konfiguracija glavnog mikroupravljača STM32G030K8T6, koji je zadužen za prikupljanje, obradu i prilagodbu podataka zaprimljenih sa senzorskih modula namijenjenih procjeni morfo-fiziološkog stanja usjeva, s naglaskom na detekciju ranih znakova stresa, poput rolanja listova.

Obradjeni podatci prenose se s mikroupravljača prema radiomodulu RFM95W putem serijskog perifernog sučelja SPI (*engl. Serial Peripheral Interface*), koje omogućuje brzu i pouzdanu komunikaciju između komponenti. Nakon uspješnog očitavanja podataka sa

senzora, radiomodul RFM95W, slika 3.1 koristi LoRaWAN komunikacijsku protokol za odašiljanje telemetrijskih podataka prema pristupnicima.

Pristupnici zaprimljene podatke prosljeđuju prema mrežnim i aplikacijskim poslužiteljima, gdje se provodi njihova pohrana, obrada i vizualizacija, čime se omogućuje daljnja analiza i donošenje odluka. Ovakva višeslojna komunikacijska arhitektura osigurava pouzdan prijenos podataka s terena do krajnjih korisničkih aplikacija.

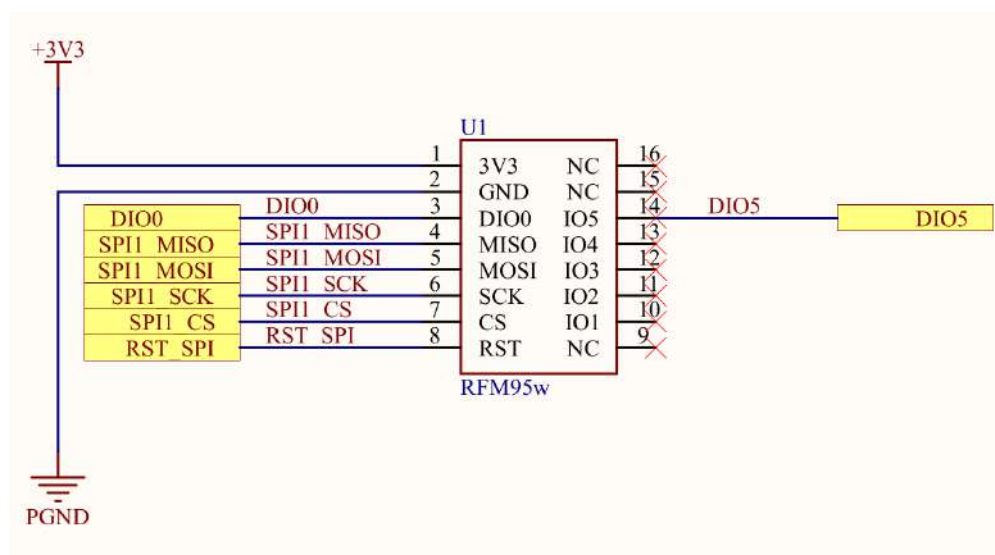
Prototip integriranog sklopa za kontinuiranu procjenu morfo-fiziološkog stanja usjeva kukuruza u stvarnom vremenu prikazana je na slici 3.2. U sljedećim poglavljima prikazat će se detaljna analiza sheme prototipa te pojedinih funkcionalnih podsustava, uključujući podsustav napajanja, sklop za punjenje baterije, te komunikacijski modul. Poseban naglasak stavit će se na međusobnu integraciju navedenih cjelina i njihov utjecaj na ukupne performanse, energetska učinkovitost i pouzdanost rada sustava.



Slika 3.2: Prototip uređaja

### 3.2. Primopredajni modul RFM95W

Primopredajni modul RFM95W koristi LoRaWAN protokol, čime se postiže velik domet komunikacije i visoka otpornost na smetnje uz minimalnu potrošnju energije. Navedeni modul postiže osjetljivost do -148 dBm primjenjujući patentiranu metodu modulacije tvrtke HopeRF i integriranoga pojačala snage od +20 dBm. Kombinacija visoke osjetljivosti čini modul idealnim za primjenu koja zahtijeva velik domet i nisku potrošnju električne energije. LoRaWAN protokol također nadmašuje klasične modulacijske pristupe u pogledu otpornosti na blokiranje signala i selektivnosti, čime se uspješno rješava uobičajeni kompromis pri dizajnu sustava između komunikacijskoga dometa, otpornosti na smetnje i potrošnje energije [64].



Slika 3.3: Shema primopredajnog LoRa modula RFM95W

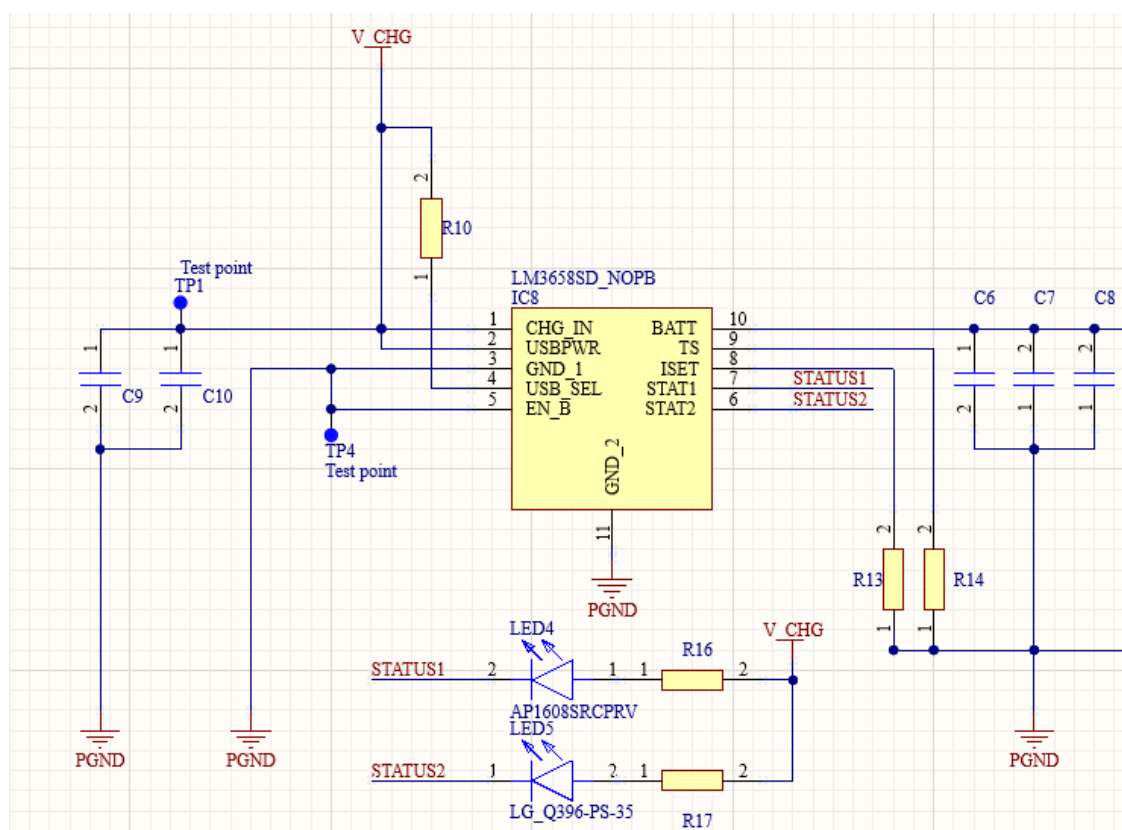
### 3.3. Baterijski sustav

Baterije temeljene na litiju predstavljaju dominantnu tehnologiju za pohranu električne energije u suvremenim elektroničkim sustavima, uključujući IoT uređaje. Riječ je o punjivim baterijama visoke gustoće energije, pri čemu litij kao aktivni materijal omogućuje značajno smanjenje mase i volumena izvora napajanja. U odnosu na nikal-metal-hidridne baterije, litijske baterije ostvaruju približno dvostruko veću gustoću energije, kao i viši nazivni napon od oko 3,6 V u odnosu na 1,2 V kod NiMH tehnologije.

Dodatne prednosti uključuju izostanak memorijskog učinka, što omogućuje punjenje baterije u proizvoljnom trenutku bez potrebe za potpunim pražnjenjem, kao i velik broj ciklusa

punjenja i pražnjenja, tipično u rasponu od 500 do 1000 ciklusa, uz zadržavanje zadovoljavajućeg kapaciteta. Takve karakteristike čine litijske baterije prikladnima za dugotrajne autonomne sustave.

S druge strane, litijske baterije osjetljive su na prepunjavanje i duboko pražnjenje, što može dovesti do degradacije ili oštećenja baterije. Zbog toga je nužna primjena zaštitnih i upravljačkih sklopova koji nadziru radne uvjete baterije. U ovome sustavu koriste se dva integrirana sklopa, LM3658SD za upravljanje procesom punjenja i indikaciju statusa putem svjetlećih dioda, te AP9211SA za nadzor pražnjenja i zaštitu od prekomjerne struje, kratkog spoja i dubokog pražnjenja. Takva kombinacija omogućuje siguran i pouzdan rad baterijskog napajanja u dugotrajnim terenskim uvjetima.



Slika 3.4: LM3658D punjač za litijsku bateriju

Integrirani sklop LM3658SD namijenjen je upravljanju punjenjem jedne ćelije litij-ionske (Li-Ion) baterije te objedinjuje funkcije regulacije i nadzora procesa punjenja unutar jednog rješenja. Podržava napajanje iz dvaju izvora, što omogućuje fleksibilnu integraciju u različite sustave. Punjenje baterije može se ostvariti putem AC/DC ispravljača (230 V AC na 5 V DC) ili putem USB sučelja.

Sklop implementira automatski odabir izvora napajanja, pri čemu AC izvor ima prioritet

u odnosu na USB. U tom režimu omogućene su veće struje punjenja uz dinamičku prilagodbu ovisno o fazi punjenja. Proces se odvija kroz standardne faze: predpunjenje, punjenje konstantnom strujom i punjenje konstantnim naponom, pri čemu se struja tipično kreće u rasponu od približno 50 mA do 1000 mA.

Kod napajanja putem USB sučelja maksimalna struja punjenja određuje se vanjskim otpornikom. U prikazanoj konfiguraciji otpornik R10 definira maksimalnu struju punjenja na 500 mA, u skladu s ograničenjima USB standarda. Otpornik R13 analogno definira maksimalnu struju punjenja pri korištenju AC izvora, čime se omogućuje prilagodba performansi i osigurava zaštita baterije.

Prednost sklopa LM3658SD je u malom broju potrebnih vanjskih komponenti, što pojednostavnjuje implementaciju i povećava pouzdanost sustava, osobito u primjenama koje zahtijevaju dugotrajan autonomni rad. Status punjenja baterije signalizira se putem svjetlećih dioda LED4 i LED5, čije su funkcije definirane u tablici 3.2.

**Tablica 3.2:** Status punjenja baterije signaliziran putem svjetlećih dioda

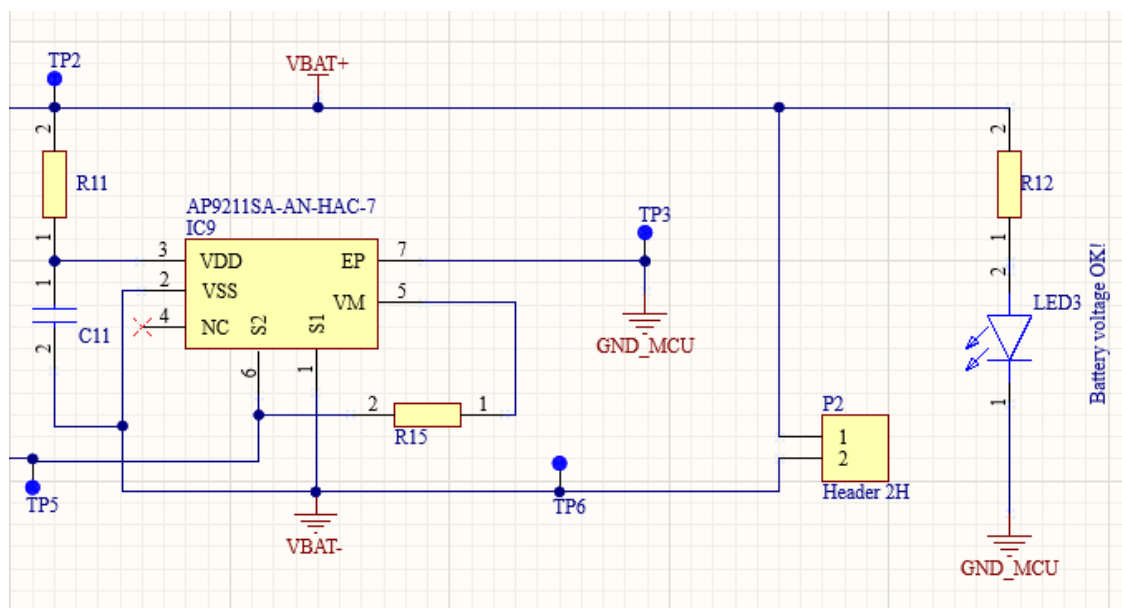
| STAT1 | STAT2 | Status punjenja        |
|-------|-------|------------------------|
| OFF   | OFF   | Punjač isključen       |
| ON    | OFF   | Punjenje u tijeku      |
| OFF   | ON    | Baterija napunjena     |
| ON    | ON    | Loša baterija, LDO mod |

Integrirani sklop AP9211SA [65] namijenjen je nadzoru i zaštiti jedne ćelije litij-ionske baterije te implementira više zaštitnih funkcija na razini sustava. Sklop omogućuje detekciju prenapona i nadstruje tijekom punjenja i pražnjenja, kao i zaštitu od kratkog spoja. U slučaju detekcije nepravilnih radnih uvjeta, AP9211SA isključuje integrirani N-kanalni MOSFET, čime se prekida strujni krug i štiti bateriju.

Na slici 3.5 prikazana je tipična konfiguracija sklopa. Otpornik R11 i kondenzator C11 čine RC mrežu za filtriranje i stabilizaciju ulaznog napona sklopa, čime se smanjuje utjecaj šuma i osigurava stabilan rad nadzorne logike. Otpornik R15 povezuje priključke PGND i VM te ima ključnu ulogu u nadzoru struje punjenja i pražnjenja, kao i u detekciji statusa punjača.

Vrijednost otpornika R15 preporučuje se u rasponu od 300  $\Omega$  do 4 k $\Omega$ , pri čemu je standardna vrijednost 2,7 k $\Omega$ . Osim svoje primarne funkcije, otpornici R11 i R15 dodatno djeluju kao ograničivači struje u slučaju obrnutog polariteta pri spajanju baterije ili punjača. U takvim uvjetima može doći do povećane disipacije snage na navedenim otpornicima, stoga

je potrebno pažljivo dimenzionirati njihove vrijednosti i snagu u skladu s očekivanim radnim uvjetima kako bi se spriječilo termičko preopterećenje i potencijalno oštećenje sklopa.



Slika 3.5: AP9211SA zaštitni integrirani krug za litijsku bateriju

### 3.4. Istosmjerni pretvarač napona

Istosmjerni pretvarač (*DC/DC*, engl. *Direct Current to Direct Current*) elektronički je sklop namijenjen pretvorbi istosmjernog napona s jedne naponske razine na drugu, uz što veću učinkovitost i minimalne gubitke. U pravilu se temelji na sklopnim tehnikama, čime se postiže znatno veća učinkovitost u odnosu na linearne regulatore.

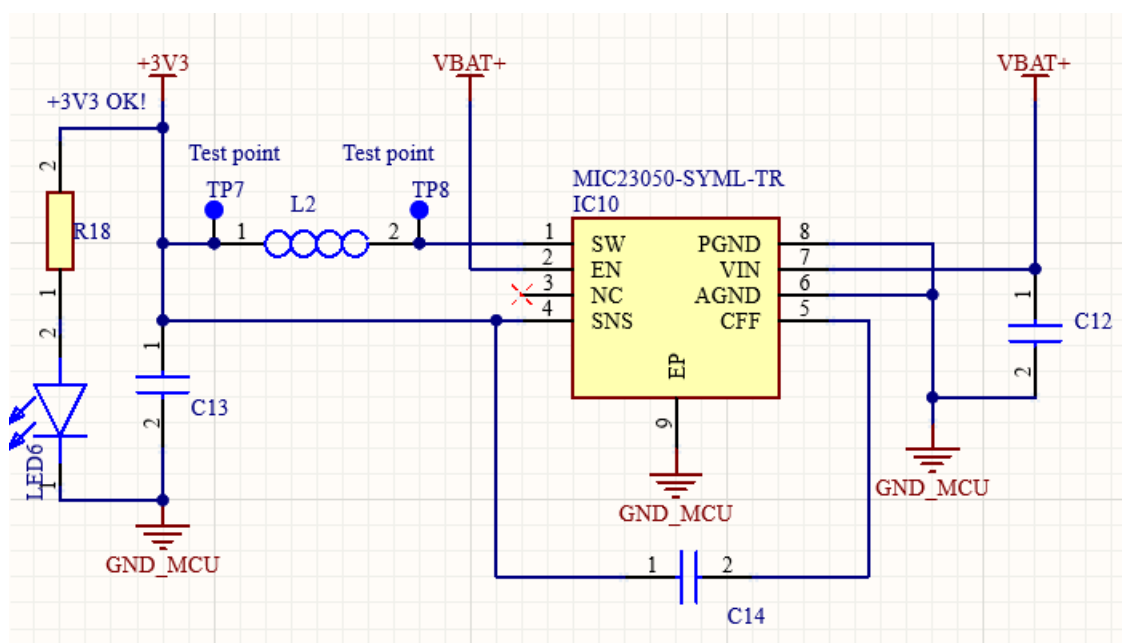
S obzirom na to da se u ovome istraživanju za napajanje čvora za procjenu morfofiziološkog stanja koristi litij-ionska baterija s maksimalnim naponom od 4,2 V, dok je za ispravan rad uređaja potreban stabilizirani napon od 3,3 V, nužna je primjena silaznog DC/DC pretvarača. U tu svrhu odabran je Micrelov integrirani pretvarač MIC23050, koji se odlikuje visokom učinkovitošću i kompaktnim dizajnom.

MIC23050 je sklopni pretvarač upravljani pulсно-širinskom modulacijom, s fiksnim izlaznim naponom od 3,3 V i radnom frekvencijom od 4 MHz u režimu konstantne struje. Maksimalna izlazna struja iznosi 600 mA, dok pretvarač zadržava visoku učinkovitost (veću od 90%) već pri opterećenjima od oko 1 mA. Niska struja mirovanja od približno 20  $\mu$ A dodatno doprinosi energetskej učinkovitosti sustava, što je ključno za baterijski napajane uređaje.

Za rad sklopa potreban je minimalan broj vanjskih komponenti, konkretno dva kondenzatora i jedna zavojnica. Vrijednost zavojnice odabrana je na 1  $\mu\text{H}$ , u skladu s očekivanom potrošnjom od približno 100 mA, pri čemu se postiže učinkovitost oko 90 %. Kondenzatori C12 i C13 dimenzionirani su prema preporukama proizvođača (4,7  $\mu\text{F}$ , 6,3 V) radi osiguravanja stabilnog rada i filtriranja naponskih promjena.

Dodatni kondenzator povezan između izlaza pretvarača i priključka CFF koristi se za poboljšanje stabilnosti regulacije i smanjenje prijelaznih pojava. Pri realizaciji tiskane pločice potrebno je voditi računa o rasporedu komponenti, posebno je važno da kondenzator C14 bude postavljen na odgovarajućoj udaljenosti od priključka SW kako bi se smanjio utjecaj visokofrekvencijskog šuma uzrokovanog radom pretvarača.

Svjetleća dioda LED6 implementirana je kao indikacija prisutnosti izlaznog napona od 3,3 V te služi za verifikaciju ispravnog rada pretvarača tijekom faze izrade i testiranja prototipa.



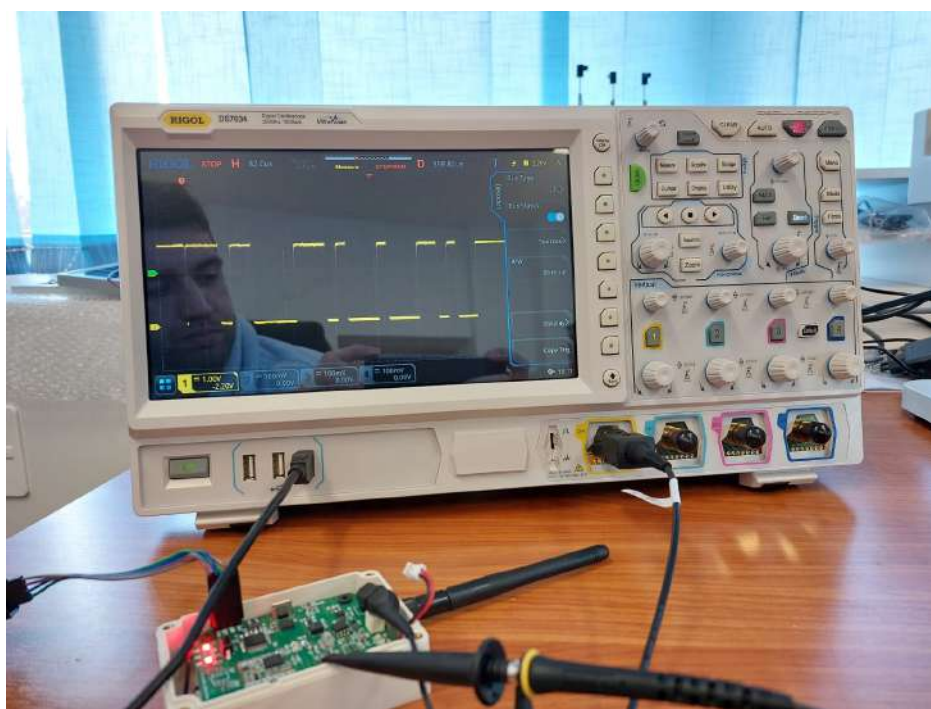
Slika 3.6: Shema spajanja istosmjerni pretvarača napona

Završna testiranja uređaja za procjenu morfo-fiziološkoga stanja usjeva kukuruza provedena su u laboratorijskim uvjetima na FERIT-u. Tijekom ispitivanja analizirana je komunikacija na I<sup>2</sup>C sabirnici između glavnog mikroprocesora i AS7263 NIR spektrometra, kako je prikazano na slici 3.7. Posebna pozornost posvećena je integritetu signala, pri čemu su analizirani vremenski odzivi, razine napona i eventualne smetnje na linijama SDA i SCL. Mjerenja su provedena digitalnim osciloskopom Rigol DS7034, što je omogućilo verifikaciju ispravnosti komunikacijskog protokola i detekciju potencijalnih problema poput refleksija,

šuma ili nepravilnih prijelaza signala.

Programiranje glavnog mikroprocesora STM32G030K8T6 realizirano je korištenjem alata *STM32CubeMX* i razvojne okoline *STM32 System Workbench*. *STM32CubeMX* korišten je za inicijalnu konfiguraciju sustava, uključujući postavljanje radnog takta mikroprocesora i konfiguraciju višenamjenskih ulazno-izlaznih priključaka, kao i inicijalizaciju komunikacijskih sučelja, tajmera i ostalih perifernih jedinica. Alat generira početni kôd u programskom jeziku C zajedno s pripadajućim bibliotekama, čime se ubrzava razvoj i smanjuje mogućnost pogrešaka pri inicijalizaciji sustava.

Generirani kôd dodatno je prilagođen specifičnim zahtjevima aplikacije, uključujući implementaciju komunikacijskih rutina za I<sup>2</sup>C sabirnicu i obradu podataka sa senzora. Za daljnji razvoj, kompilaciju i prijenos kôda na mikroprocesor korištena je razvojna okolina *STM32CubeIDE*, temeljena na *Eclipse* platformi, koja omogućuje učinkovito upravljanje projektom, otklanjanje pogrešaka i optimizaciju rada sustava.



**Slika 3.7:** Snimanje karakteristike I<sup>2</sup>C komunikacijske sabirnice

## 4. Eksperimentalna analiza parametara protokola

### LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

Bežična senzorska mreža sastoji se od velikog broja čvorova razmještenih na relativno različitim međusobnim udaljenostima. Komunikacija među čvorovima i komunikacija čvorova s pristupnikom može se odvijati izravno ili kroz više skokova. Pozicije senzorskih čvorova u prostoru u pravilu su poznate, pa je za podatke prikupljene putem senzora poznata i njihova precizna izvorišna lokacija. Senzorske čvorove karakteriziraju male dimenzije, niska potrošnja energije, mogućnost prikupljanja i lokalne obrade podataka te bežična komunikacija odgovarajućeg dometa. Takav koncept omogućuje prikupljanje podataka u neposrednoj blizini promatranog područja te jednostavan prijenos do udaljene središnje lokacije za daljnju obradu.

Heterogenost senzorskih mreža omogućuje optimalnu prilagodbu različitim područjima primjene jer ne postoji jedno univerzalno rješenje prikladno za sve primjene. Svaka primjena zahtijeva prikladan izbor komponenti i komunikacijskih standarda radi ostvarivanja pouzdane, sigurne i energetski učinkovite komunikacije. U području precizne poljoprivrede senzorski čvorovi prikupljaju podatke o okolišu i fiziološkim parametrima usjeva. Količina prenesenih podataka je razmjerno mala, no nužno je osigurati prijenos na udaljenosti od nekoliko kilometara do nekoliko desetaka kilometara. Izvor energije senzorskog čvora najčešće je baterija, povremeno dopunjena solarnim kolektorom, njena je zamjena često nemoguća ili nepraktična, pa je optimizacija potrošnje energije ključan zahtjev pri implementaciji.

Analiza opisana u ovoj disertaciji obuhvaća specifičnosti komunikacije u različitim scenarijima s obzirom na lokaciju senzora te potrebu za kontinuiranim praćenjem parametara u stvarnom vremenu. U radu se dodatno analizira ponašanje mreže te se istražuju mogućnosti optimizacije njezine topologije, razmještaja čvorova, procesa prikupljanja i agregacije

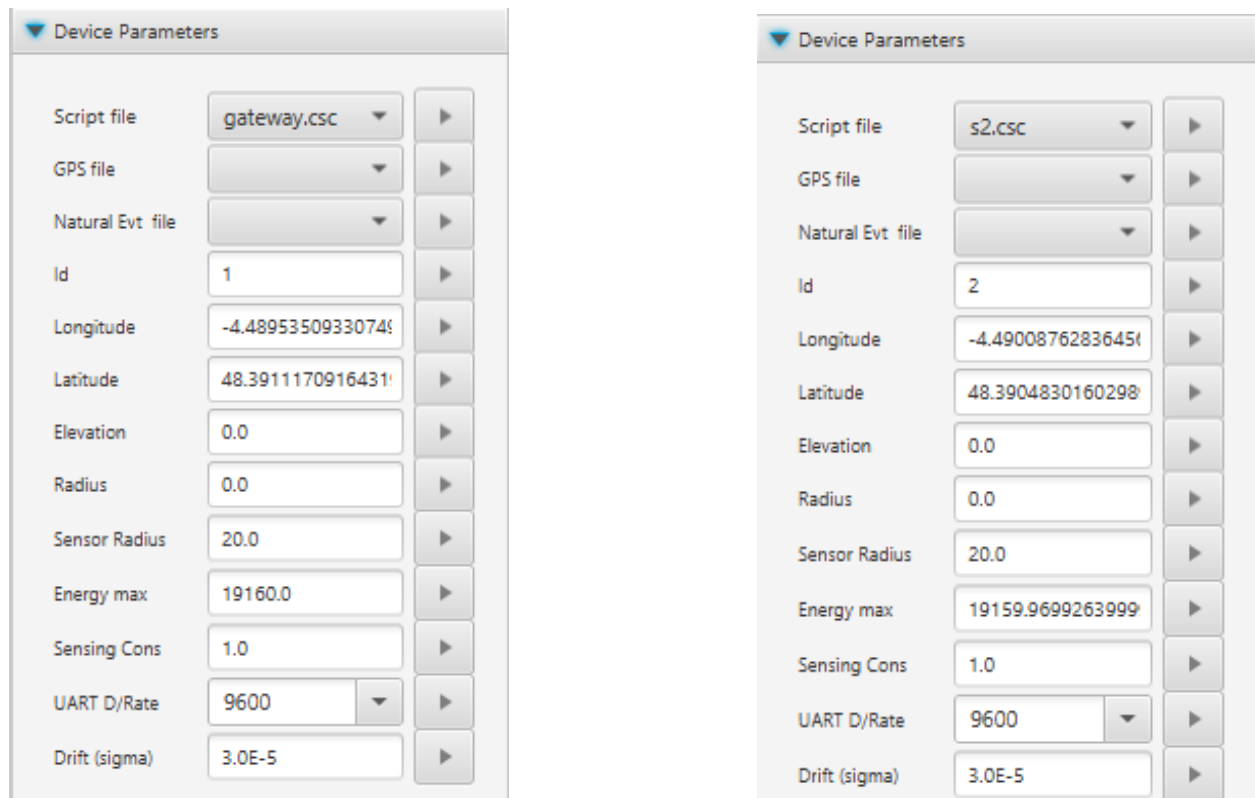
podataka, kao i ukupne potrošnje energije. Eksperimentalno okruženje obuhvaća geografski dislocirane poljoprivredne površine na kojima se u različitim uvjetima kontinuirano prate okolišni i drugi parametri ključni procjenu morfo-fiziološkoga stanja usjeva.

Osnovna funkcija senzorske mreže slanje je prikupljenih podataka s krajnjih uređaja prema poslužiteljima za pohranu i obradu. U sklopu rada uspoređuje nekoliko bežičnih komunikacijskih tehnologija s ciljem odabira rješenja koje pruža odgovarajući domet i energetska učinkovitost, uz potrebnu razinu pouzdanosti i sigurnosti prijenosa. Mobilne mreže udovoljavaju zahtjevima dometa i pouzdanosti, no energetska su zahtjevnija i unose dodatne troškove pretplate, pa nisu razmatrane kao optimalno rješenje. S obzirom na to da su senzorski čvorovi raspoređeni na udaljenostima od nekoliko kilometara, tehnologije kratkoga dometa ne udovoljavaju postavljenim zahtjevima. Unatoč tome, u nastavku će se radi usporedbe razmotriti i najzastupljeniji standardi iz te skupine, poput Wi-Fi-ja i ZigBee-ja.

#### **4.1. Simulacijska analiza topologija i utjecaja prometa**

Za simulacijsku analizu komunikacije korišten je simulator CupCarbon koji omogućuje modeliranje i evaluaciju bežičnih senzorskih mreža u različitim scenarijima. U provedenim simulacijama analizirane su konfiguracije u kojima senzorski sklopovi komuniciraju s pristupnikom, pri čemu svi čvorovi koriste omnidirekionalne antene. Prije pokretanja simulacije bilo je potrebno definirati mrežnu topologiju i konfigurirati parametre svih čvorova, čvorovi su označeni oznakama  $s_x$ , gdje  $x$  predstavlja redni broj čvora, odnosno njegovu identifikacijsku vrijednost ( $Id$ ). Konfiguracija čvorova, uključujući pristupnik (a) i senzorske čvorove (b), prikazana je na slici 4.1. Za svaki su čvor definirani identifikacijska oznaka (npr. pristupnik ima  $Id = 1$ ), geografska lokacija unutar simulacijskog prostora i najveća početna razina energije, što izravno utječe na ponašanje mreže tijekom simulacije.

#### 4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi



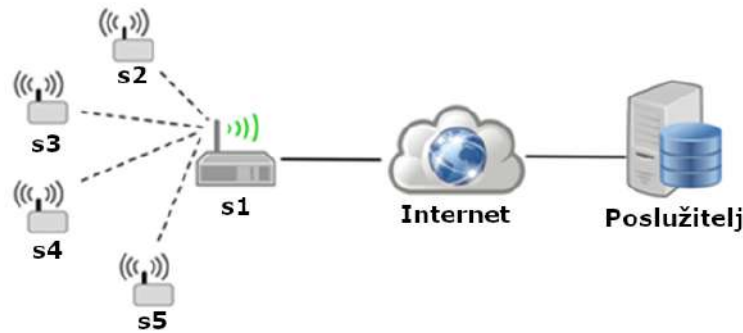
(a) Postavke pristupnika.

(b) Postavke krajnjeg čvora.

**Slika 4.1:** Postavke mrežnih čvorova u CupCarbon simulatoru za pristupnik ( $s_1$ ) i senzorske čvorove ( $s_2$ - $s_5$ ).

LoRaWAN arhitektura temelji se na zvjezdastoj topologiji koja omogućuje učinkovitu komunikaciju u mrežama s velikim brojem krajnjih uređaja uz nisku potrošnju energije. Pristupnik ima središnju ulogu i jedina je komunikacijska točka između senzorskih sklopova i ostatka mrežne infrastrukture. senzorski sklopovi međusobno ne komuniciraju, već prikupljene podatke izravno šalju pristupniku putem LoRa fizičkog sloja. Pristupnik djeluje kao most prema mrežnom poslužitelju i prosljeđuje podatke putem IP mreže (interneta ili privatne infrastrukture), gdje se provodi daljnja obrada, pohrana i vizualizacija. Time se pojednostavljuje mrežna struktura, omogućuje centralizirano upravljanje i jednostavno skaliranje, jer se novi čvorovi mogu dodavati bez izmjena postojeće konfiguracije.

Pristupni dio mreže 4.2 obuhvaća senzorske čvorove ( $s_2$ - $s_5$ ) povezane s pristupnikom. Čvorovi bliže pristupniku (npr.  $s_4$ ) zahtijevaju manji radijus pokrivanja i time manju prijenosnu snagu, dok udaljeniji čvorovi (npr.  $s_2$ ) moraju ostvariti veći domet, što povlači veće energetske zahtjeve.



Slika 4.2: Zvezdasta mrežna topologija

Radijusi pokrivanja signalom u simulatoru se konfiguriraju parametrom koji za svaki čvor određuje postotak pokrivenosti u odnosu na najveći domet koji čvor može ostvariti. Smanjenjem radijusa pokrivanja smanjuje se i potrebna prijenosna snaga, pa se time izravno postiže ušteda energije. U konfiguraciji prikazanoj u tablici 4.1 radijusi pokrivanja definirani su za čvorove s4 i s5 (parametar *atpl* postavljeni na 55 % maksimalnog dometa), dok za čvorove s2 i s3 nisu specificirani te koriste maksimalni radijus. Komunikacija je u svim slučajevima izravna prema pristupniku, bez međučvornoga prosljeđivanja, a slanje se podataka odvija u pseudo-slučajnim vremenskim intervalima uz definirano kašnjenje radi smanjenja vjerojatnosti kolizija.

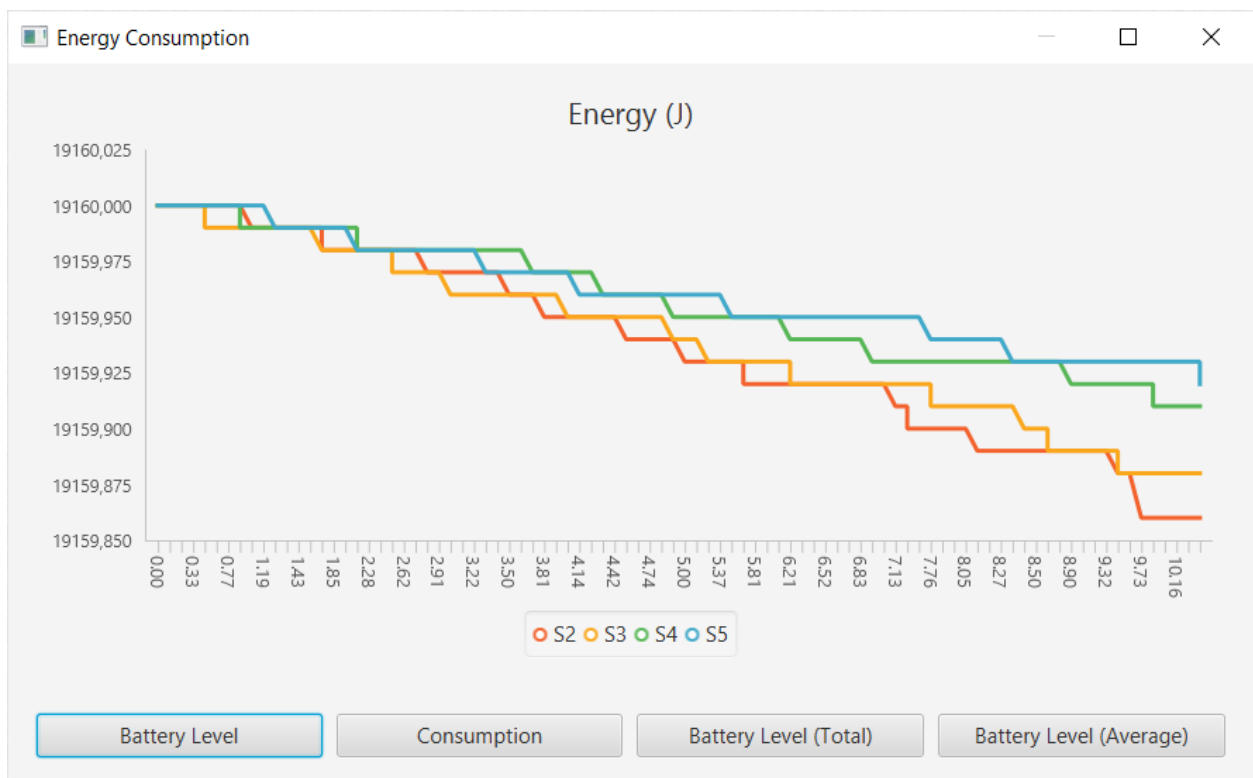
Tablica 4.1: Primjer konfiguracije parametara pristupnika i čvorova s2–s5 u Cup Carbon simulatoru

| Pristupnik | S2 i S3              | S4 i S5                           |
|------------|----------------------|-----------------------------------|
| loop       | randb x 10 1000      | atpl 55                           |
| wait       | delay \$x            | randb x 10 1000                   |
| read x     | send 1 1<br>delay 50 | delay \$x<br>send 1 1<br>delay 50 |

Radi usporedbe komunikacijskih tehnologija u zvezdastoj topologiji analizirana je potrošnja energije za tri tehnologije: ZigBee, LoRa i Wi-Fi. ZigBee se odlikuje malom širinom frekvencijskog pojasa, niskom potrošnjom energije i ograničenim dometom, pa je prikladan za manje IoT sustave u privatnim ili lokaliziranim okruženjima. Analiza potrošnje energije (slika 4.3) pokazuje da početne razine energije svih čvorova jednake, ali tijekom vremena udaljeniji čvorovi (s2 i s3) ostvaruju veću potrošnju zbog potrebe za većom prijenosnom snagom. LoRa tehnologija (slika 4.4) u pravilu troši više energije po pojedinom prijenosu

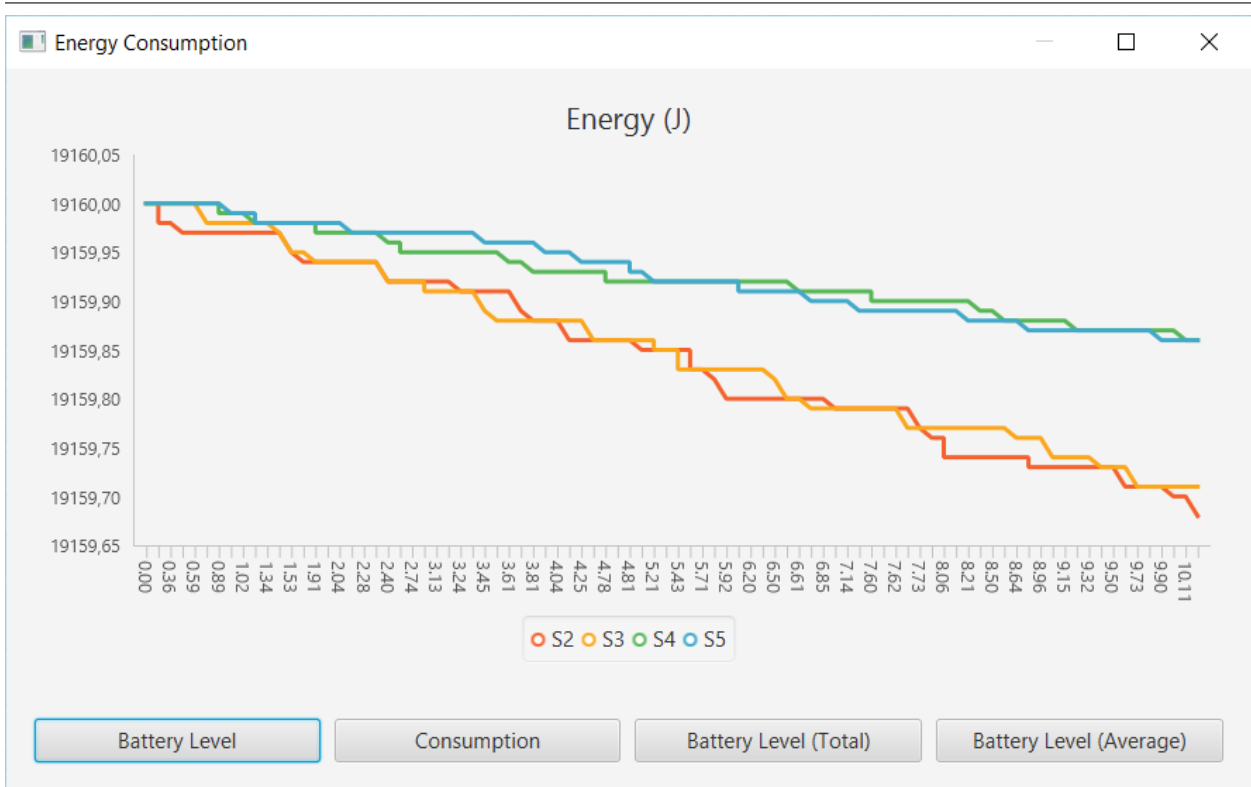
#### 4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

od ZigBee-a, ali omogućuje znatno veći domet, što je presudno za primjene na velikim površinama. Wi-Fi (slika 4.5) ostvaruje znatno veću potrošnju energije od obiju navedenih tehnologija, čime postaje neprikladan za dugotrajne terenske primjene. Prije detaljne analize, važno je napomenuti da na svim nadolazećim grafičkim prikazima potrošnje energije senzorskih sklopova x-os predstavlja vrijeme simulacije izraženo u sekundama (s ukupnim trajanjem od 10 s, definiranim u simulatoru CupCarbon), dok y-os označava razinu energije u džulima (J).

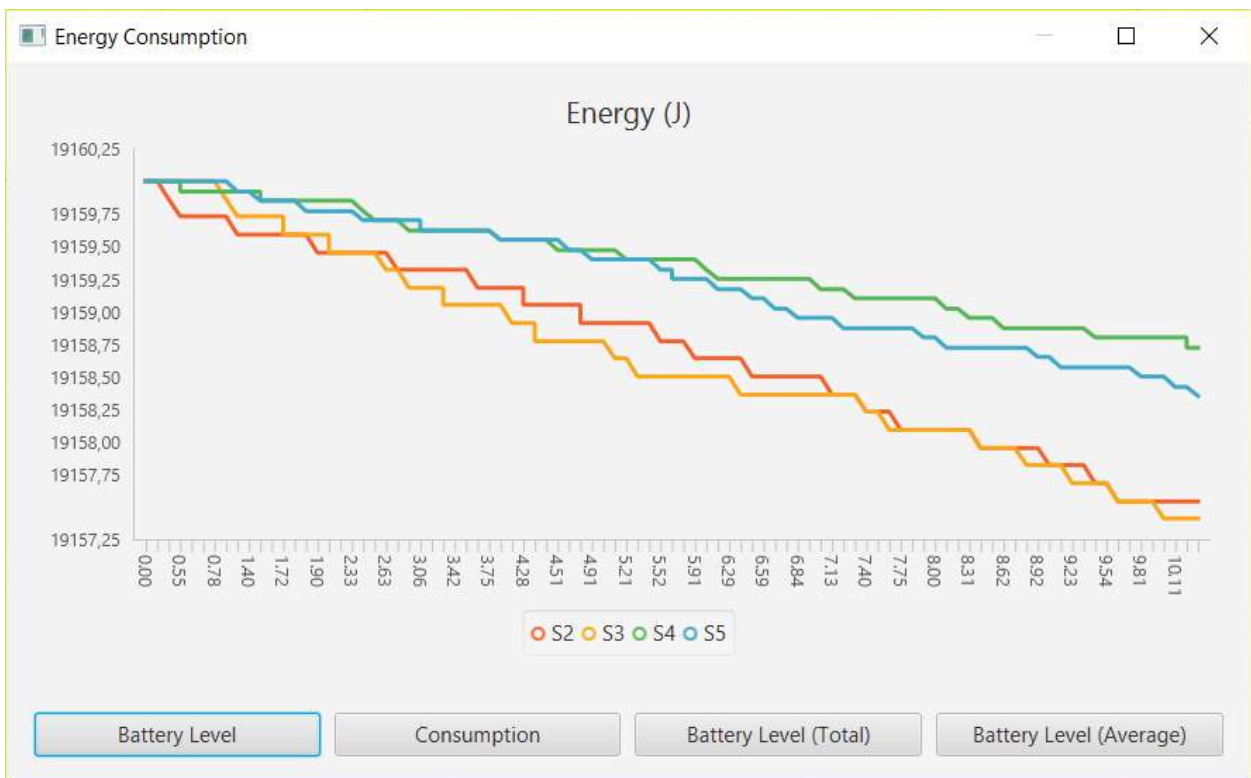


**Slika 4.3:** Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju ZigBee tehnologije

4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

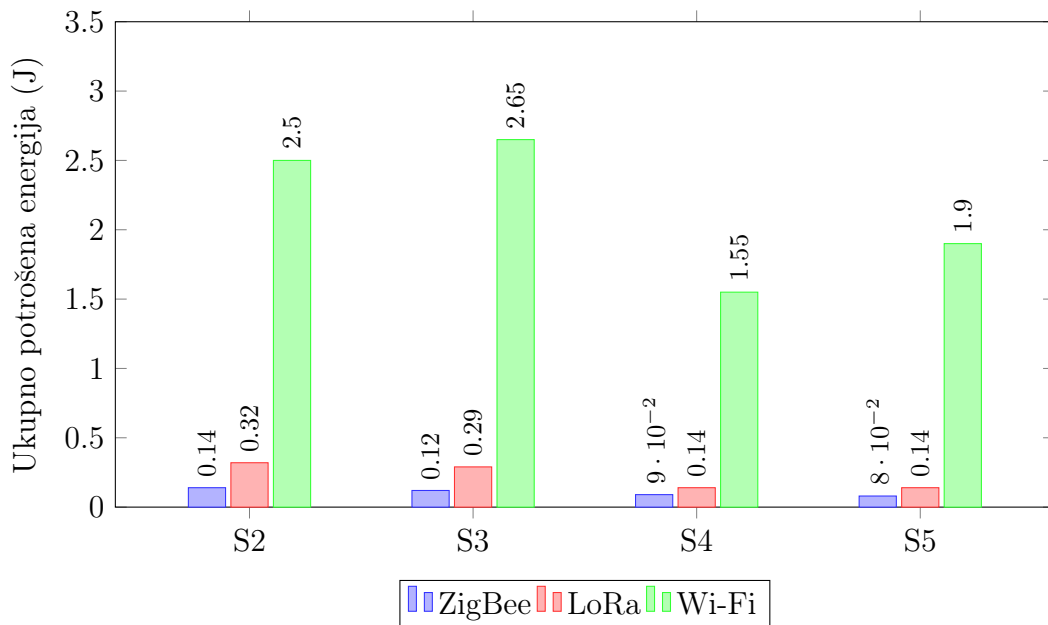


Slika 4.4: Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju LoRa tehnologije



Slika 4.5: Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju Wi-Fi tehnologije

#### 4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi



**Slika 4.6:** Usporedba ukupne potrošnje energije senzorskih sklopova pri korištenju ZigBee, LoRa i Wi-Fi tehnologija

Prikazana konfiguracija parametara unutar simulatora CupCarbon predstavlja namjenski oblikovan ubrzani testni scenarij, odnosno svojevrsni "stres-test" promatrane senzorske mreže. Korištenjem zadanih skriptnih naredbi, koje kombiniraju nasumično generirana vremenska kašnjenja i kratke fiksne pauze, senzorski sklopovi prisiljeni su na iznimno visoku učestalost komunikacije, emitirajući u prosjeku 18 podatkovnih paketa unutar vrlo kratkog simulacijskog vremena od svega 10 sekundi. Iako ovakav intenzitet prijenosa podataka ne odražava stvarne uvjete primjene u preciznoj poljoprivredi gdje se, radi optimalnog dimenzioniranja i višegodišnjeg očuvanja baterijskog kapaciteta, podaci tipično šalju u intervalima od 15 minuta on je metodološki opravdan i neophodan u kontekstu simulacije. Takva vremenska kompresija i namjerno intenziviranje mrežnog prometa omogućuju da se inače dugotrajni procesi pražnjenja baterije izoliraju, ubrzaju i jasno kvantificiraju unutar uskog simulacijskog okvira, čime se nedvosmisleno i egzaktno ističu energetske razlike između analiziranih komunikacijskih tehnologija i mrežnih topologija pod kontinuiranim opterećenjem.

Na temelju rezultata dobivenih ovim ubrzanim simulacijskim modelom, moguće je izvesti preciznu projekciju energetske autonomije sustava u realnim terenskim uvjetima. Uz pretpostavku realističnoga ciklusa u kojem se podaci šalju svakih 15 minuta, te uzimajući u obzir minimalnu potrošnju mikroupravljača u stanju dubokoga mirovanja (engl. *deep sleep*), ukupna procijenjena potrošnja pojedinog LoRaWAN čvora iznosi približno 200 mAh na godišnjoj razini. Ukoliko se za napajanje senzorskog sklopa iskoristi jedna litijska ćelija naziv-

#### 4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

noga kapaciteta 1800 mAh, teorijski vijek trajanja ovakvoga izvora napajanja iznosio bi oko 9 godina. Iako litijske ćelije odlikuje iznimno niska stopa samopražnjenja i visoka otpornost na vanjske temperaturne oscilacije karakteristične za poljoprivredna okruženja, uvažavajući starenje kemijskih komponenti tijekom dugogodišnje eksploatacije, inženjerski je opravdano procijeniti potpuno stabilnu autonomiju rada čvora na terenu u trajanju od 6 do 7 godina, i to bez ikakve potrebe za ljudskom intervencijom ili zamjenom izvora napajanja.

Kako bi se dobio jasan uvid u praktičnu održivost predloženog sustava, na temelju izmjerenih energetske vrijednosti izračunato je teorijsko trajanje rada senzorskog sklopa. U proračun je uvrštena jedna litijska ćelija nazivnoga kapaciteta 1800 mAh, konstantna struja u stanju dubokoga mirovanja od  $20 \mu\text{A}$  te realističan scenarij u kojem senzorski sklopovi šalju podatke u intervalima od 15 minuta. Rezultati teoretskog vijeka trajanja baterije za svaki pojedini čvor i komunikacijsku tehnologiju sistematizirani su u Tablici 4.2.

**Tablica 4.2:** Procijenjeni vijek trajanja litijske ćelije (1800 mAh) za pojedine čvorove uz interval slanja od 15 min

| Senzorski sklop | ZigBee (godine) | LoRa (godine) | Wi-Fi (godine) |
|-----------------|-----------------|---------------|----------------|
| S2              | 9,1             | 7,9           | 3,1            |
| S3              | 9,2             | 8,1           | 3,0            |
| S4              | 9,5             | 9,1           | 4,2            |
| S5              | 9,6             | 9,1           | 3,7            |

S obzirom na zahtjeve velike prostorne rasprostranjenosti čvorova i autonomnoga rada, LoRaWAN se nameće kao optimalno rješenje. Iako ZigBee tehnologija ostvaruje izvrsnu energetske učinkovitost, njezina je primjena u ovakvim terenskim uvjetima nepraktična zbog izrazito ograničenoga komunikacijskog dometa. S druge strane, LoRaWAN je projektirana upravo za IoT primjene u ruralnim i teško dostupnim područjima, gdje uređaji moraju ostvarivati komunikaciju na velikim udaljenostima uz minimalnu potrošnju. Iz tih je razloga LoRaWAN tehnologija odabrana kao temelj za sve daljnje analize u disertaciji.

## 4.2. LoRaWAN protokol

LoRaWAN protokol karakterizira niska potrošnja energije i velik komunikacijski domet, u pravilu od 10 do 40 km na otvorenim područjima, odnosno 1 do 5 km u urbanim uvjetima. Zahvaljujući optimiziranim protokolima, životni vijek baterije može prelaziti 10 godina. Glavni nedostaci uključuju nisku brzinu prijenosa i, kod pojedinih tehnologija, ograničenu

količinu podataka koja se smije poslati u određenom vremenskom intervalu. Navedene karakteristike čine LPWAN tehnologije osobito prikladnima za IoT primjene na otvorenim, prostorno rasprostranjenim područjima [66].

LoRaWAN je LPWAN protokol koji u Europi koristi nelicencirani ISM frekvencijski pojas na oko 868 MHz, pri čemu se fizički sloj komunikacije temelji na LoRa modulaciji. Njegove glavne prednosti uključuju velik komunikacijski domet i nisku potrošnju energije, uz relativno jednostavnu integraciju u IoT sustave. Međutim, korištenje nelicenciranoga spektra podrazumijeva dijeljenje pojasa s drugim sustavima, što može rezultirati interferencijama, sudarima paketa i strogim ograničenjima dopuštenoga vremena emitiranja (ograničenje radnoga ciklusa). Ključni parametri LoRa modulacije poput faktora širenja (SF), kodnog omjera (CR) i širine frekvencijskoga pojasa (125, 250 ili 500 kHz) — omogućuju preciznu prilagodbu odnosa između dometa i brzine prijenosa podataka. Korisna propusnost kreće se u rasponu od približno 0,3 do 50 kbit/s, što omogućuje prilagodbu specifičnim zahtjevima primjene, osobito u scenarijima koji zahtijevaju pouzdanu komunikaciju na velikim udaljenostima uz strogo ograničene energetske resurse.

U pogledu mrežne sigurnosti, LoRaWAN koristi enkripcijski standard AES-128 temeljen na jedinstvenom 128-bitnom ključu sesije koji se dijeli između krajnjeg uređaja i mrežnog poslužitelja. Time se osigurava autentičnost, integritet i povjerljivost podataka u prijenosu od uređaja do korisnika. Uključivanje krajnjih uređaja u mrežu moguće je ostvariti bežičnom aktivacijom (engl. *Over-The-Air Activation* – OTAA) ili aktivacijom putem personalizacije (engl. *Activation By Personalization* – ABP). Tijekom proizvodnje, u uređaje se ugrađuju jedinstveni identifikatori (*JoinEUI* i *DevEUI*) te osnovni 128-bitni AES ključevi (*AppKey* i *NwkKey*), iz kojih se naknadno generiraju ključevi sesije za enkripciju podataka. Dodatno, svakom se podatkovnom paketu pridodaje zaštitni kod za provjeru integriteta poruke (MIC, engl. *Message Integrity Code*), čime se učinkovito sprječava neovlaštena izmjena podataka tijekom bežičnoga prijenosa.

LoRaWAN uređaji projektirani su s ciljem postizanja visoke energetske učinkovitosti, što ih čini prikladnima za dugotrajan autonoman rad. Niska prijenosna snaga i uski frekvencijski pojas omogućuju vrlo malu potrošnju energije tijekom komunikacije, a ukupna potrošnja ovisi o vremenu provedenom u pojedinim radnim stanjima i odabranoj klasi uređaja. Rad uređaja dijeli se na tri osnovna stanja: odašiljanje podataka (Tx), prijam podataka (Rx) i stanje mirovanja. Stanje mirovanja dominantno je tijekom većine vremena i koristi se

radi minimizacije potrošnje. Prijelaz iz mirovanja u aktivno stanje uzrokuje znatan porast potrošnje energije, pri čemu je ona najveća tijekom odašiljanja i izravno ovisi o odabranoj prijenosnoj snazi.

LoRaWAN specifikacija definira tri klase uređaja: A, B i C. Sve klase podržavaju dvosmjernu komunikaciju (uzlaznu i silaznu, engl. *uplink* i *downlink*), ali se razlikuju u upravljanju prijamnim prozorima, latenciji i ukupnoj potrošnji energije.

**Uređaji klase A** iniciraju komunikaciju slanjem uzlazne poruke, nakon čega otvaraju dva vremenski strogo definirana prozora za prijam. Budući da većinu vremena provode u stanju mirovanja, ova klasa ostvaruje najmanju potrošnju energije. Međutim, to rezultira najvećim kašnjenjem (latencijom) za silaznu komunikaciju, stoga se klasa A najčešće primjenjuje u baterijski napajanim sustavima s rijetkim prijenosima podataka.

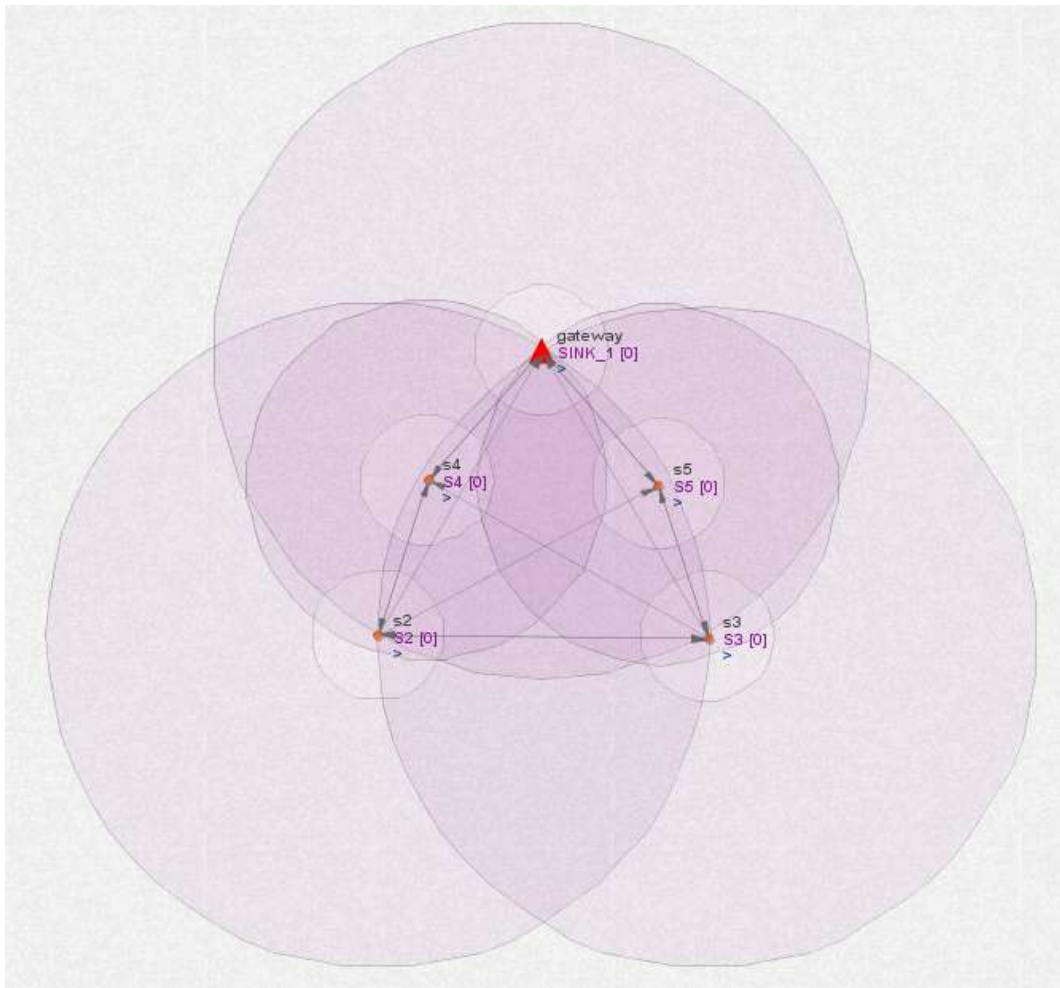
**Uređaji klase B** uvode dodatne periodičke prijamne prozore koji su sinkronizirani s mrežom putem sinkronizacijskih (engl. *beacon*) signala koje odašilje pristupnik. Time se smanjuje komunikacijska latencija, ali na štetu povećane potrošnje energije.

**Uređaji klase C** imaju gotovo kontinuirano otvorene prijamne prozore, osim tijekom odašiljanja podataka. Na taj se način postiže minimalna latencija, ali uz najveću potrošnju energije. Zbog toga se klasa C u pravilu primjenjuje isključivo u sustavima sa stalnim izvorom napajanja.

Uz odabranu klasu uređaja, na potrošnju energije izravno utječu i parametri modulacije poput faktora širenja (SF), kodni omjer (CR), širine frekvencijskoga pojasa i prijenosne snage. Optimizacija navedenih parametara ključna je za postizanje optimalne ravnoteže između dometa, pouzdanosti prijenosa i energetske učinkovitosti, što će biti detaljnije analizirano u nastavku.

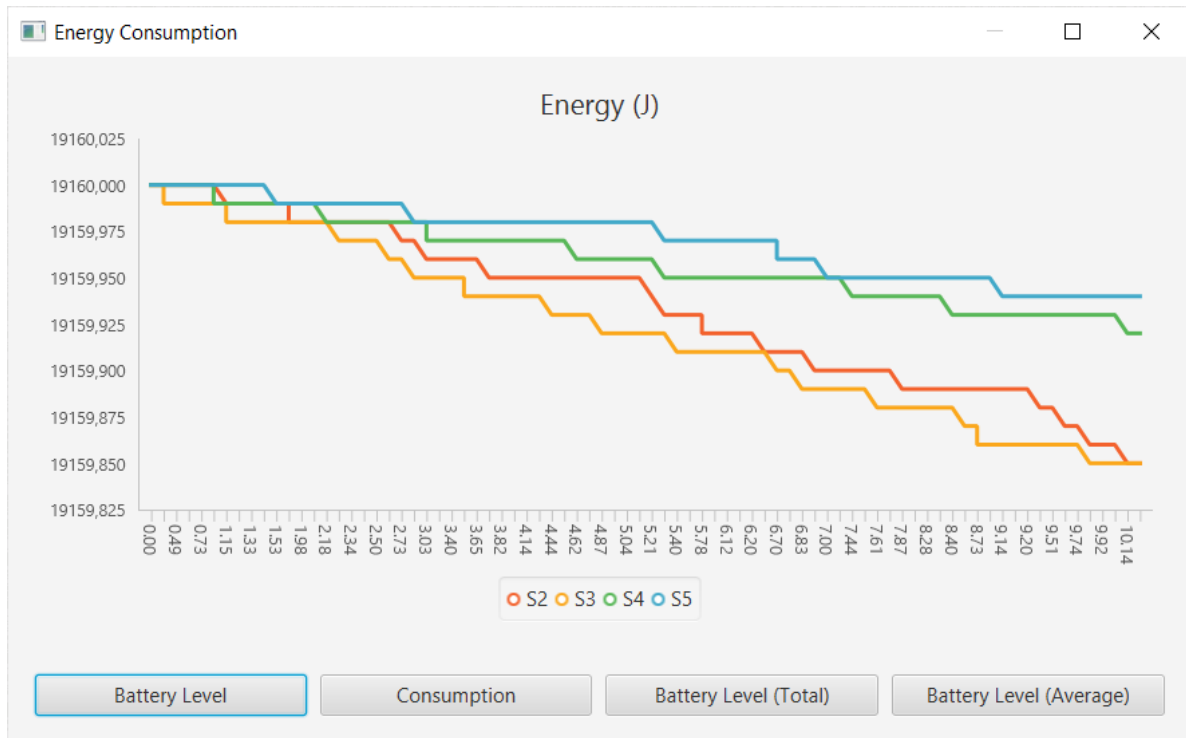
#### 4.2.1. Usporedba zvjezdaste i linijske topologije

Pri odabiru mrežne topologije razmotrene su zvjezdasta i linijska topologija s klasterima. U zvjezdastoj topologiji (slika 4.7) svi čvorovi izravno komuniciraju s pristupnikom, čime se pojednostavljuje arhitektura, ali se može povećati potrošnja energije udaljenih čvorova zbog veće prijenosne snage i duljeg vremena odašiljanja.



Slika 4.7: Prikaz razmještaja čvorova u zvjezdastoj topologiji

4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi



**Slika 4.8:** Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji

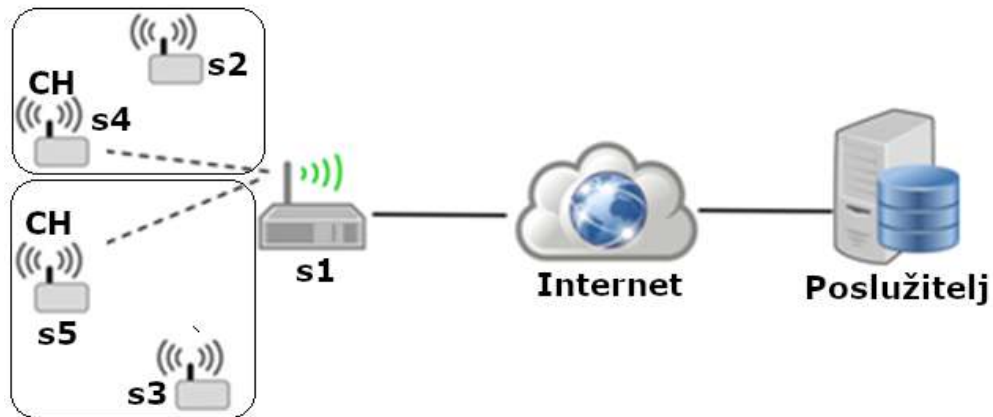
Iz prikaza potrošnje energije (slika 4.8) vidljivo je da čvorovi smješteni bliže pristupniku (s4 i s5) ostvaruju manju ukupnu potrošnju energije u odnosu na udaljenije čvorove (s2 i s3) jer udaljeniji čvorovi zahtijevaju veću prijenosnu snagu i dulje vrijeme odašiljanja. Pristupnik kontinuirano osluškuje dolazne podatke koje senzorski čvorovi odašilju u pseudo-slučajnim vremenskim trenucima uz definirano kašnjenje, što smanjuje vjerojatnost kolizija. Konfiguracija parametara prikazana je u tablici 4.3.

**Tablica 4.3:** Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova s2–s5 za zvjezdastu topologiju

| Pristupnik    | S2 i S3                | S4 i S5                |
|---------------|------------------------|------------------------|
| <i>loop</i>   | <i>randb</i> x 10 1000 | <i>atpl</i> 55         |
| <i>wait</i>   | <i>delay</i> \$x       | <i>randb</i> x 10 1000 |
| <i>read</i> x | <i>send</i> 1 1        | <i>delay</i> \$x       |
|               | <i>delay</i> 50        | <i>send</i> 1 1        |
|               |                        | <i>delay</i> 50        |

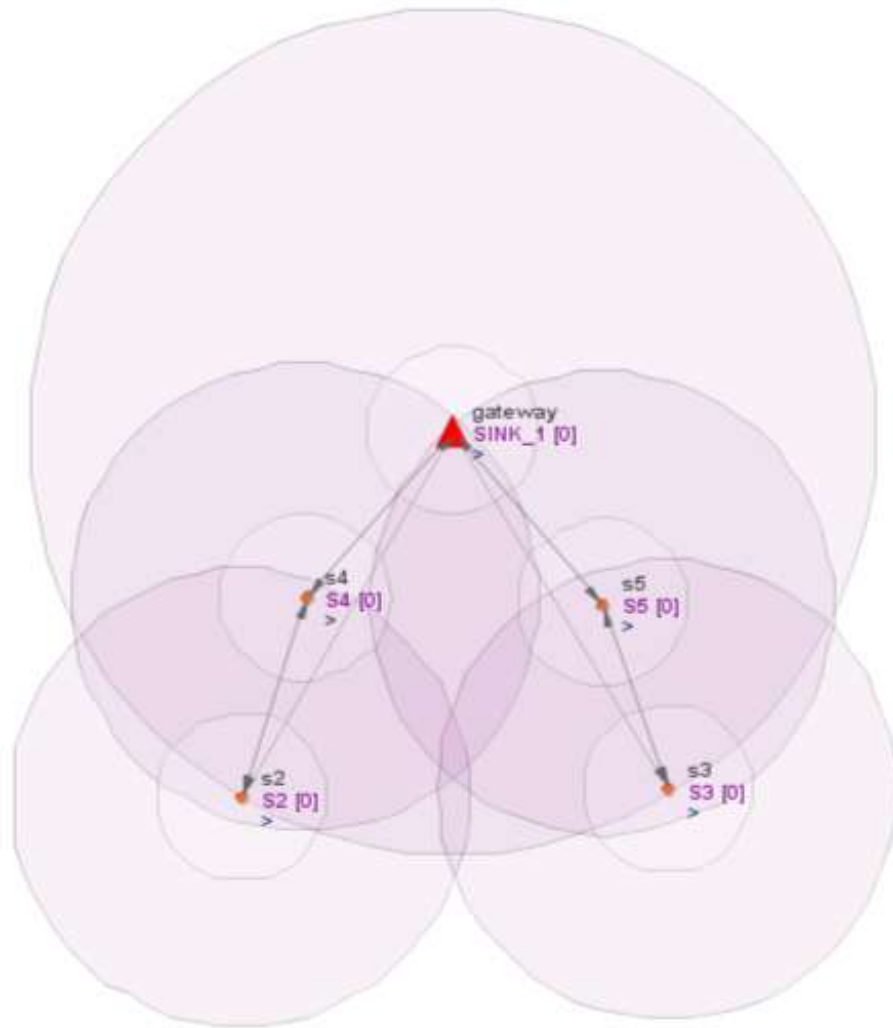
Alternativna topologija je linijska, u kojoj su čvorovi organizirani u klustere s nadređenim čvorom (CH, engl. *Cluster Head*) koji prikuplja i prosljeđuje podatke prema pristupniku. Razmotrene su dvije varijante u prvoj su CH čvorovi smješteni najbliže pristupniku, a u drugoj najdalje od njega.

**Linijaska topologija s CH čvorovima najbližima pristupniku.** U konfiguraciji prikazanoj na slici 4.9 čvorovi s2 i s4 te s3 i s5 mogu izravno razmjenjivati podatke. Ulogu CH čvorova preuzimaju s4 i s5 jer su najbliži pristupniku.



**Slika 4.9:** *Kombinacija linijskih mrežnih topologija sa CH čvorovima*

CH čvorovi prikupljaju i agregiraju podatke iz pripadajućih senzorskih sklopova te ih prosljeđuju pristupniku, čime se smanjuje potreba za izravnim prijenosima na velike udaljenosti i povećava energetska učinkovitost mreže. Na slici 4.10 prikazani su radijusi pokrivanja signalom za pojedine čvorove, prilagođeni komunikacijskim zahtjevima i međusobnim udaljenostima. Čvor s4 mora imati radijus dovoljan za stabilnu vezu s pristupnikom i za pouzdanu komunikaciju s čvorom s2, što vrijedi i za par s3–s5.



**Slika 4.10:** Prikaz razmještaja čvorova u linijskoj topologiji s CH čvorovima najbližima pristupniku

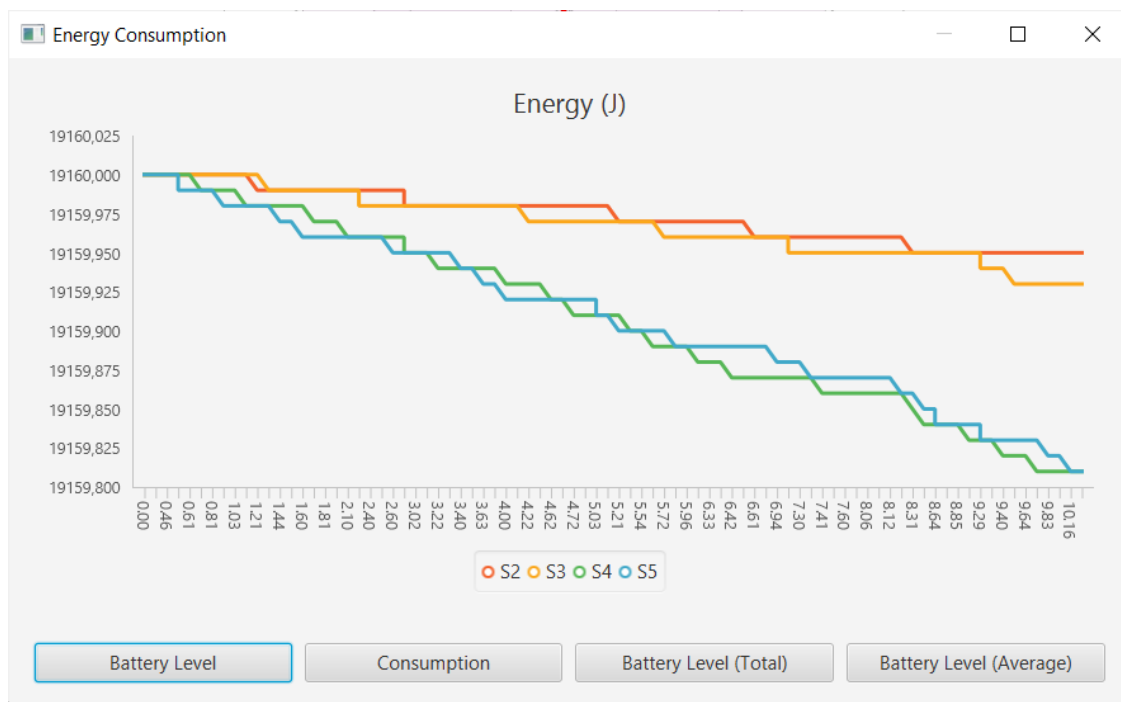
Iz konfiguracije parametara čvorova prikazane u tablici 4.4 vidljivo je da čvorovi s4 i s5 imaju približno jednak radijus pokrivanja, dovoljan za pouzdanu komunikaciju s pristupnikom, dok je radijus pokrivanja čvorova s2 i s3 prilagođen ostvarivanju veze s pripadajućim CH čvorovima.

4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

**Tablica 4.4:** Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova s2–s5 za linijsku topologiju s CH najbližima pristupniku

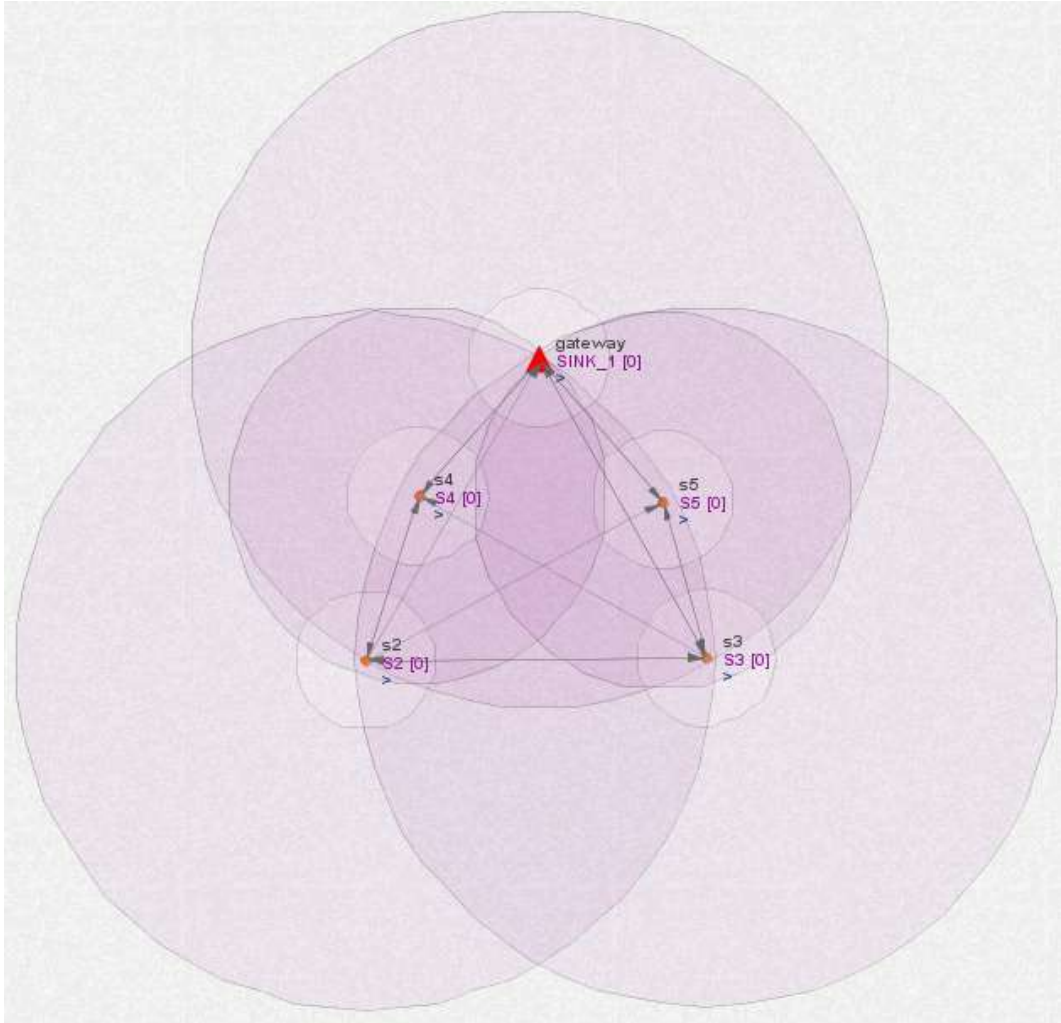
| Pristupnik | S2              | S3              | S4 i S5         |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| loop       | atpl 55         | atpl 55         | atpl 55         |
| wait       | randb x 10 1000 | randb x 10 1000 | randb x 10 1000 |
| read x     | delay \$x       | delay \$x       | delay \$x       |
|            | send 1 4        | send 1 5        | send 1 1        |
|            | delay 50        | delay 50        | delay 50        |
|            |                 |                 | send 1 1        |
|            |                 |                 | delay 50        |

Na slici 4.11 prikazana je potrošnja energije u toj konfiguraciji. CH čvorovi (s4 i s5) troše više energije od udaljenijih čvorova (s2 i s3), iako su bliže pristupniku, jer prosljeđuju i vlastite podatke i podatke pristigle iz pripadajućih čvorova.



**Slika 4.11:** Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju u LoRa mreži s linijskom topologijom i CH čvorovima najbližima pristupniku

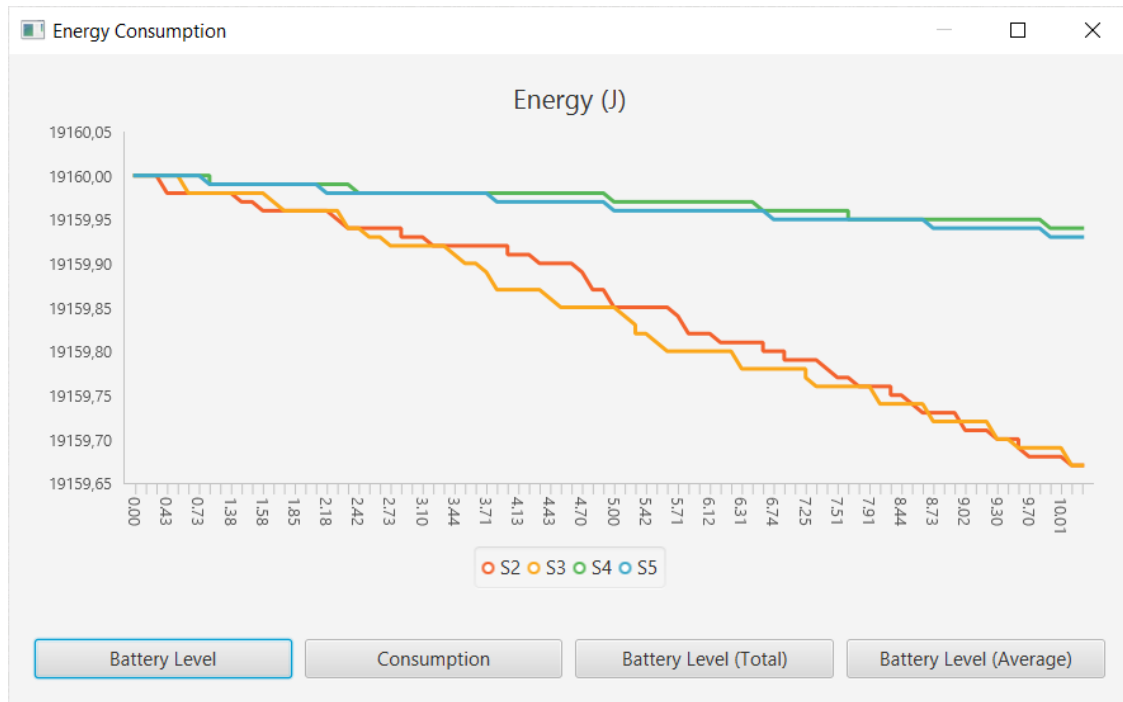
**Linijska topologija s CH čvorovima najudaljenijima od pristupnika.** U ovoj varijanti uloga CH čvorova dodijeljena je čvorovima s2 i s3, dakle čvorovima najudaljenijima od pristupnika. Čvor s4 zahtijeva manji radijus pokrivanja jer komunicira samo s čvorom s2, dok čvor s2, kao CH čvor, mora imati veći radijus zbog izravne veze s pristupnikom, analogno vrijedi za par s3–s5. Razmještaj čvorova prikazan je na slici 4.12.



**Slika 4.12:** Prikaz razmještaja čvorova u linijskoj topologiji s CH čvorovima najudaljenijima od pristupnika

Prema rezultatima potrošnje energije slika 4.13, CH čvorovi s2 i s3 ostvaruju veću potrošnju od čvorova s4 i s5 jer pored vlastitih podataka prosljeđuju i agregirane informacije pristupniku. Usporedba s prethodnom varijantom pokazuje da je potrošnja energije značajno veća kad su CH čvorovi udaljeni od pristupnika, čime se potvrđuje snažan utjecaj pozicije CH čvora na ukupnu energetska učinkovitost mreže. Konfiguracija parametara prikazana je u tablici 4.5, pri čemu parametri radijusa pokrivanja nisu specificirani za čvorove s2 i s3, koji koriste maksimalni domet prema osnovnoj postavci simulatora.

4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi



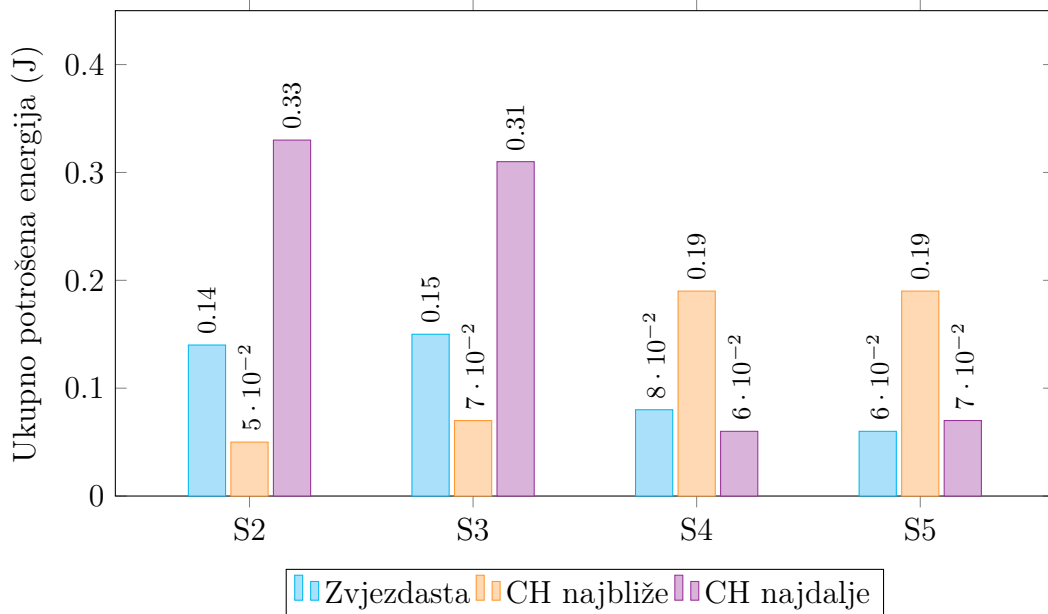
**Slika 4.13:** Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju u LoRa mreži s linijskom topologijom i CH čvorovima najudaljenijima od pristupnika

| Pristupnik | S2 i S3         | S4              | S5              |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| loop       | loop            | loop            | loop            |
| wait       | randb x 10 1000 | randb x 10 1000 | randb x 10 1000 |
| read x     | delay \$x       | delay \$x       | delay \$x       |
|            | send 1 1        | atpl 55         | atpl 55         |
|            | delay 50        | send 1 2        | send 1 3        |
|            | send 1 1        | delay 50        | delay 50        |
|            | delay 50        |                 |                 |

**Tablica 4.5:** Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova s2–s5 za linijsku topologiju s CH najudaljenijima od pristupnika

Iz prikazanih rezultata proizlazi da je za mreže u kojima su čvorovi znatno udaljeni od pristupnika zvjezdasta topologija prikladnija od linijske strukture s obzirom na ukupnu potrošnju energije. Stoga se u nastavku za daljnje analize koristi zvjezdasta topologija.

4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi



**Slika 4.14:** Usporedba ukupne potrošnje energije senzorskih sklopova (LoRaWAN) pri različitim mrežnim topologijama (trajanje simulacije 10 s)

**Tablica 4.6:** Procijenjeni vijek trajanja litijske ćelije (1800 mAh) uz slanje svake 15 min za različite topologije LoRaWAN mreže

| Čvor | Zvezdasta (godine) | CH najbliže (godine) | CH najdalje (godine) |
|------|--------------------|----------------------|----------------------|
| S2   | 9,0                | 9,8                  | 7,9                  |
| S3   | 9,0                | 9,6                  | 8,0                  |
| S4   | 9,6                | 8,7                  | 9,7                  |
| S5   | 9,7                | 8,7                  | 9,6                  |

Grafički prikaz na Slici 4.14 te pripadajuća procjena trajanja baterije u Tablici 4.6 zorno prikazuju snažan utjecaj mrežne topologije i pozicioniranja čvorova za prikupljanje podataka CH na ukupnu energetska učinkovitost sustava.

U standardnoj zvjezdastoj topologiji, čvorovi komuniciraju izravno s pristupnikom, pri čemu udaljeniji čvorovi očekivano troše nešto više energije zbog potrebe za većom snagom odašiljanja. Međutim, prelaskom na linijsku topologiju uočavaju se drastične razlike. Kada su CH čvorovi smješteni najbliže pristupniku (čvorovi S4 i S5), oni preuzimaju zadaću prikupljanja i prosljeđivanja podataka od udaljenijih čvorova (S2 i S3). Udaljeni čvorovi u ovom scenariju troše minimalno energije ostvarujući autonomiju i do 9,8 godina jer podatke šalju samo do obližnjeg CH čvora, dok CH čvorovi bilježe povećanu potrošnju i kraći radni vijek.

S druge strane, scenarij u kojem su CH čvorovi smješteni najdalje od pristupnika (čvorovi S2 i S3) pokazuje se kao izrazito neefikasan. U tom slučaju, najudaljeniji čvorovi ne samo da

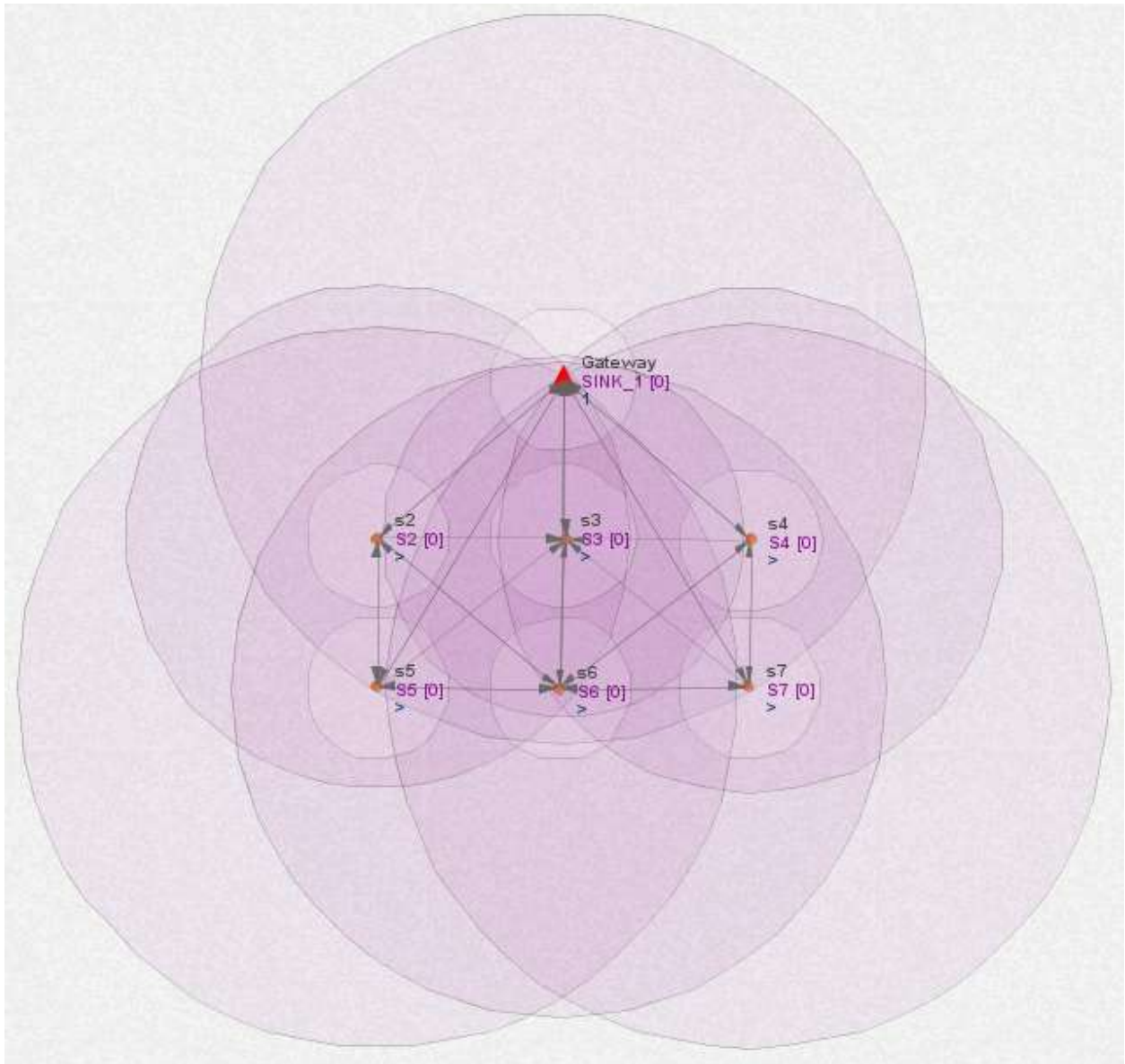
*4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi*

---

prikupljaju podatke od drugih, već ih moraju i prenositi na veliku udaljenost do pristupnika. Zbog tog dvostrukog opterećenja, njihova potrošnja energije eksponencijalno raste (do 0,33 J u simulaciji), što rezultira predviđenim vijekom trajanja baterije od 7,9 godina. Ovi rezultati nedvosmisleno potvrđuju da je u hijerarhijskim senzorskim mrežama ključno CH uloge dodijeliti onim čvorovima koji imaju najmanju zračnu udaljenost prema pristupniku.

#### 4.2.2. Utjecaj količine prometa na potrošnju energije

Sljedeći su primjeri kreirani radi analize utjecaja količine proslijeđenog mrežnog prometa na potrošnju energije u mreži. Uspostavljena je topologija prikazana na slici 4.15, s čvorovima s2 do s7 i pristupnikom. Najmanji radijus pokrivanja ima čvor najbliži pristupniku (s3), a najveći najudaljeniji čvorovi (s5 i s7).



Slika 4.15: Prikaz razmještaja čvorova u mreži za analizu utjecaja prometa

**Jednaka količina prometa.** Pristupnik prima podatke sa senzorskih sklopova s2 do s7, čita ih i prikazuje. Najveći radijus za slanje koriste čvorovi s5 i s7, što se vidi po izostavljenom parametru radijusa pokrivanja, čime se podrazumijeva primjena cjelokupnoga raspoloživog radijusa. Parametar *atpl* je naveden u tablici 4.7 za čvorove s2, s3, s4 i s6, pri čemu najmanji

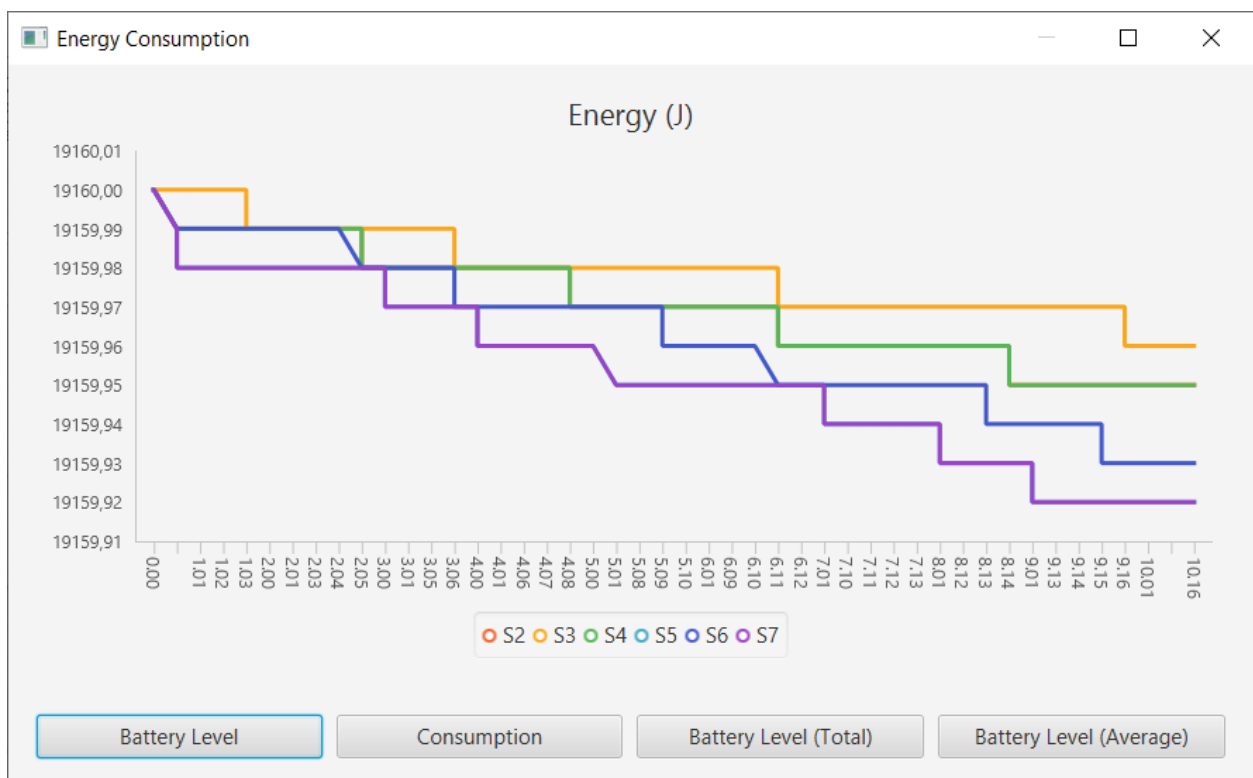
4. *Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi*

radijus koristi čvor s3 (50 % najvećeg mogućeg radijusa). Podaci se šalju kontinuirano uz vremensku zadržku između pojedinih paketa.

**Tablica 4.7:** *Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova za jednaku količinu prometa*

| Pristupnik | S2 i S4    | S3         | S5 i S7    | S6         |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| loop       | loop       | loop       | loop       | loop       |
| wait       | atpl 70    | atpl 50    | send 1 1   | atpl 90    |
| read x     | send 1 1   | send 1 1   | delay 1000 | send 1 1   |
| print \$x  | delay 1000 | delay 1000 |            | delay 1000 |

Slika 4.16 prikazuje potrošnju energije pri zvjezdastoj topologiji uz jednaku količinu poslanih podataka. Budući da su senzorski sklopovi s2 i s4, kao i čvorovi s5 i s7, jednako konfigurirani i nalaze se na istoj udaljenosti od pristupnika, oni troše identičnu količinu energije. Zbog toga se njihove krivulje potrošnje na grafu potpuno preklapaju, pa vizuelno može izgledati kao da dva čvora na grafiku nedostaju. Najmanje energije za slanje troši čvor najbliži pristupniku (s3), a najviše najudaljeniji čvorovi (s5 i s7).



**Slika 4.16:** *Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji uz jednaku količinu podataka s jednako udaljenih čvorova*

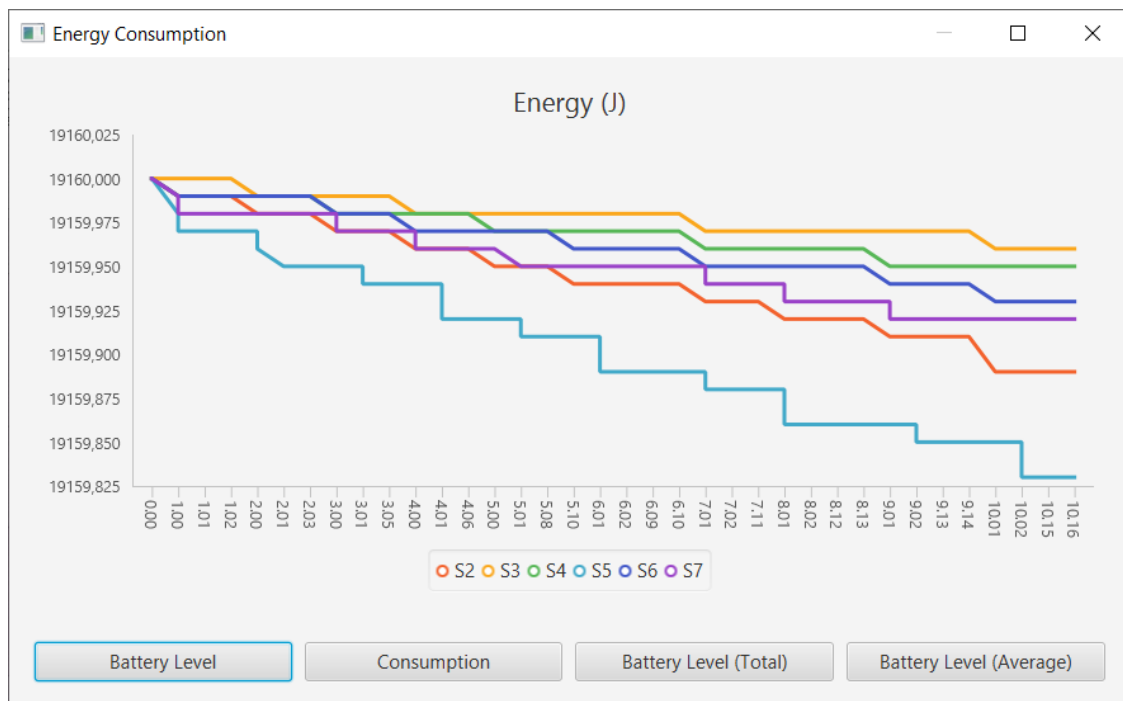
4. *Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi*

**Različita količina prometa.** Konfiguracija u tablici 4.8 istovjetna je prethodnoj, uz razliku što se s nekih čvorova podaci šalju češće. Unatoč jednakoj udaljenosti čvorova s2 i s4 od pristupnika, veća se količina podataka šalje s čvora s2, a isto vrijedi za par s5 i s7, pri čemu s5 šalje češće od s7.

**Tablica 4.8:** Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova za različitu količinu prometa

| Pristupnik | S2                     | S3         | S4         | S5         | S6         | S7         |
|------------|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| loop       | loop                   | loop       | loop       | loop       | loop       | loop       |
| wait       | atpl 70                | atpl 50    | atpl 70    | send 1 1   | atpl 90    | send 1 1   |
| read x     | send 1 1               | send 1 1   | send 1 1   | send 1 1   | send 1 1   | delay 1000 |
| print \$x  | send 1 1<br>delay 1000 | delay 1000 | delay 1000 | delay 1000 | delay 1000 |            |

Slika 4.17 prikazuje potrošnju energije u zvjezdastoj topologiji uz slanje različitih količina podataka. Za razliku od prethodnog scenarija, s jednako udaljenih parova čvorova (s2 i s4 te s5 i s7) sada se ne šalje ista količina podataka. Zbog toga se njihove krivulje potrošnje više ne preklapaju, te je na grafu jasno vidljiva zasebna linija za svaki pojedini čvor. Najmanje energije troši čvor najbliži pristupniku (s3), dok najviše energije troši najudaljeniji čvor (s5), koji ujedno šalje i više podataka od njemu jednako udaljenog čvora s7.



**Slika 4.17:** Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji uz različitu količinu podataka s jednako udaljenih čvorova

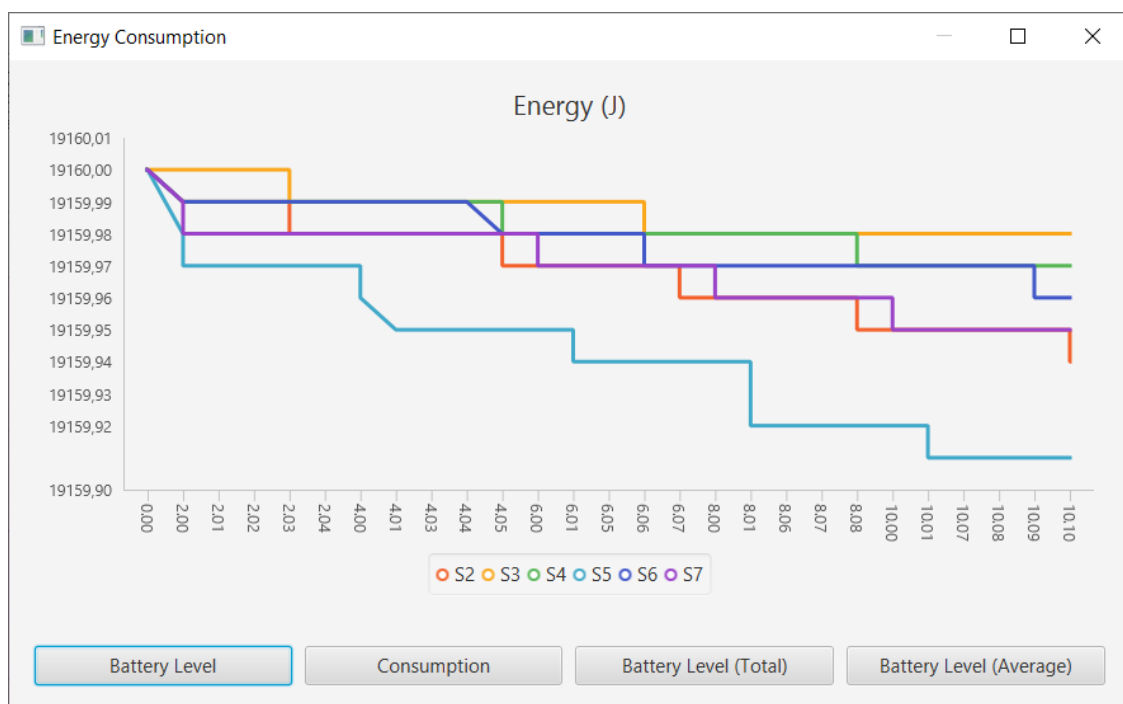
4. *Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi*

**Rjeđe slanje podataka.** U konfiguraciji u tablici 4.9 podaci se s čvorova šalju rjeđe, što je vidljivo iz veće vrijednosti vremenske zadržke između pojedinih prijenosa.

**Tablica 4.9:** Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova za rjeđe slanje paketa

| Pristupnik | S2                     | S3         | S4         | S5         | S6         | S7         |
|------------|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| loop       | loop                   | loop       | loop       | loop       | loop       | loop       |
| wait       | atpl 70                | atpl 50    | atpl 70    | send 1 1   | atpl 90    | send 1 1   |
| read x     | send 1 1               | send 1 1   | send 1 1   | send 1 1   | send 1 1   | delay 2000 |
| print \$x  | send 1 1<br>delay 2000 | delay 2000 | delay 2000 | delay 2000 | delay 2000 |            |

Iz usporedbe rezultata na slici 4.18 s prethodnim primjerima vidljivo je da se pri rjeđem slanju podataka unutar istog vremenskog intervala troši manja količina energije. LoRa tehnologija ima karakteristike pogodne za bežične senzorske mreže u kojima je potrebno osigurati sigurnu i pouzdanu komunikaciju velikog dometa uz minimalnu potrošnju energije, a zahtjevi za brzinom prijenosa i količinom prenesenih podataka razmjerno su mali. Dodatna se ušteda energije može postići duljim vremenskim razmacima između pojedinih prijenosa.

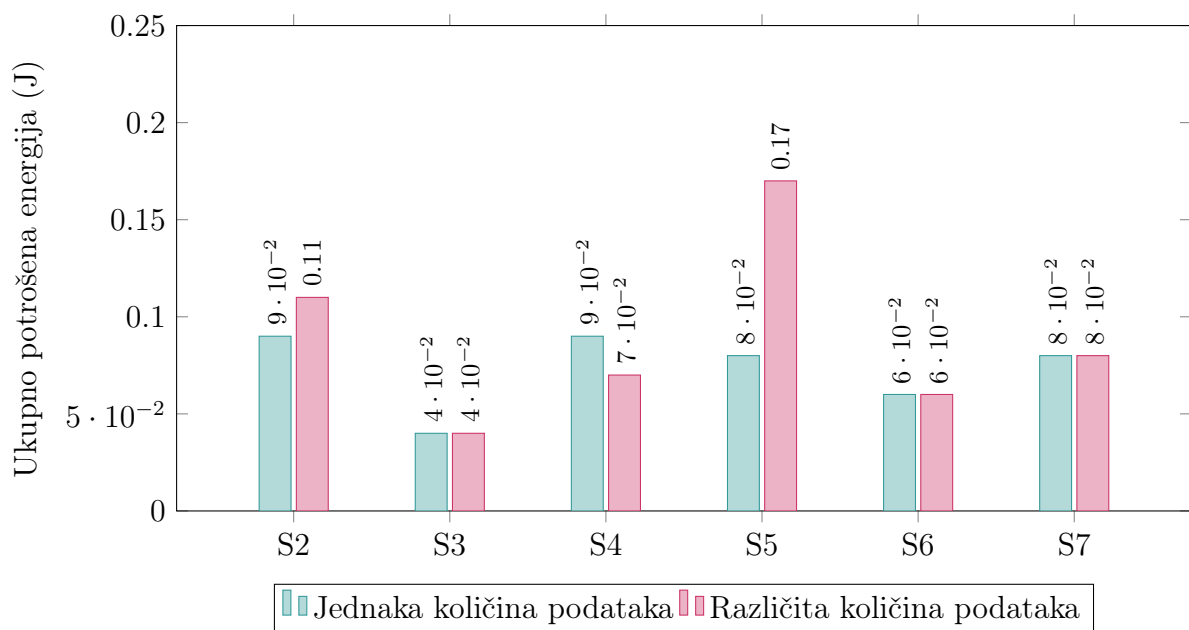


**Slika 4.18:** Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena [s] pri korištenju LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji uz rjeđe slanje podataka

4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

**Tablica 4.10:** Primjer konfiguracije parametara pristupnika i čvorova S2–S5 u CupCarbon simulatoru

| Pristupnik | S2 i S3              | S4 i S5                           |
|------------|----------------------|-----------------------------------|
| loop       | randb x 10 1000      | atpl 55                           |
| wait       | delay \$x            | randb x 10 1000                   |
| read x     | send 1 1<br>delay 50 | delay \$x<br>send 1 1<br>delay 50 |



**Slika 4.19:** Usporedba ukupne potrošnje energije senzorskih čvorova pri slanju jednake i različite količine podataka

**Tablica 4.11:** Procijenjeni vijek trajanja litijske ćelije (1800 mAh) uz slanje svake 15 min pri različitim količinama mrežnog prometa

| Čvor | Jednaka količina prometa (godine) | Različita količina prometa (godine) |
|------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| S2   | 9,5                               | 9,3                                 |
| S3   | 10,1                              | 10,1                                |
| S4   | 9,5                               | 9,8                                 |
| S5   | 9,6                               | 8,6                                 |
| S6   | 9,9                               | 9,9                                 |
| S7   | 9,6                               | 9,6                                 |

Posljednja faza simulacijske analize, prikazana na Slici 4.19 i unutar Tablice 4.11, fokusira se na utjecaj volumena mrežnog prometa na energetske bilancu pojedinih čvorova unutar zvjezdaste topologije.

U referentnom scenariju, gdje upareni čvorovi na jednakoj udaljenosti od pristupnika (parovi S2/S4 te S5/S7) šalju identičnu količinu podataka, njihova je energetska potrošnja simetrična, što rezultira podjednako dugim procijenjenim vijekom trajanja baterije od približno 9,5 godina. Međutim, uvođenjem asimetričnog prometa u mrežu, energetska se slika značajno mijenja. Najočitiiji je primjer čvora S5, kojemu je u drugom scenariju znatno povećana količina poslanih podataka. Zbog produljenog vremena aktivnog prijenosa, njegova ukupna potrošnja u simulaciji raste na 0,17 J, čime se predviđena autonomija njegove baterije drastično smanjuje s 9,6 na 8,6 godina u usporedbi sa susjednim čvorom S7.

Nasuprot tome, čvorovi S3 i S6, čiji su parametri slanja ostali nepromijenjeni u oba scenarija, zadržavaju stabilnu i konstantnu potrošnju. Ovi rezultati jasno indiciraju da u heterogenim senzorskim mrežama (gdje različiti senzori uzorkuju podatke različitom frekvencijom), projektant sustava mora dimenzionirati kapacitet baterije prema onom čvoru koji generira najintenzivniji mrežni promet, a ne prema prosječnoj potrošnji cijele mreže.

Na temelju provedenih simulacijskih analiza i procijenjenih energetske profila, može se izvesti jasan zaključak o optimalnoj arhitekturi predloženoga bežičnog senzorskog sustava. Iako je analiza komunikacijskih tehnologija pokazala da ZigBee protokol nominalno troši najmanje energije, njegova je primjena u udaljenim poljoprivrednim područjima nepraktična zbog izrazito ograničenoga komunikacijskog dometa. S druge strane, Wi-Fi tehnologija pokazala se potpuno neadekvatnom za autonomne sustave zbog goleme potrošnje koja drastično skraćuje vijek trajanja baterije. Stoga se LoRaWAN tehnologija nameće kao najučinkovitije rješenje, jer jedina pruža optimalan kompromis između visoke energetske učinkovitosti i sposobnosti pouzdanoga prijenosa podataka na velike udaljenosti.

Kada je riječ o mrežnoj arhitekturi, rezultati nedvosmisleno potvrđuju superiornost zvjezdaste topologije u kontekstu dugoročne energetske održivosti i pouzdanosti sustava. Za razliku od složenijih hijerarhijskih i linijskih topologija, gdje CH čvorovi postaju energetska uska grla čiji bi prijevremeni otkaz uzrokovao ispad čitavih segmenata mreže, zvjezdasta topologija omogućuje izravnu komunikaciju svakog senzora s pristupnikom. Ovakav pristup eliminira potrebu za dvostrukim usmjeravanjem prometa, osigurava ravnomjernije trošenje baterija na razini cijele mreže i sprječava kaskadne ispaide. Dodatno, analiza utjecaja količine prometa dokazala je da zvjezdasta topologija izolira povećanu potrošnju isključivo na one čvorove koji generiraju više podataka, nimalo ne ugrožavajući stabilnost i autonomiju susjednih uređaja.

#### *4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi*

---

Sintezom svih dobivenih rezultata, odabir LoRaWAN komunikacijskog protokola u kombinaciji sa zvjezdastom mrežnom topologijom predstavlja energetske najučinkovitiji izbor. Ovakva konfiguracija, napajana adekvatnim litijskim ćelijama, jamči visoku razinu robusnosti te osigurava stabilan i potpuno autonoman rad senzorske mreže u višegodišnjem mjerenju.

### 4.2.3. Utjecaj radijskih parametara

Bežična senzorska mreža na terenu ima za cilj povezati senzorske čvorove smještene na različitim udaljenim lokacijama s poslužiteljima za pohranu i obradu podataka, i to na pouzdan i energetski učinkovit način. Domet komunikacije na poljima i otvorenim prostorima jedan je od najvažnijih parametara, pri čemu visoka brzina prijenosa nije od presudne važnosti. Radijski parametri faktor širenja i brzina kodiranja izravno utječu na energetsku učinkovitost i domet prijenosa.

Faktor širenja (engl. *Spreading Factor*, SF) predstavlja broj žetona po simbolu, a njegova vrijednost je cijeli broj u rasponu

$$SF \in \{6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}. \quad (4-1)$$

Broj žetona po simbolu raste eksponencijalno s vrijednošću SF-a prema izrazu

$$N_{\text{chip}} = 2^{SF}, \quad (4-2)$$

pa za  $SF = 6$  jedan simbol sadrži  $2^6 = 64$  žetona, a za  $SF = 12$  čak  $2^{12} = 4096$  žetona. Pri višim vrijednostima SF-a prijemnik ima veću sposobnost smanjivanja utjecaja šuma na signal, veća vrijednost SF-a znači dulje vrijeme potrebno za slanje paketa, ali i veći domet zahvaljujući boljoj osjetljivosti prijemnika. Tako se za  $SF = 6$  postiže najveća brzina prijenosa, ali uz smanjeni domet. Trajanje jednog simbola ovisi o faktoru širenja i o širini pojasa  $BW$  prema izrazu

$$T_{\text{sym}} = \frac{2^{SF}}{BW}, \quad (4-3)$$

iz čega je vidljivo da udvostručenje broja žetona (odnosno povećanje faktora širenja SF za jedan) udvostručuje vrijeme trajanja simbola, što izravno utječe na potrošnju energije čvora.

Izraz za kodni omjer (CR) glasi

$$CR = \frac{4}{4+n}, \quad n \in \{1, 2, 3, 4\}, \quad (4-4)$$

što znači da su svaka četiri korisna bita kodirana s pet, šest, sedam ili osam prijenosnih bitova. Moguće su sljedeće četiri brzine kodiranja:

$$CR_1 = \frac{4}{5} = 0,80, \quad CR_2 = \frac{4}{6} \approx 0,67, \quad CR_3 = \frac{4}{7} \approx 0,57, \quad CR_4 = \frac{4}{8} = 0,50. \quad (4-5)$$

Što je brzina kodiranja niža, to je veći broj redundantnih bitova, čime se povećava otpornost na pogreške, ali se produljuje vrijeme odašiljanja i povećava potrošnja baterije. Efektivna brzina prijenosa podataka  $R_b$  kombinira oba parametra:

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR. \quad (4-6)$$

Ukupno vrijeme potrebno za odašiljanje jednog LoRa paketa komunikacijskim kanalom (engl. *Time on Air*, ToA) zbroj je trajanja preambule i korisnoga dijela:

$$T_{\text{ToA}} = T_{\text{preamble}} + T_{\text{payload}}, \quad (4-7)$$

gdje je  $T_{\text{preamble}} = (n_{\text{pre}} + 4,25) \cdot T_{\text{sym}}$  (tipično  $n_{\text{pre}} = 8$ ), a  $T_{\text{payload}} = n_{\text{payload}} \cdot T_{\text{sym}}$ , pri čemu se broj simbola korisnog dijela računa kao

$$n_{\text{payload}} = 8 + \max\left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2DE)} \right\rceil \cdot (CR + 4), 0\right). \quad (4-8)$$

Veličine  $PL$ ,  $CRC \in \{0, 1\}$ ,  $H \in \{0, 1\}$  i  $DE \in \{0, 1\}$  označavaju veličinu korisnog sadržaja u bajtovima, prisutnost kontrolne sume, prisutnost zaglavlja te uključenost optimizacije za niske brzine odašiljanja. Izraz za ToA pokazuje da veći  $SF$  i niža brzina kodiranja povlače dulje zadržavanje odašiljača u aktivnom stanju, a time i veću potrošnju energije po prenesenom paketu.

U nastavku se analizira utjecaj različitih vrijednosti  $SF$  i  $CR$  na utrošenu energiju i domet. Pri visokim vrijednostima  $SF$ -a vrijeme odašiljanja, a time i potrošnja energije, raste. Unatoč tome, faktor širenja se može postaviti na najveću vrijednost  $SF = 12$  kako bi se maksimizirao domet, što je jedan od najvažnijih čimbenika pri implementaciji senzorske mreže na terenu. Konfiguracija parametara prikazana je u tablicama 4.12 i 4.13.

4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

**Tablica 4.12:** Konfiguracija parametara za  $SF = 7$  i  $CR = 4/8$

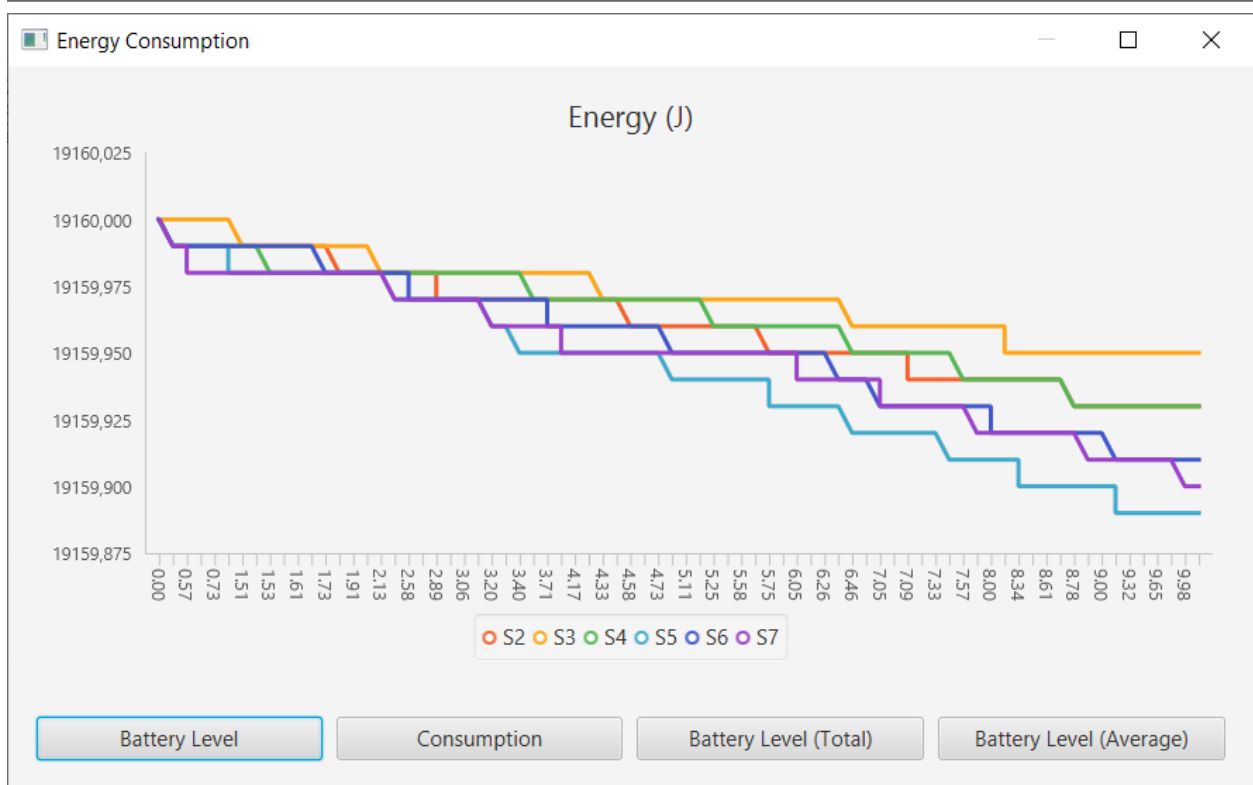
| Pristupnik | S2 i S4         | S3              | S5 i S7         | S6              |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| loop       | loop            | loop            | loop            | loop            |
| wait       | atpl 70         | atpl 50         | send 1 1 7 8    | atpl 90         |
| read x     | send 1 1 7 8    | send 1 1 7 8    | randb x 10 1000 | send 1 1 7 8    |
|            | randb x 10 1000 | randb x 10 1000 | delay \$x       | randb x 10 1000 |
|            | delay \$x       | delay \$x       | send 1 1 7 8    | delay \$x       |
|            | send 1 1 7 8    | send 1 1 7 8    | delay 1000      | send 1 1 7 8    |
|            | delay 1000      | delay 1000      |                 | delay 1000      |

**Tablica 4.13:** Konfiguracija parametara za  $SF = 12$  i  $CR = 4/5$

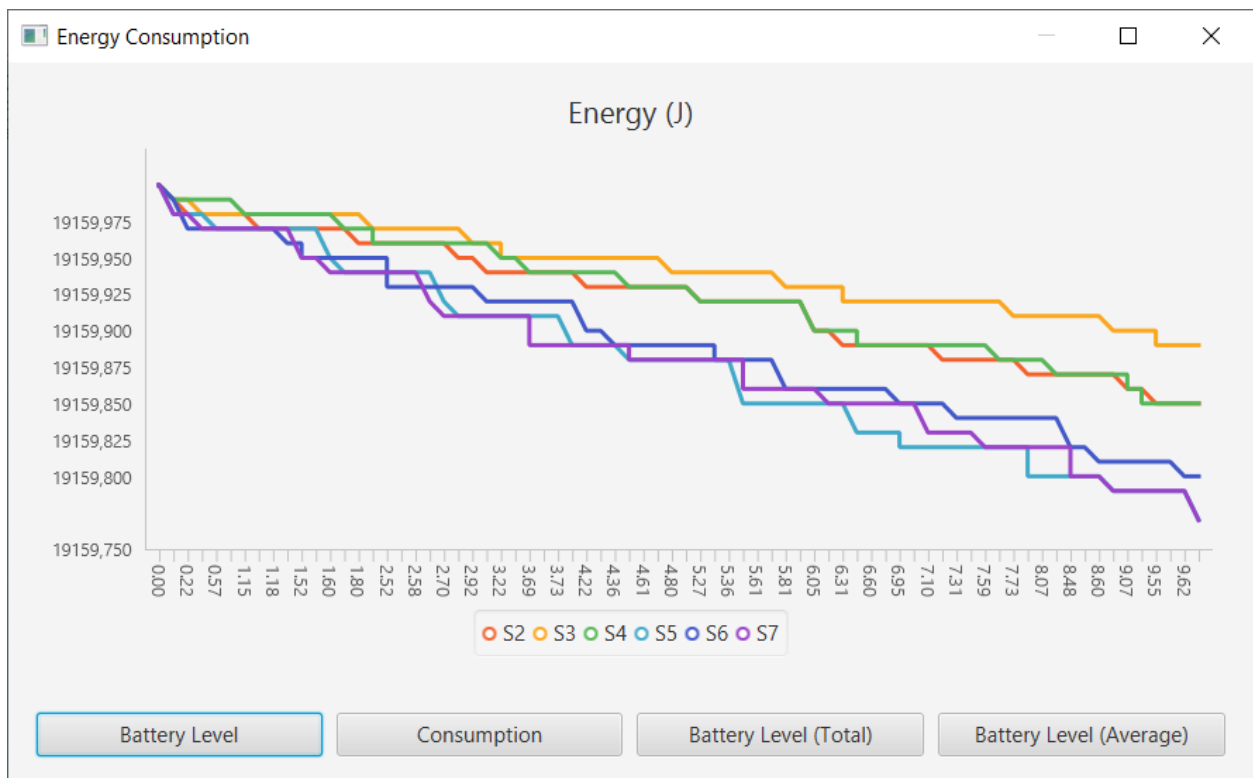
| Pristupnik | S2 i S4         | S3              | S5 i S7         | S6              |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| loop       | loop            | loop            | loop            | loop            |
| wait       | atpl 70         | atpl 50         | send 1 1 12 5   | atpl 90         |
| read x     | send 1 1 12 5   | send 1 1 12 5   | randb x 10 1000 | send 1 1 12 5   |
|            | randb x 10 1000 | randb x 10 1000 | delay \$x       | randb x 10 1000 |
|            | delay \$x       | delay \$x       | send 1 1 12 5   | delay \$x       |
|            | send 1 1 12 5   | send 1 1 12 5   | delay 1000      | send 1 1 12 5   |
|            | delay 1000      | delay 1000      |                 | delay 1000      |

Povećanjem brzine kodiranja smanjuju se vrijeme odašiljanja i potrošnja energije, pa se potrošnja može regulirati CR faktorom, kao što je prikazano na slikama 4.20 i 4.21. Uz zadržavanje istog SF-a, povećanjem vrijednosti CR-a s 4/8 na 4/5 potrošnja se energije dodatno smanjuje.

4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi



Slika 4.20: Potrošnja energije pri primjeni LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji uz  $SF = 7$  i  $CR = 4/8$



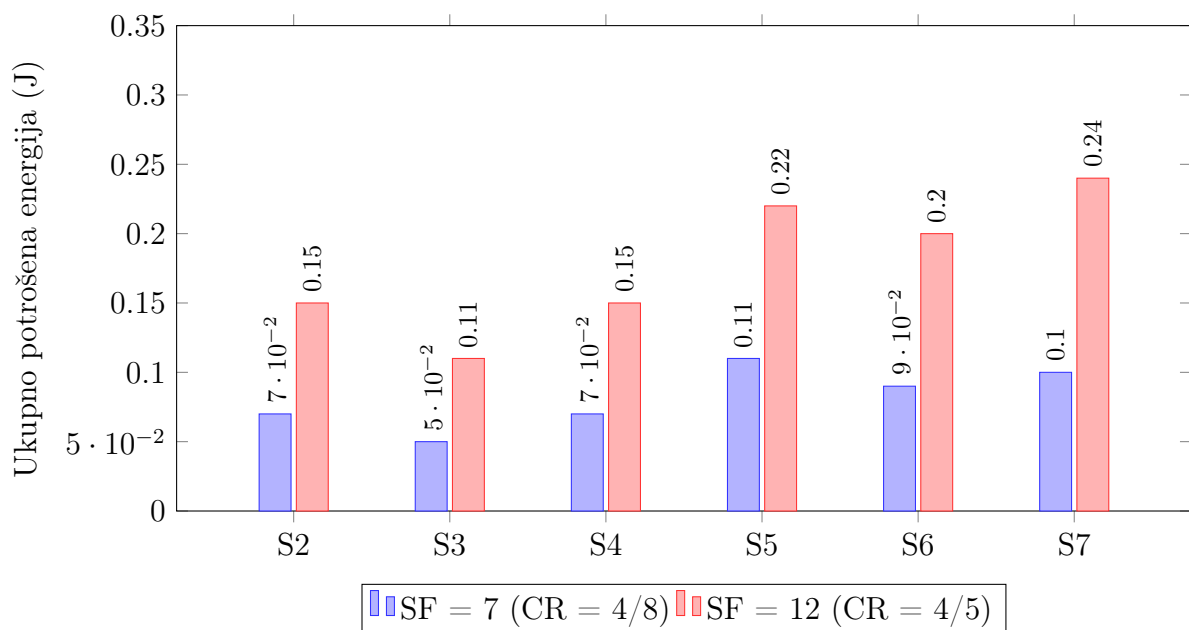
Slika 4.21: Potrošnja energije pri primjeni LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji uz  $SF = 12$  i  $CR = 4/5$

#### 4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

Posljednji set simulacija, čiji su rezultati vizualizirani na Slici 4.22 i u Tablici 4.14, posvećen je analizi utjecaja ključnih parametara LoRa modulacije faktora širenja (SF) i kodnog omjera (CR) na ukupnu potrošnju energije.

Usporedbom dvaju graničnih scenarija (najbržeg SF = 7 naspram najsporijeg i najotpornijeg SF = 12), uočava se drastičan skok u energetske zahtjevima mreže. Primjerice, čvor S7 pri korištenju SF = 7 troši svega 0,10 J po simulacijskom ciklusu, osiguravajući visoku predviđenu autonomiju od 9,4 godine. Međutim, prebacivanjem na postavku SF = 12, njegova se potrošnja više nego udvostručuje (0,24 J), čime se radni vijek baterije skraćuje na 7,9 godina.

Ovi su rezultati u potpunosti u skladu s teorijskim postavkama LoRa modulacije. Povećanje faktora širenja (SF) značajno produljuje vrijeme potrebno za prijenos pojedinog simbola zrakom (engl. *Time on Air*), zbog čega radiomodul senzorskog sklopa znatno dulje ostaje u energetske zahtjevnom stanju odašiljanja (Tx). Iako SF = 12 pruža maksimalnu otpornost na smetnje i najveći komunikacijski domet, ova simulacija dokazuje neophodnost korištenja ADR (engl. *Adaptive Data Rate*) mehanizma. Dinamičkom dodjelom manjih SF vrijednosti čvorovima koji su smješteni bliže pristupniku, mreža može ostvariti goleme uštede u potrošnji energije te značajno produljiti radni vijek cjelokupnog sustava.



**Slika 4.22:** Usporedba ukupne potrošnje energije senzorskih sklopova pri različitim postavkama faktora širenja (SF) i kodnog omjera (CR) u zvjezdastoj topologiji

#### 4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

**Tablica 4.14:** Procijenjeni vijek trajanja litijske ćelije (1800 mAh) uz slanje svake 15 min pri različitim parametrima LoRa modulacije

| Čvor | SF = 7, CR = 4/8 (godine) | SF = 12, CR = 4/5 (godine) |
|------|---------------------------|----------------------------|
| S2   | 9,7                       | 8,9                        |
| S3   | 10,0                      | 9,3                        |
| S4   | 9,7                       | 8,9                        |
| S5   | 9,3                       | 8,1                        |
| S6   | 9,5                       | 8,3                        |
| S7   | 9,4                       | 7,9                        |

### 4.3. Mjerenje komunikacijskog dometa i prigušenja signala na realnom kanalu

Kada se bežične senzorske mreže primjenjuju u poljoprivredi, moraju raditi u različitim klimatskim uvjetima i okruženjima poput različitih vrsta tla, staklenika, voćnjaka i farmi. Takva okruženja utječu na proces širenja radijskoga signala, a prijenos podataka sa senzorskih sklopova često zahtijeva prolazak signala preko gustih usjeva, gdje se ne može osigurati čist komunikacijski kanal. Stoga pri postavljanju bežičnih senzorskih mreža treba posvetiti posebnu pozornost jamčenju kvalitete komunikacijske veze.

Rane studije o energetski učinkovitom prijenosu podataka u sustavima za praćenje poljoprivrednih područja sežu do rada [67], u kojem je utvrđeno da efektivna komunikacijska udaljenost između čvorova u otvorenom okruženju iznosi više od 200 m, uz prosječnu stopu gubitka paketa od 7,6 %. U radu [68] težište je istraživanja stavljeno na pokrivenost LoRa signalom, rezultati pokazuju da unutar dva kilometra od bazne stanice signal uglavnom prelazi  $-100$  dBm, no i u tim je slučajevima izgubljeno 12 % poslanih paketa, u rasponu od dva do pet kilometara gubitak ne prelazi 15 %, na udaljenostima od pet do deset kilometara izgubljena je oko trećina paketa, a na deset do petnaest kilometara čak 74 %. Iako je manji broj paketa primljen i s udaljenosti većih od petnaest kilometara, komunikacija je na takvim udaljenostima vrlo izazovna.

Primjena bežičnih senzorskih mreža u preciznoj poljoprivredi, kako u ruralnim područjima na poljoprivrednim zemljištima tako i u prigradskim i urbanim područjima u vrtovima, donijela je potrebu za komunikacijom u raznolikim okruženjima. Iako LoRaWAN može pokriti velika područja, prepreke na terenu utječu na kvalitetu veze, pa širenje radijskoga signala može biti izrazito nestabilno u ruralnim i urbanim scenarijima bez izravne optičke vidljivosti.

Unatoč razlikama, obje se okoline suočavaju sa sličnim problemima elektromagnetskoga širenja signala [69]. U ruralnim sredinama slabljenje signala najčešće nastaje uslijed refleksije od vegetacije i promjenjivih klimatskih uvjeta, dok u urbanim područjima dominiraju refleksije radijskih valova od zgrada i drugih infrastrukturnih prepreka. Primjena LoRaWAN tehnologije pri utvrđivanju geolokacije proučavana je u radovima [70, 71]. U radu [72] analizira se učinak LoRaWAN tehnologije u kontinentalnim šumskim i planinskim okruženjima, pokazalo se da vegetacija i visoke temperature smanjuju domet komunikacije te da izbor antene bitno utječe na kvalitetu signala. U radu [69] udaljenost je od 250 m odabrana kao optimalna jer je to bio najveći ostvarivi domet u okruženju s gustom šumskom vegetacijom.

Korištenje LoRaWAN tehnologije za prikupljanje podataka u senzorskim mrežama predloženo je u nizu radova [73–76]. Ipak, sustavna usporedba ponašanja LoRaWAN komunikacijskih veza u različitim okruženjima, osobito u ovisnosti o veličini prenesenih paketa, dosad nije provedena. Ta istraživačka praznina izravno motivira rad opisan u ovoj disertaciji. U nastavku se najprije opisuje metodologija eksperimenata, zatim odabrani scenariji mjerenja, potom konfiguracija sustava i naposljetku pokazatelji performansi prema kojima se tumače rezultati.

#### 4.3.1. Metodologija

Radi određivanja ponašanja i dometa komunikacijskih veza, provedeni su terenski eksperimenti na razvijenim prototipovima temeljenima na tehnologiji LoRaWAN. Mjerenja su izvršena pomoću primopredajnika RFM95W u stvarnim ispitnim uvjetima kako bi se utvrdilo na koji način parametri poput faktora širenja (SF) i kodnog omjera (CR) utječu na komunikaciju. Za različite kombinacije parametara mjereni su jakost signala i omjer signala i šuma na različitim udaljenostima između odašiljača i prijarnika te je utvrđeno pod kojim je uvjetima u pojedinim područjima moguća pouzdana komunikacija. Na svakoj lokaciji mjerenja su ponovljena pet puta, nakon čega su izračunate te grafički i numerički prikazane prosječne vrijednosti, čime je smanjen utjecaj kratkotrajnih varijacija u okruženju.

#### 4.3.2. Scenariji mjerenja

U analizi se razmatraju odašiljačka i prijarna točka, čime su obuhvaćene komunikacijske veze od točke do točke (engl. *Point-to-Point*) te od točke do više točaka (engl. *Point-to-Multipoint*). Odabrane udaljenosti između odašiljača i prijarnika iznosile su približno

100 m, 5 km te 7 km u dvama različitim scenarijima. Navedene su udaljenosti znatno manje od maksimalnoga teorijskog i eksperimentalnog dometa opisanog u literaturi [68], koji se primarno odnosi na otvorena okruženja uz izravnu optičku vidljivost (engl. *Line of Sight* – LOS).

Konkretno, analiza obuhvaća četiri karakteristična scenarija: urbani NLOS (engl. *Non-Line-of-Sight*) scenarij bez izravne optičke vidljivosti smješten u gradskom okruženju, pri-gradski NLOS scenarij na poljima u vlasništvu PIO-a, ruralni LOS scenarij uz izravnu optičku vidljivost te ruralni NLOS scenarij. U ruralnom LOS scenariju antena odašiljača postavljena je iznad razine šume, dok su u NLOS scenarijima antene pozicionirane tako da se signal djelomično rasprostire kroz vegetaciju ili su na njegovoj putanji prisutne građevinske prepreke. Detaljniji opisi odabranih scenarija mogu se pronaći u radovima [77, 78].

### 4.3.3. Konfiguracija sustava

Istraživanje razmatra rad u europskoj regiji unutar EU863–870 MHz ISM pojasa, u kojem su definirana tri zadana komunikacijska kanala: 868,10 MHz, 868,30 MHz i 868,50 MHz. Svaki od tih kanala ima propusnost od 125 kHz, koristi LoRa modulaciju i podržava prijenos podataka u rasponu od 0,3 do 5 kb/s (DR0 do DR5), ovisno o postavljenoj vrijednosti SF-a.

Uzimajući u obzir kompromis između dometa, otpornosti signala na smetnje i potrošnje energije, uspoređuju se dva načina rada s obzirom na prijenosnu snagu: način s malom snagom i način s velikom snagom odašiljanja. LP način sa snagom prijenosa od +14 dBm pruža visoku učinkovitost i malu potrošnju struje (25 mW), dok HP način sa snagom od +20 dBm omogućuje veći domet i robusnost, ali uz veću potrošnju (100 mW). Radni je ciklus prijenosa pri +20 dBm ograničen na 1 %. Iako primopredajnik podržava snagu odašiljanja do +20 dBm, prema je frekvencijskoj regulaciji [79] takva snaga dopuštena samo za jedan frekvencijski kanal, dok se +14 dBm može koristiti u bilo kojem od šest kanala.

### 4.3.4. Pokazatelji performansi

Za ocjenu kvalitete komunikacije na prijamoj se strani koriste dva pokazatelja, indikator jakosti primljenog signala (engl. *Received Signal Strength Indicator*, RSSI) i omjer snage signala i šuma (engl. *Signal-to-Noise Ratio*, SNR). RSSI daje mjeru snage dolaznog signala na RF ulaznom priključku prijavnika, riječ je o apsolutnoj vrijednosti u jedinicama dBm s rezolucijom od 0,5 dB. Vrijednost se RSSI-a koristi za određivanje najveće moguće udaljenosti

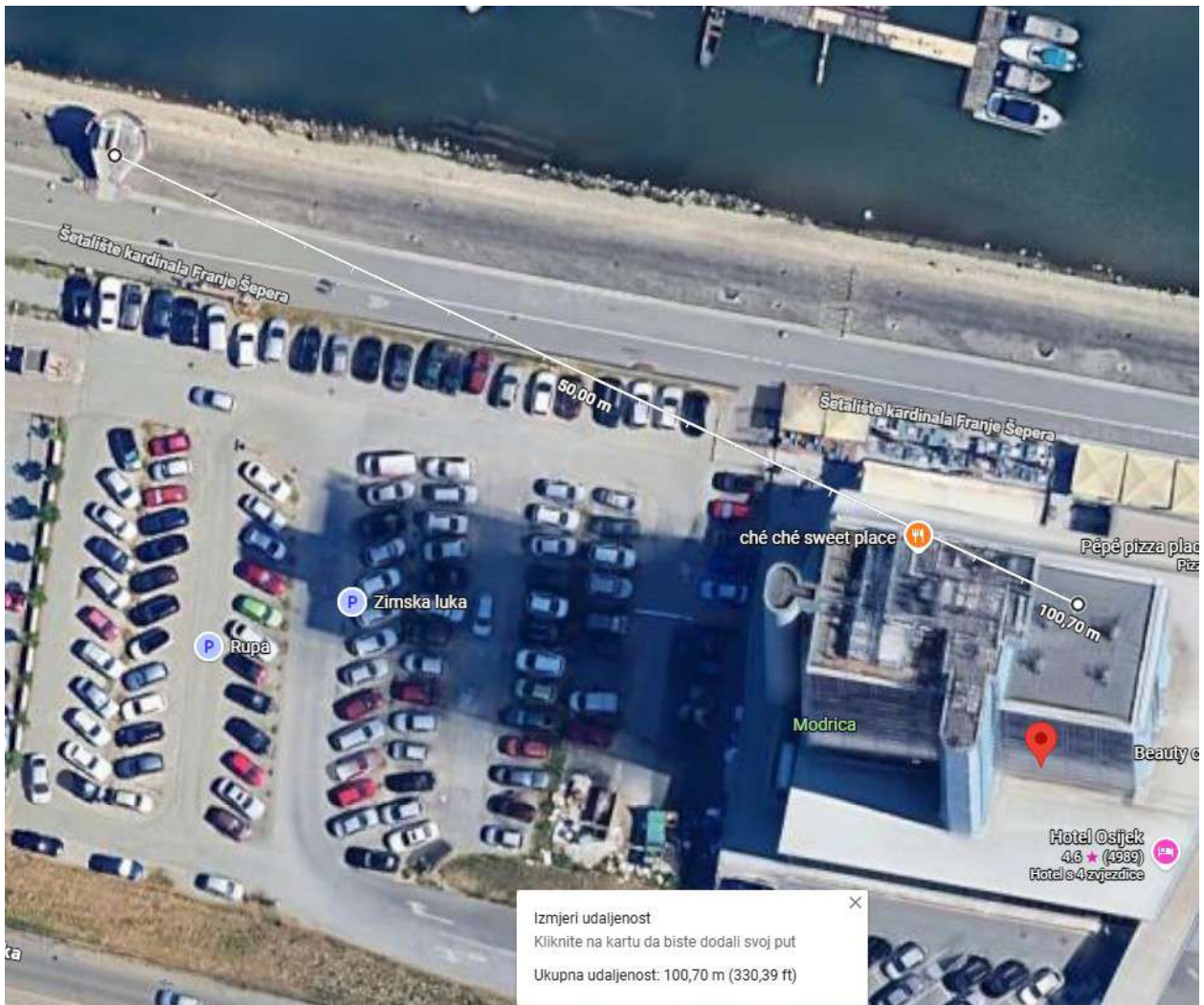
između odašiljača i prijamnika jer se snaga signala smanjuje s porastom te udaljenosti [78]. Snaga signala ovisi i o smetnjama, odnosno razini šuma, pa vrijednost RSSI-a katkad može upućivati i na pogrešno pozicioniranje opreme [80]. Kako bi se što više smanjio učinak prepreka, pristupnik je tijekom svih mjerenja postavljen na visinu nešto veću od 60 m, tj. smješten na krovu Hotela Osijek. Senzorski je čvor zbog svoje namjene postavljen nisko, na visinu od približno 1,5 m, pa ni u tom slučaju nije osigurana izravna vidljivost između čvora i pristupnika.

SNR predstavlja usporedbu jakosti signala i razine šuma, a izražava se u decibelima (dB). To je najbolji pokazatelj postojanja prepreka u prijenosu signala: pozitivna vrijednost znači da je signal jači od šuma, a negativna da šum nadjačava signal [81]. Na temelju mjerenja RSSI-a i SNR-a te postignute brzine isporuke paketa izvode se zaključci o kvaliteti prijenosa u pojedinim scenarijima.

#### 4.3.5. Rezultati mjerenja po scenarijima

Vrijednosti za  $SF = 12$  u svim su tablicama scenarija označene kao procjena jer pri toj konfiguraciji vrijeme prijenosa jednog paketa prelazi 1 s, čime se nadmašuje dopušteni radni ciklus odašiljanja od 1 % u ISM pojasu od 868 MHz prema pravilu poštenog korištenja spektra. Stoga su vrijednosti RSSI-a i SNR-a za  $SF = 12$  teorijski procijenjene ekstrapolacijom rezultata mjerenja izvedenih za niže vrijednosti SF-a, što omogućuje usporedbu s ostalim konfiguracijama bez kršenja regulatornih ograničenja.

**Scenarij 1.** — Urbani vrt bez izravne optičke vidljivosti (NLOS), s udaljenošću između senzorskog sklopa i pristupnika manjom od 100 m. Topologija terena prikazana je na slici 4.23, a izmjerene vrijednosti RSSI-a i SNR-a u tablici 4.15.



Slika 4.23: Topologija terena između senzorskog sklopa i pristupnika u prvom scenariju

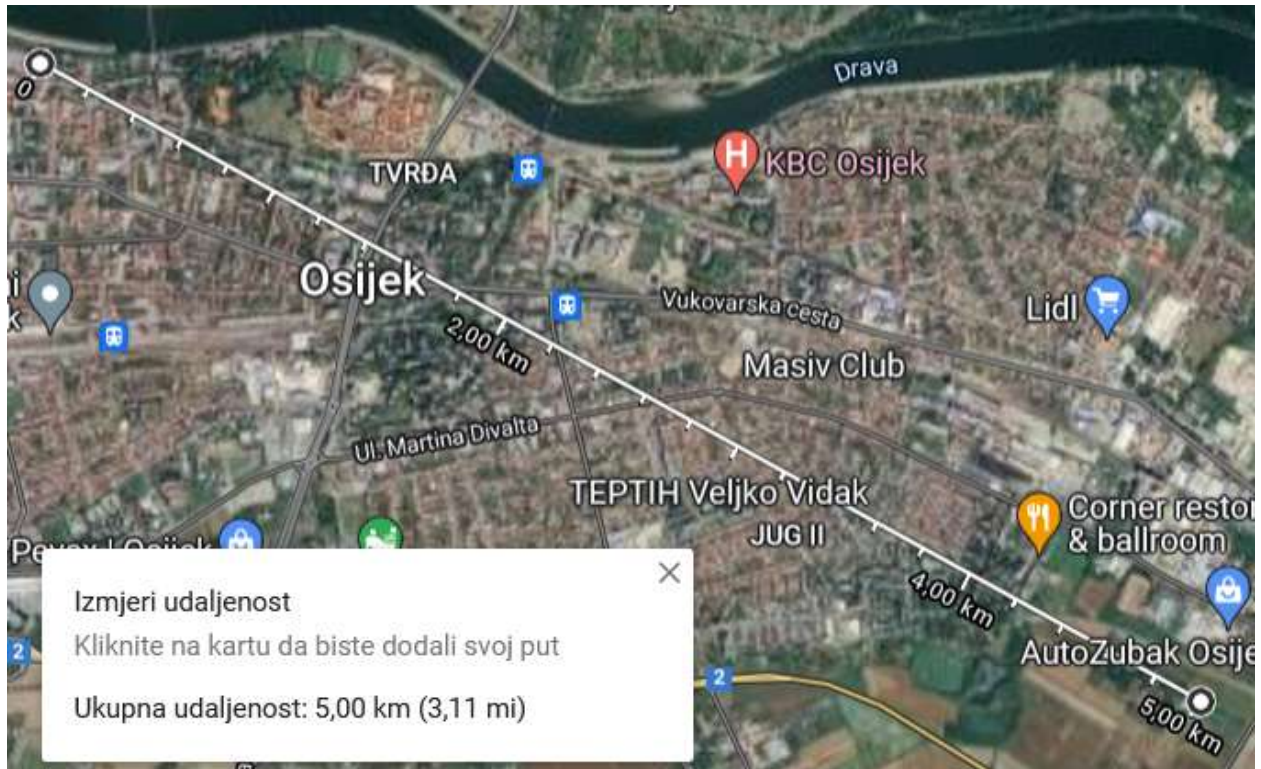
4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

**Tablica 4.15:** Minimalne vrijednosti RSSI-a i maksimalne vrijednosti SNR-a za LP i HP modove s aproksimacijom za SF12 (Scenarij 1: <100 m, NLOS)

| Mod             | Postavke                        | RSSI [dBm]   | SNR [dB]    |
|-----------------|---------------------------------|--------------|-------------|
| <b>LP (G14)</b> | SF7 – CR 4/5                    | -82,5        | 9,35        |
|                 | SF7 – CR 4/8                    | -81,0        | 9,5         |
|                 | SF10 – CR 4/5                   | -79,5        | 9,0         |
|                 | SF10 – CR 4/8                   | -81,0        | 9,7         |
|                 | <i>SF12 – CR 4/5 (procjena)</i> | <i>-81,0</i> | <i>9,0</i>  |
|                 | <i>SF12 – CR 4/8 (procjena)</i> | <i>-81,0</i> | <i>9,5</i>  |
| <b>HP (G20)</b> | SF7 – CR 4/5                    | -82,5        | 9,75        |
|                 | SF7 – CR 4/8                    | -83,0        | 8,75        |
|                 | SF10 – CR 4/5                   | -82,5        | 9,6         |
|                 | SF10 – CR 4/8                   | -83,0        | 10,0        |
|                 | <i>SF12 – CR 4/5 (procjena)</i> | <i>-83,0</i> | <i>9,5</i>  |
|                 | <i>SF12 – CR 4/8 (procjena)</i> | <i>-83,0</i> | <i>10,0</i> |

4. *Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi*

**Scenarij 2.** — Prigradski scenarij bez optičke vidljivosti (NLOS) na poljima u vlasništvu PIO instituta, s udaljenošću od približno 5 km. Topologija terena prikazana je na slici 4.24, a izmjerene vrijednosti RSSI-a i SNR-a u tablici 4.16.



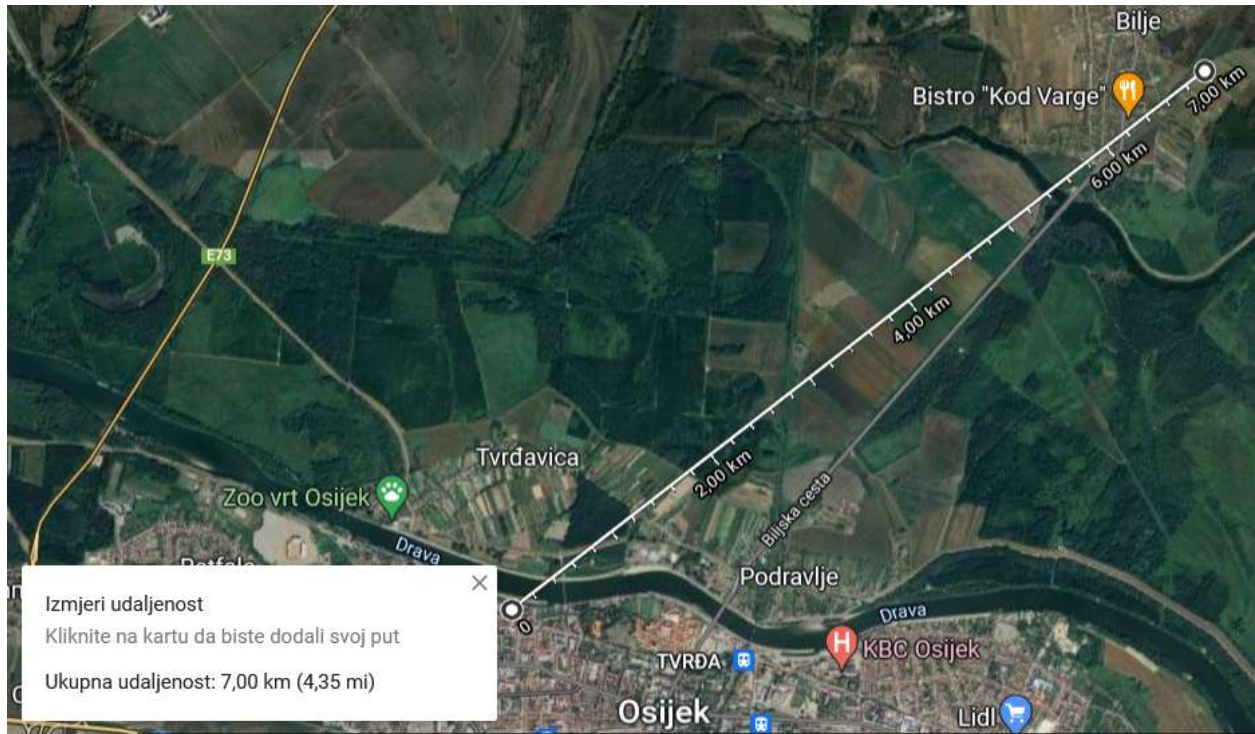
Slika 4.24: Topologija terena između senzorskog sklopa i pristupnika u drugom scenariju

Tablica 4.16: Minimalne vrijednosti RSSI-a i SNR-a za LP i HP modove (Scenarij 2: 5000 m, NLOS)

| Mod      | Postavke                 | RSSI [dBm] | SNR [dB] |
|----------|--------------------------|------------|----------|
| LP (G14) | SF7 – CR 4/5             | -118,5     | -8,0     |
|          | SF7 – CR 4/8             | -115,0     | -9,5     |
|          | SF10 – CR 4/5            | -119,0     | -10,9    |
|          | SF10 – CR 4/8            | -117,0     | -8,3     |
|          | SF12 – CR 4/5 (procjena) | -119,0     | -12,5    |
|          | SF12 – CR 4/8 (procjena) | -118,0     | -11,0    |
| HP (G20) | SF7 – CR 4/5             | -117,0     | -7,2     |
|          | SF7 – CR 4/8             | -118,0     | -7,15    |
|          | SF10 – CR 4/5            | -117,0     | -11,6    |
|          | SF10 – CR 4/8            | -117,0     | -10,8    |
|          | SF12 – CR 4/5 (procjena) | -117,0     | -14,5    |
|          | SF12 – CR 4/8 (procjena) | -117,0     | -13,0    |

4. *Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi*

**Scenarij 3.** — Ruralni scenarij s izravnom optičkom vidljivošću (LOS), s udaljenošću od približno 7 km. Topologija terena prikazana je na slici 4.25, a vrijednosti RSSI-a i SNR-a u tablici 4.17.



**Slika 4.25:** Topologija terena između senzorskog sklopa i pristupnika u trećem scenariju

**Tablica 4.17:** Minimalne vrijednosti RSSI-a i SNR-a za LP i HP modove s aproksimacijom za SF12 (Scenarij 3: 7000 m, LOS, ruralno)

| Mod      | Postavke                 | RSSI [dBm] | SNR [dB] |
|----------|--------------------------|------------|----------|
| LP (G14) | SF7 – CR 4/5             | -117,0     | -5,0     |
|          | SF7 – CR 4/8             | -115,0     | -2,9     |
|          | SF10 – CR 4/5            | -116,5     | -3,0     |
|          | SF10 – CR 4/8            | -106,0     | -6,65    |
|          | SF12 – CR 4/5 (procjena) | -116,0     | -5,0     |
|          | SF12 – CR 4/8 (procjena) | -115,0     | -8,0     |
| HP (G20) | SF7 – CR 4/5             | -116,5     | -4,5     |
|          | SF7 – CR 4/8             | -115,0     | -2,65    |
|          | SF10 – CR 4/5            | -112,5     | -2,6     |
|          | SF10 – CR 4/8            | -115,5     | -4,1     |
|          | SF12 – CR 4/5 (procjena) | -114,0     | -4,5     |
|          | SF12 – CR 4/8 (procjena) | -114,0     | -6,0     |

4. *Ekperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi*

**Scenarij 4.** — Ruralni scenarij bez izravne optičke vidljivosti (NLOS), s udaljenošću od približno 7 km. Topologija terena prikazana je na slici 4.26, a vrijednosti RSSI-a i SNR-a u tablici 4.18.



Slika 4.26: Topologija terena između senzorskog sklopa i pristupnika u četvrtom scenariju

4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

**Tablica 4.18:** Minimalne vrijednosti RSSI-a i SNR-a za LP i HP modove s aproksimacijom za SF12 (Scenarij 4: 7000 m, NLOS, ruralno). Znak „-“ označuje potpuni gubitak prijema.

| Mod      | Postavke                 | RSSI [dBm] | SNR [dB] |
|----------|--------------------------|------------|----------|
| LP (G14) | SF7 – CR 4/5             | -          | -        |
|          | SF7 – CR 4/8             | -          | -        |
|          | SF10 – CR 4/5            | -119,0     | -16,2    |
|          | SF10 – CR 4/8            | -          | -        |
|          | SF12 – CR 4/5 (procjena) | -119,0     | -18,0    |
|          | SF12 – CR 4/8 (procjena) | -119,0     | -18,5    |
| HP (G20) | SF7 – CR 4/5             | -          | -        |
|          | SF7 – CR 4/8             | -          | -        |
|          | SF10 – CR 4/5            | -118,0     | -15,95   |
|          | SF10 – CR 4/8            | -          | -        |
|          | SF12 – CR 4/5 (procjena) | -118,0     | -17,5    |
|          | SF12 – CR 4/8 (procjena) | -118,0     | -18,0    |

#### 4.3.6. Sinteza rezultata mjerenja

Provedena mjerenja u četiri testna scenarija daju cjelovit uvid u ponašanje LoRaWAN modulacije pri različitim udaljenostima i uz prisutnost ili odsutnost izravne optičke vidljivosti. U urbanom okruženju na udaljenosti manjoj od 100 m zabilježene su visoke vrijednosti RSSI-a i pozitivne vrijednosti SNR-a, što pokazuje da u takvim uvjetima nema potrebe za visokim faktorima širenja ni pojačanim načinom odašiljanja. Stvarni izazovi propagacije signala javljaju se tek na većim udaljenostima.

Usporedba prigradskog scenarija na 5 km bez izravne optičke vidljivosti i ruralnog scenarija na 7 km s izravnom optičkom vidljivošću pokazuje da je utjecaj prepreka i višestaznog širenja signala izraženiji od same udaljenosti. Iako je u ruralnom scenariju domet veći za 2 km, postojanje čistoga komunikacijskog kanala dovelo je do znatno povoljnijih SNR vrijednosti, čime se potvrđuje važnost prostornoga planiranja mreže. Granice rada upotrijebljenoga RFM95W primopredajnika utvrđene su u četvrtom scenariju (7 km, NLOS), u kojem je veliko slabljenje signala dovelo do potpunog gubitka paketa pri konfiguraciji SF7. U tim je uvjetima jedino SF10 omogućio uspješnu demodulaciju paketa, i to pri SNR vrijednostima od približno  $-16$  dB, što je blizu teoretske granice osjetljivosti hardvera. Iz dobivenih rezultata proizlazi da pouzdana komunikacija u IoT mrežama širokoga područja, postavljenima u okruženjima s puno prepreka, zahtijeva primjenu visokih faktora širenja (npr. SF10 ili više)

te uvođenje prilagodljivih mehanizama za kontrolu brzine prijenosa i kodnog omjera.

Prema tehničkim specifikacijama primopredajnika korištenog u mjerenjima [82], granične razine RF osjetljivosti pri širini pojasa od 125 kHz izravno ovise o odabranom faktoru širenja i prikazane su u tablici 4.19. Temeljni je preduvjet za uspješnu demodulaciju da snaga primljenog signala premašuje deklarirani prag osjetljivosti za danu konfiguraciju. Tijekom mjerenja, uz širinu pojasa zadržanu na 125 kHz, primopredajnik je konfiguriran za rad s različitim vrijednostima SF-a, postignute su mjerljive razine osjetljivosti prijemnika sve do granične vrijednosti od približno  $-120$  dBm, čime je potvrđena pouzdanost prijemnika u rubnim uvjetima propagacije.

**Tablica 4.19:** *Teoretske razine RF osjetljivosti za širinu kanala od 125 kHz prema specifikacijama primopredajnika [82].*

| Faktor širenja (SF) | RF osjetljivost [dBm] |
|---------------------|-----------------------|
| 6                   | -118                  |
| 7                   | -123                  |
| 8                   | -126                  |
| 9                   | -129                  |
| 10                  | -132                  |
| 11                  | -133                  |
| 12                  | -136                  |

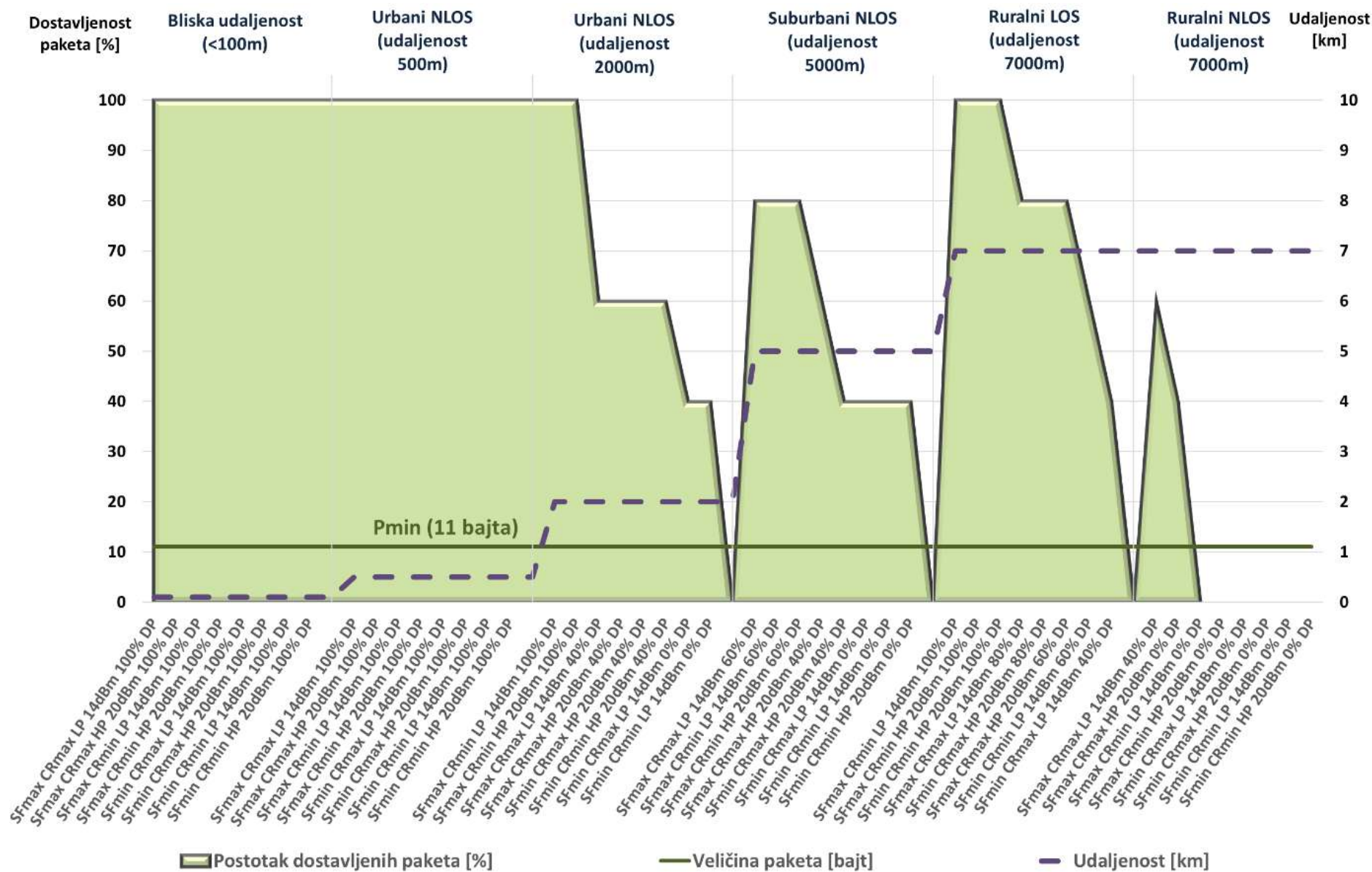
#### 4.4. Optimizacija prijenosa: ADR, potvrđeni prijenosi i veličina paketa

U udaljenim ruralnim područjima i u specifičnim primjenama poput šuma [83] čest je problem nedostatak izvora napajanja u blizini područja koje treba pokriti LoRaWAN signalom, što otežava postavljanje pristupnika, te povremeno otežano povezivanje pristupnika s infrastrukturom jezgrene mreže. U takvim je slučajevima potrebno ostvariti veći komunikacijski domet, no ograničena propusnost može narušiti pouzdanost komunikacije temeljene na tehnologiji LoRa te uzrokovati znatne gubitke podatkovnih paketa. Dodatno, izravna optička vidljivost nije uvijek ostvariva zbog prepreka poput vegetacije ili zgrada, čime nastaju NLOS uvjeti u kojima kvaliteta prijenosa značajno opada.

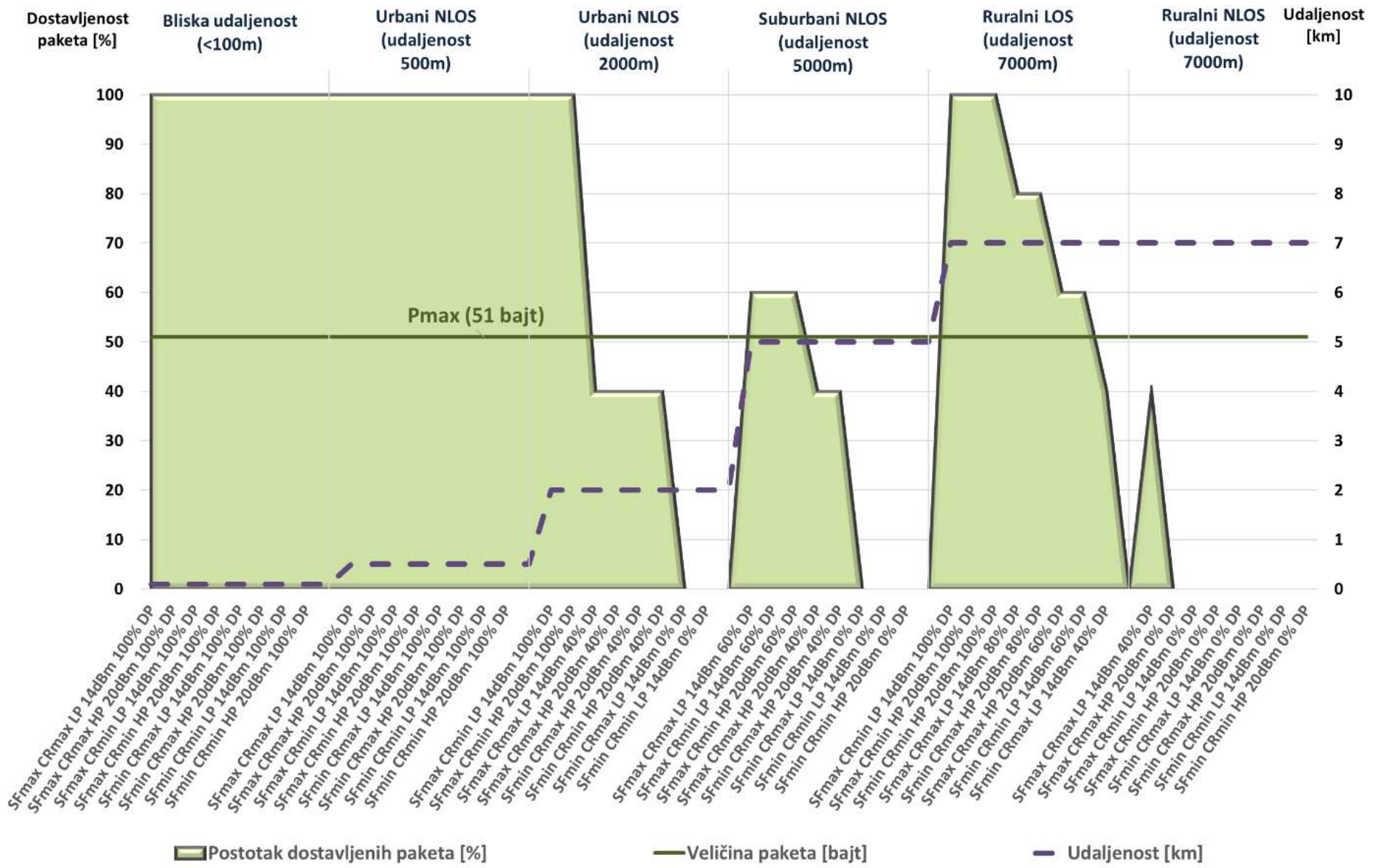
Pri procjeni gubitaka koristi se postotak isporučenih paketa, odnosno omjer broja uspješno dostavljenih paketa (engl. *Delivered Packets* – DP) i ukupnoga broja poslanih paketa. Na slikama 4.27 i 4.28 prikazani su grafovi koji opisuju kvalitetu prijenosa na temelju

postotka isporuke za minimalnu i maksimalnu veličinu paketa. Iz njih se mogu iščitati kombinacije komunikacijskih parametara koje ostvaruju najbolje rezultate. Kao što je vidljivo iz prikaza za NLOS scenarije, u njima dolazi do gubitka paketa ( $DP < 100$ )

Tijekom mjerenja, širina frekvencijskoga pojasa LoRa signala bila je postavljena na 125 kHz, a primopredajnik je konfiguriran za rad s različitim vrijednostima faktora širenja (SF). Za detaljniju su analizu odabrane dvije vrijednosti:  $SF = 7$  i  $SF = 10$ , budući da predstavljaju optimalan kompromis između potrošnje energije i potrebnoga dometa. Usporedno su razmatrana i dva načina rada s obzirom na snagu odašiljanja: način niske potrošnje (LP, engl. *Low Power*) sa snagom odašiljanja od +14 dBm i manjom potrošnjom (25 mW) te način visoke snage (HP, engl. *High Power*) sa snagom od +20 dBm uz veću potrošnju (100 mW).



Slika 4.27: Postotak dostavljenih paketa pri minimalnoj veličini paketa



Slika 4.28: Postotak dostavljenih paketa pri maksimalnoj veličini paketa

4. *Ekperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi*

Prikazani rezultati ukazuju na to da je isporuka paketa najkritičnija u udaljenim prigradskim i ruralnim područjima, budući da nedostatak izravne optičke vidljivosti (NLOS uvjeti) znatno narušava kvalitetu prijenosa. Iz Tablice 4.20 izdvojeni su podaci s optimalnim vrijednostima za svaki pojedini scenarij. Pri tumačenju rezultata potrebno je uzeti u obzir i utjecaj veličine podatkovnoga paketa na ukupne performanse mreže. Za usporedbenu analizu odabrane su dvije granične vrijednosti:  $P_{\max} = 51$  bajt i  $P_{\min} = 11$  bajtova. Navedene vrijednosti nisu odabrane proizvoljno, već izravno odgovaraju specifikacijama i stvarnim veličinama paketa koje u svom radu generiraju komercijalni senzorski uređaji nabavljeni i testirani u sklopu projekta *IoT polje*.

**Tablica 4.20:** *Postotak isporuke paketa (DP) u različitim scenarijima za odabrane kombinacije komunikacijskih parametara*

| Veličina paketa | Snaga signala | SF | CR  | Dostavljeni paketi (DP) |                     |                      |                          |                      |                       |
|-----------------|---------------|----|-----|-------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|
|                 |               |    |     | Bliska udalj. (<100 m)  | Urbani NLOS (500 m) | Urbani NLOS (2000 m) | Prigradski NLOS (5000 m) | Ruralni LOS (7000 m) | Ruralni NLOS (7000 m) |
| $P_{\max}$      | LP<br>14 dBm  | 7  | 4/5 | 100%                    | 100%                | 0%                   | 0%                       | 40%                  | 0%                    |
|                 |               |    | 4/8 | 100%                    | 100%                | 0%                   | 0%                       | 60%                  | 0%                    |
|                 |               | 10 | 4/5 | 100%                    | 100%                | 40%                  | 60%                      | 80%                  | 40%                   |
|                 |               |    | 4/8 | 100%                    | 100%                | 100%                 | 60%                      | 100%                 | 0%                    |
|                 | HP<br>20 dBm  | 7  | 4/5 | 100%                    | 100%                | 40%                  | 40%                      | 80%                  | 0%                    |
|                 |               |    | 4/8 | 100%                    | 100%                | 40%                  | 0%                       | 100%                 | 0%                    |
|                 |               | 10 | 4/5 | 100%                    | 100%                | 40%                  | 40%                      | 60%                  | 0%                    |
|                 |               |    | 4/8 | 100%                    | 100%                | 100%                 | 60%                      | 100%                 | 0%                    |
| $P_{\min}$      | LP<br>14 dBm  | 7  | 4/5 | 100%                    | 100%                | 40%                  | 40%                      | 40%                  | 0%                    |
|                 |               |    | 4/8 | 100%                    | 100%                | 40%                  | 40%                      | 80%                  | 0%                    |
|                 |               | 10 | 4/5 | 100%                    | 100%                | 60%                  | 60%                      | 80%                  | 40%                   |
|                 |               |    | 4/8 | 100%                    | 100%                | 100%                 | 80%                      | 100%                 | 0%                    |
|                 | HP<br>20 dBm  | 7  | 4/5 | 100%                    | 100%                | 60%                  | 40%                      | 80%                  | 0%                    |
|                 |               |    | 4/8 | 100%                    | 100%                | 60%                  | 80%                      | 100%                 | 0%                    |
|                 |               | 10 | 4/5 | 100%                    | 100%                | 60%                  | 40%                      | 60%                  | 0%                    |
|                 |               |    | 4/8 | 100%                    | 100%                | 100%                 | 80%                      | 100%                 | 60%                   |

Iz tablice je vidljivo da do udaljenosti od 500 m nema gubitka paketa, neovisno o NLOS uvjetima. Na udaljenostima od 2 km i većima, u NLOS uvjetima gdje je optička vidljivost blokirana preprekama te su moguće smetnje drugih radijskih sustava, javljaju se i situacije s potpunim gubitkom komunikacije. Postotak isporučениh paketa može se ipak povećati prikladnim odabirom parametara, primjerice većim vrijednostima SF-a, a po potrebi i manjim vrijednostima CR-a, jer su kombinacije s najvećim kodnim omjerom osjetljivije na šum. Čak je i na udaljenostima većim od 5 km u NLOS uvjetima moguće ostvariti komunikaciju, ali se preporučuje primjena viših vrijednosti SF-a. Među izdvojenim scenarijima prikazane su

kombinacije parametara s najvećim postotkom uspješnih prijenosa unutar svakoga pojedinih scenarija. U slučajevima u kojima više kombinacija postiže jednak postotak, prednost se daje onima s manjom potrošnjom energije, manjom snagom primopredajnika (LP), manjom vrijednošću faktora širenja ( $SF = 7$ ) te s većom vrijednošću kodnog omjera ( $CR = 4/5$ ).

#### 4.4.1. Adaptivna brzina prijenosa, potvrđeni prijenosi i optimizacija parametara

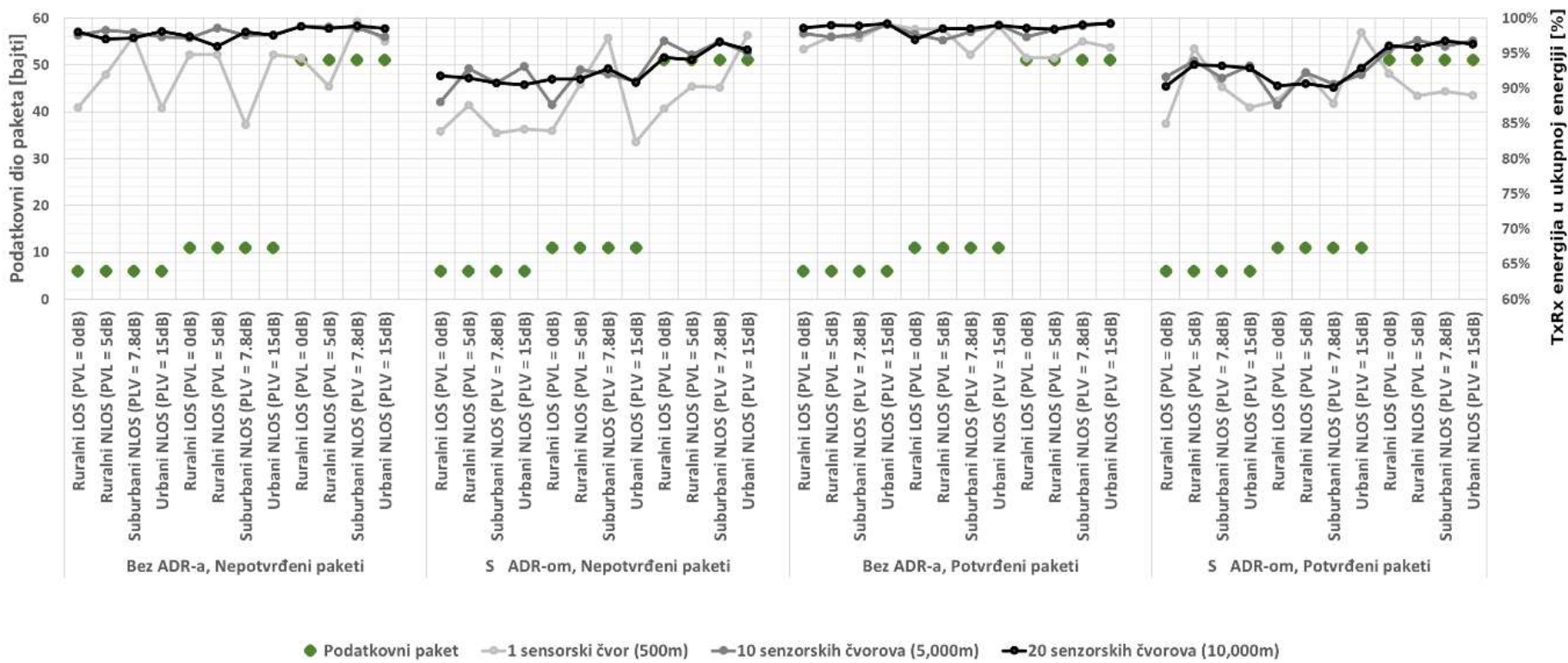
Senzorski čvorovi odašilju pakete putem bežičnoga sučelja, pri čemu na isporuku izravno utječu uvjeti rasprostiranja signala i odnos signala i šuma (SNR). Budući da se LoRaWAN temelji na protokolu ALOHA, na pristupniku može doći i do kolizije signala. Vjerojatnost sudara raste s brojem čvorova u mreži i količinom prometa, stoga u visoko opterećenim mrežama LoRaWAN bilježi pad performansi, osobito pri uporabi potvrđenih prijenosa. LoRa pristupnik može istodobno primiti do osam paketa poslanih s različitim faktorima širenja na različitim kanalima. Zahvaljujući ortogonalnosti faktora širenja, dvije se poruke kodirane različitim vrijednostima SF-a mogu istodobno demodulirati bez kolizije. Do sudara dolazi samo kada se na istom kanalu i s istim SF-om vremenski preklape dva ili više paketa. U tom se slučaju svi paketi u koliziji odbacuju, osim ako jedan paket ima snagu primljenoga signala veću od drugoga za najmanje 6 dB.

Radi pouzdanije isporuke, senzorski čvorovi mogu od pristupnika zatražiti potvrdu prijama (ACK). Pri uporabi potvrđenih poruka, ako čvor u jednom od dvaju prijarnih prozora nakon odašiljanja ne dobije potvrdu, on ponavlja prijenos sve dok ne primi ACK ili dok ne dosegne najveći dopušteni broj pokušaja na MAC sloju (preporučena zadana vrijednost iznosi 8). Svaki se ponovljeni prijenos odvija na nasumično odabranom kanalu unutar dostupnoga podpojasa, čime se smanjuje vjerojatnost sudara s istim ometajućim prijenosom. Iako potvrđeni prijenosi povećavaju pouzdanost, oni istodobno znatno povećavaju potrošnju energije i opterećenje pristupnika, pa ih treba primjenjivati selektivno.

Radi smanjenja gubitaka u prijenosu može se primijeniti mehanizam ADR (engl. *Adaptive Data Rate*), koji prilagođava faktor širenja, širinu frekvencijskoga pojasa i snagu odašiljanja na temelju trenutnih uvjeta u kanalu, kako bi se uskladila pouzdanost prijenosa i potrošnja energije čvora. Načelno, čvorovi smješteni bliže pristupniku mogu koristiti niži SF i veću korisnu propusnost, dok udaljeniji čvorovi zahtijevaju viši SF i veće zauzeće radijskoga spektra. Pri pogoršanju uvjeta u kanalu, pristupnik smanjuje propusnost ili povećava snagu odašiljanja. Pri poboljšanju uvjeta vrijedi obrnuto, dok čvor može i samostalno smanjiti propusnost

kada izostanu odgovori s mreže. ADR treba uključiti samo ako su RF uvjeti čvora dovoljno stabilni jer se odluke donose na temelju 20 posljednjih odašiljanja, što ga čini sporim u uvjetima izrazitih i brzih promjena. Pri uporabi potvrđenih poruka spora prilagodba ADR-a manje je problematična jer se gubitak nadoknađuje ponovnim prijenosom. Međutim, ako se potvrde ne koriste, uspješnost isporuke podataka znatno opada s porastom smetnji u komunikacijskom kanalu. Slanje većih paketa dodatno usporava prilagodbu jer mreža zahtijeva 20 uzlaznih prijenosa prije reakcije, a do tada se podaci šalju s neoptimalnim parametrima.

Za daljnju analizu potrošnje energije u prethodno odabranim mjernim scenarijima upotrijebljen je simulator razvijen u programskom jeziku Python [84], koji podržava ADR mehanizam i potvrđene prijenose. Performanse mreže (Slika 4.29) ocjenjuju se brojem primljenih paketa i prosječnim omjerom primljenih i poslanih paketa po čvoru, odnosno uspješnošću isporuke paketa. Iz dobivenih je rezultata razvidno nekoliko ključnih nalaza. Prije svega, isključivanjem potvrđenih poruka znatno se smanjuje potrošnja energije u stanjima odašiljanja (Tx) i prijama (Rx). S druge strane, ako pristupnik radi u režimu ograničenoga radnog ciklusa i koristi isključivo zadane kanale, on ne može potvrditi sve zahtijevane prijenose, što posljedično povećava broj ponovljenih slanja te dodatno iscrpljuje energetske resurse čvora. Konačno, pokazano je da uključivanje mehanizma ADR u svim analiziranim scenarijima donosi znatnu uštedu energije. Uz aktivan ADR, čvorovi ne odašilju većom prijenosnom snagom od potrebne, dok se različiti faktori širenja (SF) ortogonalno razdvajaju, čime se drastično smanjuje vjerojatnost kolizija paketa u mreži.

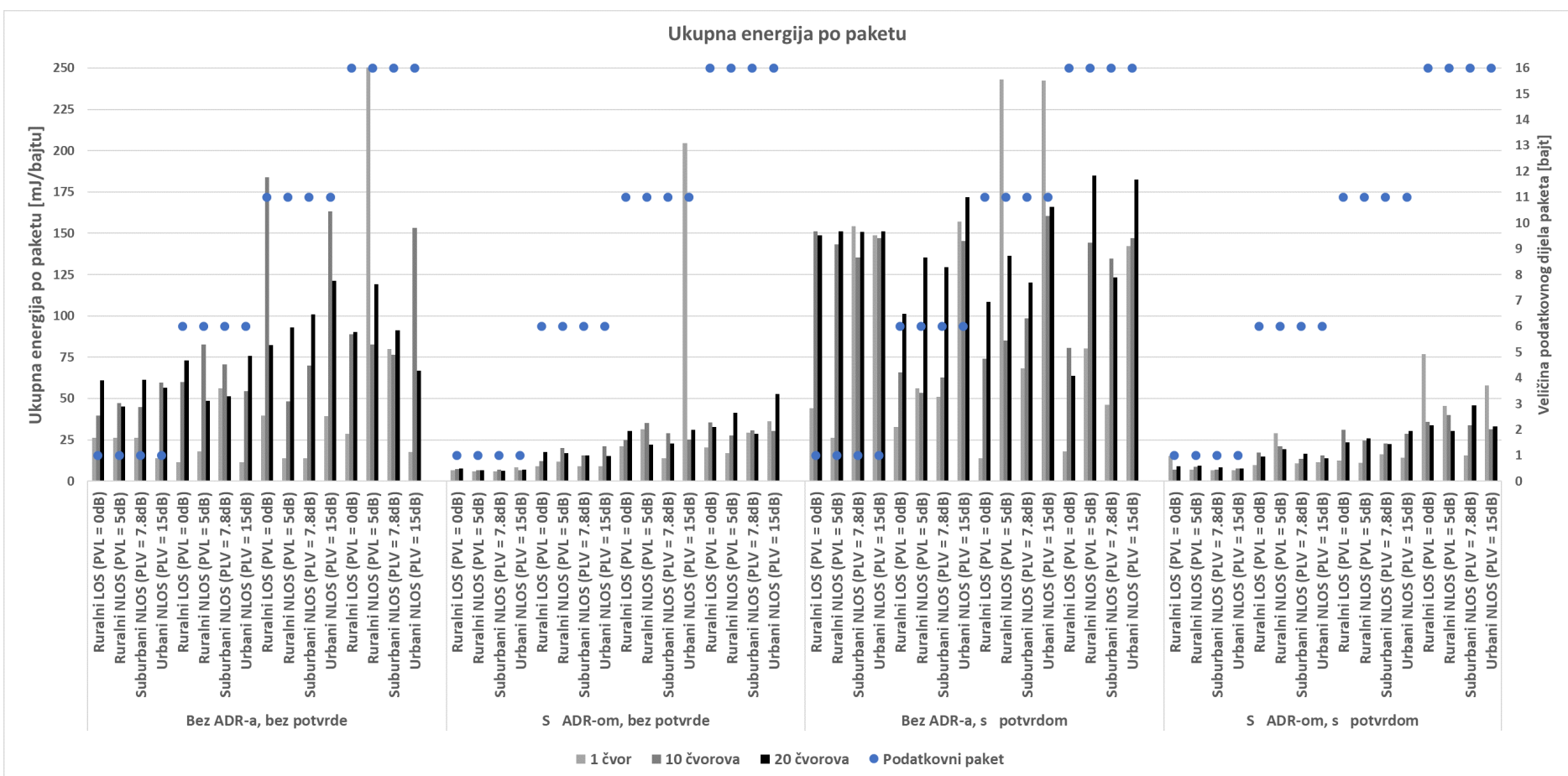


Slika 4.29: Energije slanja (Tx) i primanja (Rx) u ukupnoj korištenoj energiji

Energija po korisnom bitu funkcija je veličine korisnoga sadržaja i odabranoga faktora širenja (SF). U ranijim je analizama [85–87] pokazano da pri visokim vrijednostima SF-a i porastu veličine korisnoga sadržaja energija po korisnom bitu opada, dok pri niskim vrijednostima SF-a veličina sadržaja nema značajan utjecaj. Analize provedene u sklopu ove disertacije polaze od fiksnih, unaprijed definiranih veličina korisnoga sadržaja paketa te za svaki scenarij koriste odgovarajuću izračunatu brzinu prijenosa. Dobiveni rezultati pokazuju da se smanjenjem veličine korisnoga sadržaja smanjuje i energija po korisnom bitu, neovisno o vrijednosti SF-a, što predstavlja značajan odmak od navedenih ranijih nalaza u literaturi.

Pri komunikaciji s tolerancijom na gubitak paketa, kao što je slanje vremenski nekritičnih okolišnih ili agronomskih podataka, moguće je posve izostaviti potvrde. Takav je pristup osobito prikladan u mrežama s manjim brojem čvorova i rjeđim slanjem podataka, u kojima je vjerojatnost sudara (kolizija) mala, te u sredinama s pouzdanim signalom. I u tim se slučajevima preporučuje zadržati redne brojeve paketa. Na temelju njih, mrežni poslužitelj može pratiti kontinuitet primljenoga prometa, a u slučaju većih praznina obavijestiti čvor da uključi ADR mehanizam i prilagodi parametre prema preporukama mreže (Slika 4.30).

Zaključno, potrošnja energije u stanjima odašiljanja (Tx) i prijama (Rx) najviše doprinosi ukupnoj potrošnji čvora, dok pri korištenju ADR-a uz izostavljanje potvrda raste relativni udio energije u stanju mirovanja. Optimizacija parametara kao što su faktor širenja (SF), kodni omjer (CR) i veličina korisnoga sadržaja ključna je za smanjenje energetske potrošnje čvora. Domet LoRa komunikacije rezultat je ravnoteže između SF-a, prijenosne snage odašiljanja i uvjeta rasprostiranja signala. Domet raste s povećanjem SF-a i snage, pri čemu se teorijski najveći domet pri zadanoj snazi postiže uz najviši SF, ali i uz najveću potrošnju energije po prenesenom paketu. Konačan odabir radnih parametara stoga izravno ovisi o zahtjevima primjene. Kritičnost podataka, gustoća mreže, dopuštena potrošnja energije i očekivana varijabilnost komunikacijskoga kanala zajednički određuju optimalnu ravnotežu između dometa, energetske učinkovitosti i pouzdanosti prijenosa.



Slika 4.30: Ukupna energija pri različitim veličinama paketa

#### 4.4.2. Optimizacija veličine paketa

Optimizacija potrošnje energije zahtijeva pažljiv odabir veličine paketa, a za uštedu energije treba poslati što manji ukupni promet, a istodobno u njemu prenijeti što više korisnih informacija. Cilj je maksimizirati količinu prenesenih korisnih bitova uz odgovarajuću razinu redundancije, pri čemu kompaktnost i pravovremenost prijenosa izravno utječu na učinkovitost senzorske mreže temeljene na LoRaWAN-u, osobito u primjenama poput praćenja okolišnih i agronomskih parametara u preciznoj poljoprivredi.

LoRaWAN specifikacija, definirana posebno za svaku svjetsku regiju, propisuje najveću veličinu korisnih podataka  $N$  koja varira ovisno o brzini prijenosa (engl. *Data Rate*, DR) [88, 89]. U regiji EU863–870 najveća veličina korisnog sadržaja iznosi 51 bajt za DR0 do DR2, 115 bajtova za DR3 i 222 bajta za DR4 do DR7, dok za DR8 do DR15 nije definirana. Niža vrijednost DR-a obično omogućuje veći domet, pa izbor najnižeg DR-a izravno utječe i na najveću dopuštenu duljinu paketa. Iako ograničenje od 51 bajta u Europi nije osobito restriktivno, u regijama u kojima se rad odvija u ISM pojasu od 900 MHz najniži je DR ograničen na svega 11 bajtova [88]. Stoga, ako se isti format paketa primjenjuje u svim regijama, a kao podržana razina odabran je DR0 (radi postizanja većeg dometa), najveća je duljina korisnog sadržaja ograničena na 11 bajtova.

Senzori u poljoprivrednim primjenama prate parametre okoliša i stanja usjeva primjerice temperaturu, vlažnost, tlak, sunčevo zračenje i količinu oborina. Kritičan aspekt planiranja prijenosa nije samo veličina paketa, nego i učestalost slanja. Stopa uzorkovanja mora biti dovoljno velika da vjerno prikaže promatrani fenomen, ali ne i veća od potrebnoga. Pri praćenju oborina važnih za upravljanje navodnjavanjem, posebno u slučaju kratkotrajnih pljuskova, potrebno je prikupiti veći broj uzoraka u kraćim intervalima.

Kada senzorski sklop sadrži više senzorskih elemenata sa sinkroniziranim mjerenjima, smisleno je sva očitavanja objediniti u isti paket. Primjenjuje se postupak pakiranja bitova (engl. *bit packing*) u kojem se bitovi korisnog sadržaja različitih parametara nižu jedan za drugim u kompaktan niz bez praznina, čime se broj prenesenih bitova svodi na minimum, a propusnost mreže maksimizira. Tablica 4.21 prikazuje moguće formate poruka različitih ukupnih duljina koje proizlaze iz takvog pristupa.

**Tablica 4.21:** *Format podatkovnog dijela paketa s prikazom mogućih veličina korisnog sadržaja i pripadajućih parametara*

| Parametar         | 1 B  |        | 6 B        |         |                  |        | 11 B  |                  |         |        | 16 B   |         |                  |                  |         |                  |       |
|-------------------|------|--------|------------|---------|------------------|--------|-------|------------------|---------|--------|--------|---------|------------------|------------------|---------|------------------|-------|
|                   | Bat. | T      | Vl.        | Tlak    | UV               | Pad.   | E. T. | E. Z.            | Smj. v. | Br. v. | Sn. v. | T. pad. | V <sub>max</sub> | V <sub>min</sub> | E. tlak | T <sub>max</sub> | —     |
| Početna poz. bita | 1    | 3      | 8          | 16      | 25               | 37     | 45    | 50               | 56      | 65     | 69     | 76      | 80               | 88               | 97      | 106              | 120   |
| Broj bitova       | 2    | 5      | 8          | 9       | 12               | 9      | 5     | 6                | 9       | 4      | 7      | 4       | 8                | 9                | 9       | 14               | 8     |
| Vrijednost (jed.) | 1    | 4      | 27,0       | 44,6    | 100987           | 3      | 0     | 0                | 0       | 1      | 19     | 1       | 255              | 44,6             | 44,6    | 100990           | 255   |
| Jedinica          | V    | °C     | %          | Pa      | W/m <sup>2</sup> | imp.   | °C    | W/m <sup>2</sup> | —       | km/h   | —      | s       | %                | %                | Pa      | s                | —     |
| Rezolucija        | 1    | 0,05   | 0,5        | 0,2     | 17               | 3      | 1     | 0,1              | 2       | 1      | 1      | 1       | 1                | 0,2              | 0,2     | 5                | 1     |
| Maks. br. vrijed. | 4    | 32     | 256        | 512     | 4096             | 512    | 32    | 64               | 512     | 16     | 128    | 16      | 256              | 512              | 512     | 16384            | 256   |
| Raspon (min–max)  | 0–3  | 3–4,55 | –40 – 87,5 | 0–102,2 | 60000–129632     | 0–1536 | 0–32  | 0–6,3            | 0–1022  | 0–15   | 0–127  | 0–15    | 0–255            | 0–102,2          | 0–102,2 | 50000–131920     | 0–255 |
| Potreban raspon   | 0–3  | 3–4,5  | –50 – 80   | 0–100   | 60000–128000     | 0–1500 | 0–25  | 0–3              | 0–100   | 0–15   | 0–127  | 0–15    | 1–255            | 0–100            | 0–100   | 60000–128000     | 1–255 |
| Provjera          | OK   | OK     | OK         | OK      | OK               | OK     | OK    | OK               | OK      | OK     | OK     | OK      | OK               | OK               | OK      | OK               | OK    |

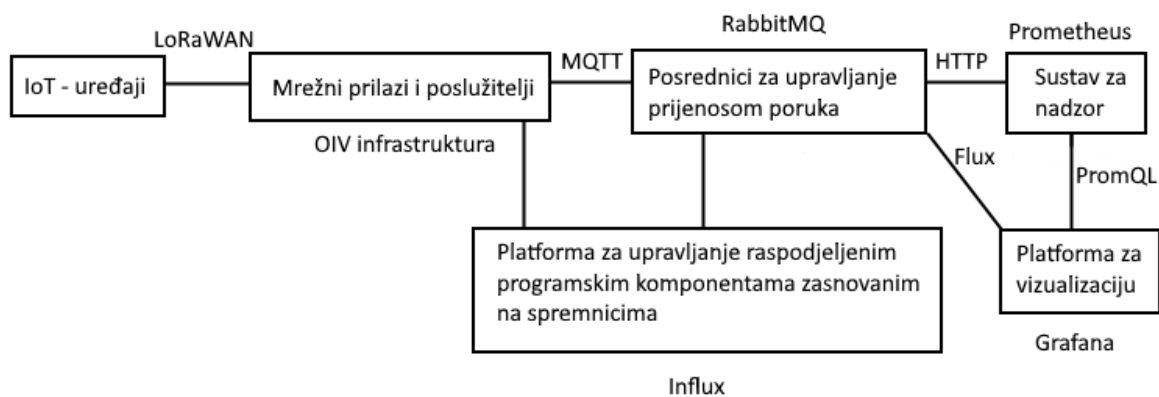
Kratice: Bat. – baterija; T – temperatura; Vl. – vlažnost; UV – ultraljubičasto zračenje; Pad. – padaline; E. T. – ekstremna temperatura; E. Z. – ekstremno zračenje; Smj. v. – smjer vjetra; Br. v. – brzina vjetra; Sn. v. – snaga vjetra; T. pad. – minimalno vrijeme između padalina; V<sub>max</sub> – maksimalna vlažnost; V<sub>min</sub> – minimalna vlažnost; E. tlak – ekstremni atmosferski tlak; T<sub>max</sub> – maksimalno vrijeme između padalina.

#### 4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi

Tijekom postupka pakiranja bitova, ključno je za svaki parametar definirati raspon vrijednosti i rezoluciju koji su strogo prilagođeni zahtjevima sustava, čime se izbjegava prijenos nepotrebnih podataka. Većinu je fizičkih mjerenja moguće sažeti u znatno manji broj bitova u odnosu na ono što zahtijevaju standardni tipovi podataka. Primjerice, za prijenos podatka o temperaturi okoliša dovoljan je 8-bitni zapis (umjesto 11-bitnoga), kojim se pokriva raspon od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+87,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  uz zadržavanje visoke preciznosti. Slično načelo vrijedi i za prijenos podataka o relativnoj vlažnosti, atmosferskom tlaku te količini oborina. Primjer optimizacije najbolje pokazuje 6-bajtni format korisnog sadržaja iz tablice 4.21 sadrži sve parametre potrebne za praćenje uvjeta u okolišu relevantnih za navodnjavanje usjeva, pri čemu prenosi jednaku količinu korisnih informacija kao 11-bajtni paket koji za iste parametre koristi veći broj bitova. Naime, pojedine izvedene parametre znatno je učinkovitije izračunavati na aplikacijskom poslužitelju na temelju osnovnih mjerenja, nego ih obrađivati na samom senzorskom čvoru te time nepotrebno trošiti energiju mikroupravljača i dodatno opterećivati komunikacijski kanal njihovim slanjem.

### 4.5. Implementacija mreže u realnom okruženju

U sklopu istraživačkih aktivnosti uspostavljena je mreža za testiranje rada opreme u realnim uvjetima. Komunikacija između krajnjega uređaja i poslužitelja na koji se podaci pohranjuju prikazana je na slici 4.31.



Slika 4.31: Prikaz mrežne arhitekture

Prijenos podataka unutar sustava odvija se u nekoliko jasno definiranih koraka. U prvoj fazi, krajnji uređaj šalje podatke pristupniku korištenjem protokola LoRaWAN. Pristupnik

#### *4. Eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN za povećanje postotka dostavljenih paketa s primjenom u preciznoj poljoprivredi*

---

potom prosljeđuje zaprimljene podatke u mrežnu infrastrukturu OIV-a, odakle se putem protokola MQTT (engl. *Message Queuing Telemetry Transport*) dostavljaju posredniku poruka RabbitMQ. Navedeni posrednik dalje usmjerava podatke u bazu podataka vremenskih serija InfluxDB radi trajne pohrane, dok se za njihov konačni grafički prikaz krajnjem korisniku upotrebljava platforma Grafana. Dodatno, operativni nadzor nad radom mrežnih uređaja i pokrenutih poslužiteljskih usluga provodi se pomoću sustava Prometheus.

LoRaWAN tehnologija pruža velik komunikacijski domet više od 7 km uz nisku potrošnju energije, što omogućuje postavljanje uređaja u ruralnim područjima u kojima nije dostupan stalan izvor napajanja, a komunikacija se odvija na velikim udaljenostima. Veliki domet ujedno omogućuje znatnu pokrivenost manjim brojem pristupnika. Pristupnici su postavljeni na ključne lokacije diljem Hrvatske u sklopu infrastrukture tvrtke OIV — Digitalni signali i mreže d.o.o. Korištenjem postojeće, profesionalno održavane infrastrukture izbjegavaju se uobičajeni problemi pri uspostavi i osiguranju pristupa pristupnika javnoj mreži. OIV uređajima dodjeljuje ključeve za AES-128 enkripciju, čime se osigurava povjerljivost podataka u prijenosu. Radi povećane pouzdanosti, primljeni se podaci najprije redundantno i privremeno pohranjuju na privatne poslužitelje OIV-a kako bi se spriječio gubitak u slučaju kasnijih kvarova u prijenosu. Korisnik kroz cijeli proces ima uvid u parametre komunikacije unutar OIV infrastrukture.

Nakon sigurnosnih provjera i privremene pohrane, podaci se MQTT protokolom prosljeđuju krajnjem korisniku. MQTT zasniva se na arhitekturi broker–klijent, klijenti objavljuju poruke i pretplaćuju se na teme od interesa, a broker razmjenjuje poruke između njih asinkrono. MQTT podržava tri razine kvalitete usluge (engl. *Quality of Service*, QoS), čime se može odabrati željeni stupanj pouzdanosti isporuke. Za prihvata i raspodjelu poruka koristi se RabbitMQ — broker otvorenog koda za razmjenu poruka. Poruke se razmjenjuju preko TCP veza i svrstavaju u redove čekanja na temelju ključa, čime se postiže kontrola redoslijeda obrade i dodatna razina pouzdanosti pri prijenosu prema bazi podataka.

Za pohranu podataka koristi se InfluxDB, baza podataka otvorenog koda specijalizirana za vremenske serije. Svakom se zapisu dodjeljuje vremenska oznaka u trenutku pohrane, što omogućuje učinkovito praćenje, organizaciju i analitičku obradu podataka prema vremenu nastanka. Vizualizacija se obavlja web-aplikacijom Grafana koja podržava širok izbor grafičkih prikaza i alata za istraživanje podataka. U kombinaciji s vremenskim oznakama iz InfluxDB-a, omogućen je prikaz mjerenih veličina u vremenu uz mogućnost primjene anali-

tičkih algoritama nad pohranjenim podacima i prikaza njihovih rezultata uz izvorne mjerene vrijednosti. Za nadzor uređaja i pokrenutih usluga koristi se alat Prometheus, namijenjen prikupljanju operativnih metrika i praćenju procesa unutar sustava, čime se osigurava pravovremena detekcija ispadanja pojedinih komponenti, što je nužno za pouzdan rad mreže u dugotrajnom radu na terenu.

## 4.6. Rasprava

U sklopu doktorske disertacije su bežične senzorske mreže za praćenje stanja usjeva na poljoprivrednim površinama udaljenima nekoliko kilometara, s mogućim proširenjem na urbane vrtove i prigradska zemljišta. Cilj je bio odabrati i prilagoditi komunikacijsku tehnologiju koja omogućuje pouzdan, energetski učinkovit prijenos malih količina mjernih podataka na velike udaljenosti.

Provedena analiza različitih bežičnih komunikacijskih tehnologija pokazala je da tehnologije kratkog dometa (npr. Wi-Fi i ZigBee) ne udovoljavaju predstavljanim zahtjevima zbog ograničenoga dometa, a mobilne mreže, iako odgovaraju zahtjevima dometa i pouzdanosti, imaju previsoku potrošnju energije i unose dodatne troškove pretplate. Najprikladnijom se stoga pokazala LoRaWAN tehnologija iz skupine LPWAN tehnologija, sa LoRa modulacijom na fizičkom sloju. Dodatan razlog odabira bila je raspoloživost LoRa infrastrukture tvrtke Odašiljači i veze d.o.o. (OIV), koja je pružila potporu pri uspostavi mreže. LoRa modulacija i LoRaWAN protokol u sklopu su rada podvrgnuti analitičkoj, simulacijskoj i terenskoj evaluaciji u realnim uvjetima.

Iz provedenih simulacijskih i mjernih analiza proizlaze sljedeće preporuke za optimizaciju komunikacijskih parametara, koristiti manju snagu odašiljanja (LP način, +14 dBm) kad god kvaliteta veze to dopušta, biranje manje vrijednosti faktora širenja ( $SF = 7$  umjesto  $SF = 10$ ) ako udaljenost i propagacijski uvjeti to omogućuju, te primjenu veće brzine kodiranja ( $CR = 4/5$ ). Dodatno, potvrđeni prijenosi (ACK) znatno povećavaju potrošnju energije i preporučuje se izbjegavati ih u primjenama koje toleriraju povremeni gubitak paketa, kao što je slanje sporopromjenjivih okolišnih podataka.

Posebno je važno smanjenje veličine paketa, pokazano je da, neovisno o vrijednosti SF-a, smanjenjem veličine korisnog sadržaja opada i energija po korisnom bitu, a time i ukupna potrošnja čvora. U sklopu rada predložen je optimizirani 6-bajtni format paketa za potrebe precizne poljoprivrede koji prenosi istu količinu korisnih informacija kao referentni 11-bajtni

paket, što je postignuto pažljivim odabirom raspona i preciznosti pojedinih mjernih veličina (tablica 4.21).

Glavna razlika u odnosu na ranije objavljene radove jest u načinu modeliranja brzine prijenosa, dosadašnje su analize uglavnom pretpostavljale fiksnu brzinu prijenosa, dok je u ovom radu brzina prijenosa prilagođena stvarnoj veličini paketa, što se pokazalo važnim čimbenikom za točnu procjenu energetske učinkovitosti. Dijelovi navedenih analiza objavljeni su i u znanstvenom članku u časopisu *Sensors* [90].

Među otvorenim pitanjima za daljnji rad ističe se sigurnosni aspekt prijenosa. Senzorski su čvorovi zbog ograničenja energije i memorije slabo prikladni za konvencionalna sigurnosna rješenja, a fizička izloženost na terenu čini ih ranjivima na različite napade. Manji paketi i kraće vrijeme odašiljanja, kakvi su predloženi u ovom radu, smanjuju i prozor mogućeg presretanja, čime kraći paketi posredno doprinose i sigurnosti. Daljnja istraživanja mogu obuhvatiti složenije sigurnosne mehanizme prilagođene LPWAN ograničenjima, kao i protokole za dinamičku promjenu vremena odašiljanja s ciljem dodatnog otežavanja predviđanja prometa od strane potencijalnoga napadača.

## 5. Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra

Kontinuirani rast ljudske populacije i ubrzane klimatske promjene pred suvremenu poljoprivredu postavljaju iznimno složene izazove. Povećana učestalost toplinskih valova i produljenih sušnih razdoblja [91] uz rastuću osjetljivost strateških usjeva poput kukuruza na kombinaciju toplinskog i vodnog stresa [92] ukazuje na potrebu za razvojem novih alata za praćenje i upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom u stvarnom vremenu. U konvencionalnoj biljnoj proizvodnji jedini objektivni podatak prikupljen na razini biljke prinos zrna, dostupan je tek nakon završetka vegetacijskog ciklusa, što onemogućava pravovremenu intervenciju [93].

Daljinsko i proksimalno očitavanje predstavlja ključne tehnologije u ostvarivanju toga pomaka. S jedne strane, satelitske snimke omogućavaju prostorno široko praćenje pojave suše [94,95], dok s druge strane razvoj pristupačnih senzorskih rješenja od bespilotnih letjelica do senzora montiranih na stupove u polju otvara mogućnost gustog vremenskog uzorkovanja na razini pojedine parcele [96,97]. Posebno obećavajućim pokazuju se multispektralni senzori koji bilježe reflektanciju vegetacije u crvenom i bliskom infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra, iz kojih se izvode normalizirani vegetacijski indeksi kao robusne i ponovljive mjere fiziološkog statusa biljke [98,99].

Rolanje lista (*engl. leaf rolling*) reverzibilna je morfološka prilagodba kukuruza na vodni deficit koja se manifestira kao transverzalno savijanje lisne plojke [100]. Ova osobina predstavlja dinamički pokazatelj trenutnog vodnog statusa biljke, čija pravovremena detekcija ima izravne implikacije kako za programe oplemenjivanja na toleranciju abiotskog stresa [101], tako i za sustave potpore odlučivanju u preciznoj poljoprivredi. Dosadašnje metode kvantifikacije rolanja lista temeljile su se isključivo na vizualnoj procjeni uzgajivača [102,103], čime je mogućnost praćenja dinamike stanja biljke bila ograničena.

Algoritmi strojnog učenja pokazali su se učinkovitim alatom za ekstrakciju informacija iz multispektralnih podataka u raznovrsnim primjenama precizne poljoprivrede, od klasifikacije vegetacije [104] i detekcije biljnih bolesti [105] do sezonskog predviđanja prinosa [106]. Spajanje jeftinih multispektralnih senzorskih sklopova s modernim algoritmima strojnog učenja u okvirima IoT-a otvara put prema autonomnom, kontinuiranom praćenju morfo-fiziološkog statusa usjeva bez potrebe za ljudskim nadziranjem [107, 108].

Cilj ovog istraživanja bio je ispitati mogućnost primjene NIR spektrometra AS7263 i četiri algoritama strojnog učenja: jednoslojnog perceptrona (SLP), višeslojnog perceptrona (MLP), konvolucijske neuronske mreže (CNN) i stroja potpornih vektora (SVM) za automatiziranu klasifikaciju rolanja lista kukuruza kao pokazatelja stresa uzrokovanog sušom i visokim temperaturama. Istraživanje je provedeno na 545 eksperimentalnih parcela Poljoprivrednog instituta Osijek u vegetacijskoj sezoni 2021. godine, s naglaskom na validaciji robusnosti modela u promijenjenim agroekološkim uvjetima i procjeni primjenjivosti predloženog pristupa u stvarnom IoT okruženju.

## 5.1. Terenski pokusi

Terenski pokusi provedeni su na pokušalištu Poljoprivrednog instituta Osijek (PIO) u Osijeku, Hrvatska (45°32'N, 18°44'E). Tla na pokušalištu podvrgnuta su plodoredu ječam-soja-kukuruz te su, temeljem redovitih analiza tla, gnojidba i agrotehničke mjere provedene sukladno lokalnim preporukama dobre poljoprivredne prakse i važećim propisima.

U svrhu razvoja novih kultivara PIO organizira višerazinske sortne pokuse koji obuhvaćaju hibride svrstane u grupe rane, rano-srednje, srednje-kasne i kasne zriobe. Zriobu su kategorijalizirali prema FAO sustavu [109], pri čemu su referentni genotipovi poslužili kao kontrolni hibridi za razvrstavanje u grupe od 1 (rana) do 7 (kasna zroba). Uz uzgojne programe, PIO organizira demonstracijske pokuse s 3 do 75 hibrida koji predstavljaju najnovije rezultate oplemenjivanja. Kao certificirani proizvođač sjemena, PIO plasira hibride kukuruza na tržišta jugoistočne i srednje Europe te Bliskog istoka, što jamči značajnu genetsku raznolikost zastupljenu u sortnim pokusima.

Za potrebe ovog istraživanja odabrano je sedam pokusa koji se razlikuju po broju hibrida i skupini zriobe, jedan navodnjavani demonstracijski pokus (DTir) i dva nenavodnjivana demonstracijska pokusa (DTrf i SDTrf). Tip tla u DTrf i DTir bila je antropogenizirani eutrični kambisol, dok je SDTrf postavljen na pjeskovito-ilovastom tlu. Pokus SDTrf time

## 5. Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra

je predstavljao scenarij niske dostupnosti vode, dok DTir nije bio ograničen vodom. Pokus DTir navodnjavan je dva puta s po  $40 \text{ mm m}^{-2}$ , 20. lipnja i 2. srpnja, rotacijskim prskalicama. Pokusi rane (ET), rano-srednje (EMT), srednje-kasne (MLT) i kasne zriobe (LT) posađeni su kao potpuno slučajni blokovi dizajnirani s 25 hibrida u četiri ponavljanja. Detalji o eksperimentalnom postavu prikazani su u Tablici 5.1.

**Tablica 5.1:** Pregled eksperimentalnog dizajna pokusa.

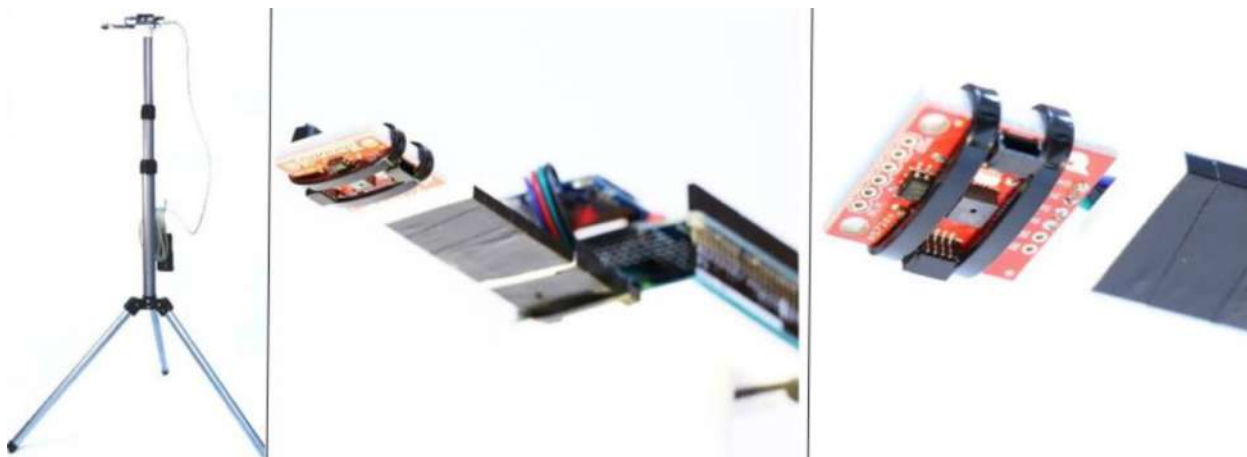
| Pokus | Br. hibrida | Ponavljanja | Parcela ( $\text{m}^2$ ) | FAO     | Datum sjetve      | Metlanje    | Mjerenje (h)              |
|-------|-------------|-------------|--------------------------|---------|-------------------|-------------|---------------------------|
| DTir  | 61          | n.a.        | 50                       | 180–720 | 7. travnja 2021.  | 2.7.–20.7.  | 06:30–08:30 i 12:30–14:30 |
| DTrf  | 64          | n.a.        | 50                       | 180–720 | 16. travnja 2021. | 29.6.–17.7. | isti                      |
| SDTrf | 20          | n.a.        | 50                       | 350–680 | 22. travnja 2021. | 5.7.–16.7.  | isti                      |
| ET    | 25          | 4           | 8,4                      | 210–290 | 8. travnja 2021.  | 29.6.–7.7.  | isti                      |
| EMT   | 25          | 4           | 8,4                      | 350–490 | 22. travnja 2021. | 3.7.–15.7.  | isti                      |
| MLT   | 25          | 4           | 8,4                      | 500–590 | 9. travnja 2021.  | 8.7.–19.7.  | isti                      |
| LT    | 25          | 4           | 8,4                      | >600    | 9. travnja 2021.  | 9.7.–19.7.  | isti                      |

## 5.2. Metodologija

Mjerenja su provedena NIR spektrometrom AMS AS7263 (ams-OSRAM AG, Austrija) sa šest spektralnih kanala raspoređenih u matricu  $3 \times 2$  fotodioda, osjetljivih na valne duljine 610, 680, 730, 760, 810 i 860 nm, s punom širinom na pola maksimuma od 20 nm. Senzor se sastoji od plastičnog kućišta, leće i niza fotodioda s otvorom blende od 0,75 mm i kutom gledanja od  $20,5^\circ$ . Senzor je bio spojen na Arduino Uno razvojnu pločicu, a podatci su se bilježili na SD karticu. Svako mjerenje sadržavalo je prosječnu vrijednost 10 uzastopnih mjerenja u trajanju od 2000 ms, koja je pohranjena s pripadajućom vremenskom oznakom mjerenja.

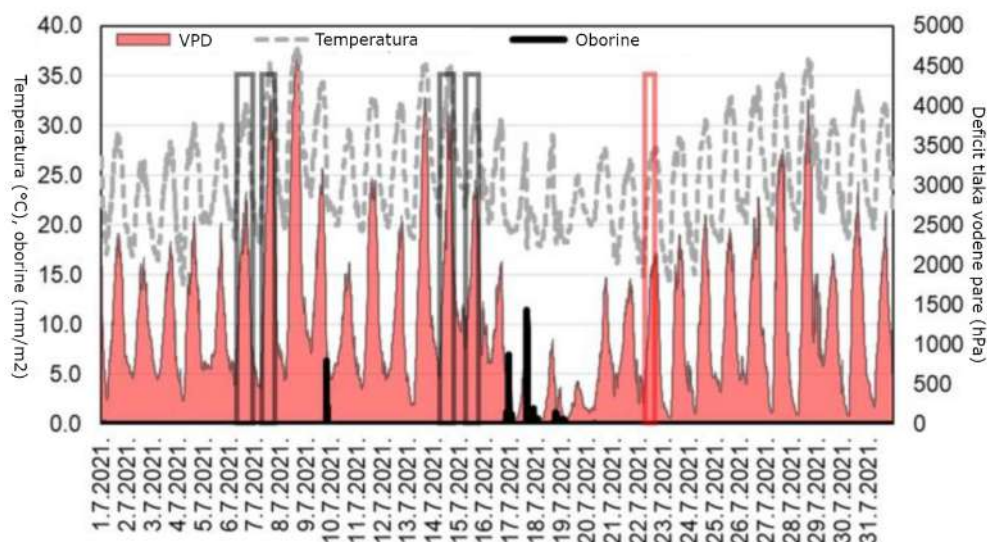
Sklop je postavljen na nosač izrađen tehnologijom 3D ispisa i postavljen na teleskopski tronožac visine 2,2 m, a za napajanje uređaja korišten je prijenosni izvor snage kapaciteta 10 Ah. NIR spektrometar je bio postavljen na visini od 2.2 m m od tla pod kutom od  $90^\circ$ , što je omogućavalo zahvaćanje lisne mase u teorijskoj širini od  $0,6 \text{ m}^2$  na površini tla. Visina od 2.2 m odabrana je jer je samo 16 od 545 parcela imalo biljke niže od 2 m.

## 5. Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra



**Slika 5.1:** Ožičenje senzora postavljenog na stativ koji je korišten za provedbu mjerenja. Na slici, lijevi prikaz prikazuje jedinicu na stativu, središnji prikaz donosi krupni plan ožičenja i 3D ispisanog nosača, dok desni prikaz prikazuje NIR spektrometar AMS AS7263.

Svih 545 parcela mjereno je četiri puta i obilježavano od strane oplemenjivač kukuruza na pojavu rolanja lista (eng. *leaf rolling*, LR), dva puta ujutro i dva puta oko solarnog podneva u sunčanim danima, što je dalo ukupno 2180 označenih mjerenja. Dodatno, parcele DTir, DTrf i SDTrf mjerene su 22. srpnja radi dobivanja validacijskog skupa za validaciju robusnosti modela.



**Slika 5.2:** Prikaz dnevnog hoda temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), deficita tlaka vodene pare-(VPD-a) (hPa) i dnevne količine oborina ( $\text{mm}/\text{m}^2$ ) za srpanj 2021. Sivi okviri označavaju vremena mjerenja, dok crveni okvir označava vrijeme mjerenja skupa podataka za vanjsku validaciju.

Početne ocjene rolanja lista određivane su prema metodologiji opisanoj u [102], na skali od 1 (zelene, uspravne lisne plojke) do 5 (zarolane, mlohаве ili mrtve). Budući da i niže

## 5. Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra

ocjene (veće od 1) indiciraju rolanje lista, čija je pojava bila od primarnog interesa ovog istraživanja, mjerenja su binarno označena s 0 za odsutnost rolanja lista (ispod 15% biljaka unutar parcele s rolanjem) i s 1 za prisutnost rolanja lista (više od 15% biljaka unutar parcele s rolanjem). Prag od 15% odgovara tolerantnom udjelu sekundarnih biljaka koje su u pravilu osjetljivije na rolanjem lista, kako je vidljivo na slici 5.3.



Slika 5.3: (a) Biljke kukuruza bez rolanja listova (LR-) i biljke s rolanja listova (b)

### 5.2.1. Analiza podataka i vegetacijski indeksi

Šest spektralnih očitavanja senzora korišteno je za izračun 15 jedinstvenih, normaliziranih vegetacijskih indeksa (VI). Indeksi su izračunati kao apsolutne vrijednosti omjera razlike i zbroja svaka dva para valnih duljina ( $\lambda_a, \lambda_b$ ):

$$VI_i = \left| \frac{\lambda_b - \lambda_a}{\lambda_a + \lambda_b} \right| \quad (5-1)$$

Sirova očitavanja senzora i VI vrijednosti skalirani su, centrirani i log-transformirani, nakon čega je provedena analiza glavnih komponenti (PCA) u programskom okruženju R [110]. Razlike između parcela s rolanjem lista (LR+) i bez rolanja lista (LR-) testirane su Welc-

hovim dvosmjernim t-testom na razini značajnosti  $\alpha < 0,05$ .

### 5.2.2. Algoritmi strojnog i dubokog učenja

U nastavku su opisana sva četiri algoritma strojnog i dubokog učenja primijenjena u istraživanju, zajedno s matematičkim temeljima koji su podloga njihovoj implementaciji.

#### Jednoslojni perceptron (SLP)

Jednoslojni perceptron (engl. *Single-Layer Perceptron*, SLP) osnovna je arhitektura umjetnih neuronskih mreža. Za ulazni vektor  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$  (gdje je  $d = 21$  značajka: 6 osnovnih mjerenja i 15 VI) izlaz jednog neurona definiran je kao:

$$\hat{y} = f(\mathbf{w}^\top \mathbf{x} + b) \quad (5-2)$$

gdje je  $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^d$  vektor težina,  $b \in \mathbb{R}$  slobodni član (engl. *bias*), a  $f(\cdot)$  aktivacijska funkcija. U ovom istraživanju korištena je ispravljena linearna jedinica (eng. *Rectified Linear Unit*, ReLU):

$$f(z) = \max(0, z) \quad (5-3)$$

Potpuno povezani sloj sadrži 128 neurona. Izlaz sloja prosljeđuje se funkciji softmax koja preslikava logite  $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^K$  ( $K = 2$  klase: LR- i LR+) u distribuciju vjerojatnosti:

$$P(y = k | \mathbf{x}) = \frac{e^{z_k}}{\sum_{j=1}^K e^{z_j}}, \quad k \in \{0, 1\} \quad (5-4)$$

Za treniranje mreže koristi se funkcija unakrsne entropije (engl. *categorical cross-entropy*):

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K y_{ik} \log \hat{y}_{ik} \quad (5-5)$$

gdje je  $N$  broj uzoraka,  $y_{ik} \in \{0, 1\}$  stvarna oznaka klase, a  $\hat{y}_{ik}$  predviđena vjerojatnost. Minimizacija  $\mathcal{L}$  vrši se algoritmom gradijentnog spusta uz metodu povratnog prostiranja pogreške (engl. *backpropagation*):

$$\mathbf{w}^{(t+1)} = \mathbf{w}^{(t)} - \eta \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{w}^{(t)}} \quad (5-6)$$

5. *Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra*

---

gdje je  $\eta$  stopa učenja (engl. *learning rate*), a gradijent  $\partial\mathcal{L}/\partial\mathbf{w}$  izračunava se primjenom lančanog pravila deriviranja (engl. *chain rule*):

$$\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\mathbf{w}} = \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\hat{y}} \cdot \frac{\partial\hat{y}}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial\mathbf{w}} \quad (5-7)$$

Treniranje je provedeno kroz 100 epoha s veličinom skupa od 16 uzoraka u sklopu biblioteke TensorFlow [111].

### Višeslojni perceptron (MLP)

Višeslojni perceptron (engl. *Multi-Layer Perceptron*, MLP) proširuje SLP dodavanjem jednog ili više skrivenih slojeva. Propagacija signala kroz mrežu s  $L$  slojeva odvija se rekursivno:

$$\mathbf{h}^{(l)} = f^{(l)}(\mathbf{W}^{(l)}\mathbf{h}^{(l-1)} + \mathbf{b}^{(l)}), \quad l = 1, \dots, L \quad (5-8)$$

gdje je  $\mathbf{h}^{(0)} = \mathbf{x}$  ulazni vektor,  $\mathbf{W}^{(l)}$  matrica težina  $l$ -tog sloja,  $\mathbf{b}^{(l)}$  vektor slobodnih članova, a  $f^{(l)}$  aktivacijska funkcija. U ovom istraživanju MLP se sastoji od prvog potpuno povezanog sloja s 128 neurona (ReLU) i drugog skrivenog sloja s 32 neurona (ReLU), nakon čega slijedi izravnavajući sloj (eng. *flatten*) i softmax funkcija.

Gradijent funkcije gubitka s obzirom na težine  $l$ -tog sloja računa se primjenom lančanog pravila unatrag kroz sve slojeve:

$$\boldsymbol{\delta}^{(l)} = (\mathbf{W}^{(l+1)})^\top \boldsymbol{\delta}^{(l+1)} \odot f'^{(l)}(\mathbf{z}^{(l)}) \quad (5-9)$$

$$\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\mathbf{W}^{(l)}} = \boldsymbol{\delta}^{(l)} (\mathbf{h}^{(l-1)})^\top \quad (5-10)$$

gdje  $\odot$  označava element-po-element množenje (Hadamardov produkt),  $\boldsymbol{\delta}^{(L)}$  je gradijent izlaznog sloja, a  $f'(\cdot)$  derivacija aktivacijske funkcije. Za ReLU vrijedi:

$$f'(z) = \begin{cases} 1, & z > 0 \\ 0, & z \leq 0 \end{cases} \quad (5-11)$$

Dodatni skriveni sloj u MLP-u, u odnosu na SLP, ključan je za suzbijanje pretreniranosti (eng. *overfitting*), budući da slojevi s manjim brojem neurona djeluju kao informacijska uska

grla koja prisiljavaju mrežu da generalizira naučene značajke.

## Konvolucijska neuronska mreža (CNN)

Konvolucijska neuronska mreža (eng. *Convolutional Neural Network*, CNN) namijenjena je obradi podataka s prostornom ili vremenskom strukturom. Za jednodimenzionalni ulazni signal  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{1 \times d}$ , konvolucijska operacija s filtrom  $\mathbf{k} \in \mathbb{R}^{1 \times m}$  definirana je kao:

$$(x * k)[n] = \sum_{j=0}^{m-1} x[n+j] k[j] \quad (5-12)$$

gdje je  $n$  indeks pozicije izlazne mape značajki, a  $m$  veličina filtra (eng. *kernel size*). Primjenom  $F$  filtara dobiva se  $F$  mapa značajki. U ovom istraživanju korišten je jedan 1D konvolucijski sloj s 64 filtra, nakon čega slijede dva potpuno povezana skrivena sloja s 48 i 24 neurona (ReLU), izravnavajući sloj te softmax funkcija na izlazu. Arhitektura CNN-a prikazana je na Slici 5.4.

Aktivacijski izlaz konvolucijskog sloja za  $f$ -ti filtar glasi:

$$h_f[n] = f\left(\sum_c (x_c * k_{f,c})[n] + b_f\right) \quad (5-13)$$

gdje  $c$  indeksira ulazne kanale,  $k_{f,c}$  je filtar  $f$  za kanal  $c$ , a  $b_f$  slobodni član. Gradijent gubitka s obzirom na filtar  $k_{f,c}$  jednak je:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial k_{f,c}[j]} = \sum_n \delta_f[n] \cdot x_c[n+j] \quad (5-14)$$

gdje  $\delta_f[n]$  označava grešku propagiranu unatrag na poziciji  $n$  za filtar  $f$ .

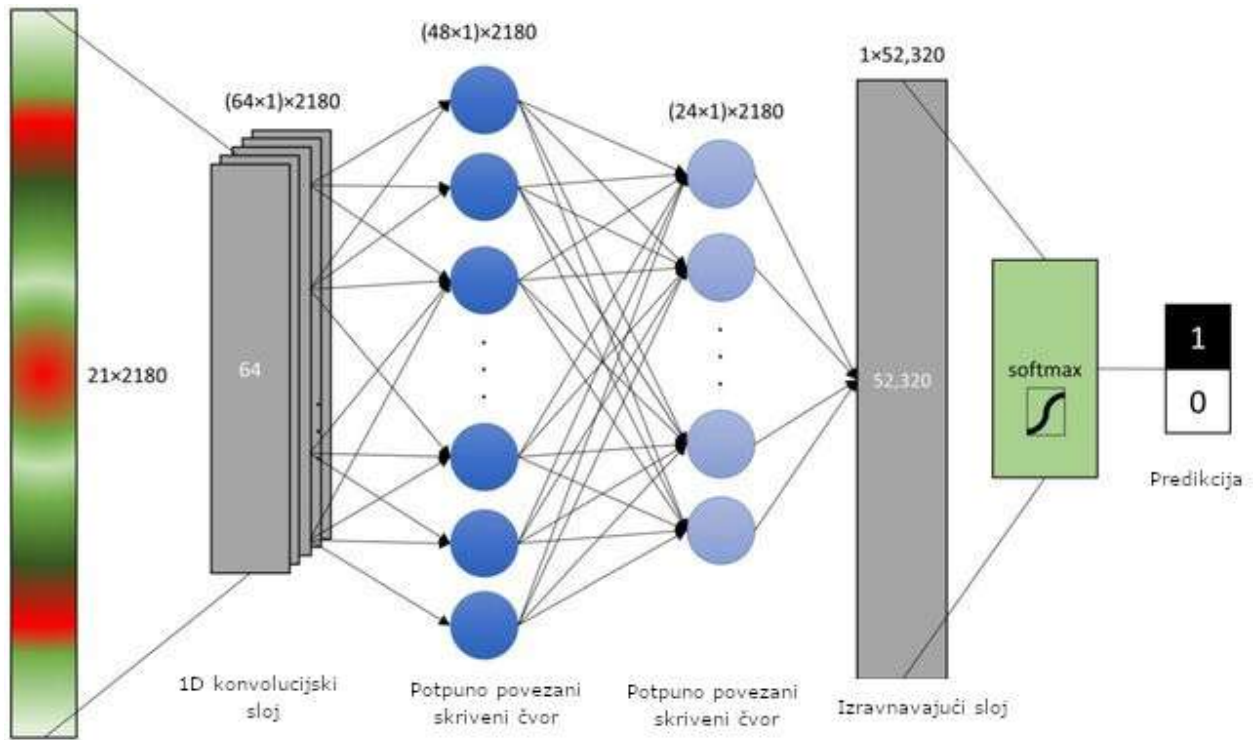
## Stroj potpornih vektora (SVM)

Stroj potpornih vektora (engl. *Support Vector Machine*, SVM) je diskriminacijski klasifikator koji pronalazi hiperravninu s maksimalnom marginom između klasa. Za linearno odvojiv problem, hiperravnina je definirana kao:

$$\mathbf{w}^\top \mathbf{x} + b = 0 \quad (5-15)$$

Margina između klasa iznosi  $\frac{2}{\|\mathbf{w}\|}$ , a optimalni parametri dobivaju se rješavanjem problema konveksne optimizacije:

5. Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra



**Slika 5.4:** Shematski prikaz konvolucijske neuronske mreže (CNN) s jednim konvolucijskim slojem, 2 skrivena potpuno povezana čvora, izravnavajućim slojem i softmax funkcijom.

$$\min_{\mathbf{w}, b} \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \quad \text{uz uvjet: } y_i(\mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i + b) \geq 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (5-16)$$

gdje  $y_i \in \{-1, +1\}$  označava klasu  $i$ -tog uzorka. Za podatke koji nisu linearno odvojivi uvodi se *mekana granica* (engl. *soft margin*) uz kazneni parametar  $C > 0$  koji regulira kompromis između maksimizacije margine i minimizacije pogrešne klasifikacije:

$$\min_{\mathbf{w}, b, \xi} \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i \quad \text{uz uvjete: } y_i(\mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i + b) \geq 1 - \xi_i, \quad \xi_i \geq 0 \quad (5-17)$$

gdje su  $\xi_i \geq 0$  varijable zaostalosti (eng. *slack variables*). Dualni oblik primalnog problema (jednadžba 5-17) glasi:

$$\max_{\alpha} \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j \mathbf{x}_i^\top \mathbf{x}_j \quad \text{uz uvjete: } 0 \leq \alpha_i \leq C, \quad \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \quad (5-18)$$

Optimalnu granicu razlučivanja definiraju samo oni uzorci  $\mathbf{x}_i$  za koje je  $\alpha_i > 0$  — tzv. potporni vektori (engl. *support vectors*). U ovom istraživanju korištena je linearna jezgra (engl. *linear kernel*) s parametrom penalizacije  $C = 1$ , implementirana u modulu `svm`

biblioteke `scikit-learn`. Linearni kernel ekvivalentan je Tihonovljevoj regularizaciji (L2 norma), što SVM-u daje izvrsnu sposobnost ekstrakcije značajki u niskodimenzionalnom prostoru definiranom PCA-om.

### 5.2.3. Postupci validacije modela

U istraživanju su primijenjena tri postupka validacije modela koristeći skup za treniranje ( $n = 2180$ ) i validacijski skup ( $n = 145$ ):

1. **Stratificirana 5-struka križna validacija** provedena nad podskupom od 85% (1853) zapisa iz skupa za trening, pri čemu se unutar svake iteracije model trenira na 80% i validira na 20% tog podskupa.
2. **Validacija nasumičnim podskupom** na preostalih 15% (327) zapisa iz skupa za trening, s generatorom slučajnih brojeva postavljenim na 109, što osigurava ponovljivost podjele i rezultata.
3. **Validacija vanjskim skupom** koji se sastoji od 145 neovisnih zapisa prikupljenih 22. srpnja 2021.

Radi reproducibilnosti rezultata isti su podskupovi korišteni za validaciju svih modela.

### Metrike vrednovanja modela

Uspješnost modela vrednovana je mjerama točnosti (engl. *accuracy*), preciznosti (engl. *precision*), odziva (engl. *recall*) i  $F_1$  mjere. Gdje su istinito pozitivni (TP), istinito negativni (TN), lažno pozitivni (FP) i lažno negativni (FN) elementi konfuzijske matrice.

Tada vrijedi:

$$\text{Točnost} = \frac{\text{TN} + \text{TP}}{n} \quad (5-19)$$

$$\text{Preciznost} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (5-20)$$

$$\text{Odziv} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (5-21)$$

$$F_1 = 2 \cdot \frac{\text{Preciznost} \cdot \text{Odziv}}{\text{Preciznost} + \text{Odziv}} \quad (5-22)$$

gdje je  $n$  ukupan broj uzoraka.  $F_1$  mjera harmonijska je sredina preciznosti i odziva te posebno dobro opisuje uspješnost modela u slučaju neravnomjerne raspodjele klasa (eng. *class imbalance*), što je relevantan slučaj u ovom istraživanju jer parcele bez rolanja lista (LR–) čine gotovo 75% skupa za treniranje. Klasifikacije oplemenjivača u solarnom podnevu (opisane u potpoglavlju 5.2) korištene su kao referentna istina (eng. *ground truth*) u svim metrikama vrednovanja.

### 5.3. Rezultati

Sva mjerenja u skupu za treniranje provedena su u iznimno sušnim uvjetima uz visoke temperature i visok deficit tlaka vodene pare. Kada je prikupljen vanjski skup za validaciju, meteorološki uvjeti promijenili su se prema izrazito mokrom razdoblju, što je rezultiralo malim brojem parcela (svega 7) s vidljivim rolanjem lista. Analiza originalnih obilježja pokazala je prepoznatljive obrasce povećanja i smanjenja vrijednosti u obama skupovima podataka za trening ( $n = 2180$ ) i na skupu za validaciju ( $n = 145$ ) za parcele LR– i za parcele LR+, tablica 5.2. Visoke standardne devijacije sirovih valnih duljina upućuju na promjene u kvaliteti osvjetljenja, dok su devijacije smanjene u vrijednostima VI, što odražava normalizacijski učinak tih indeksa.

Zanimljivo je da su sve vrijednosti VI smanjene kod LR+ u obama skupovima, osim  $VI_{680610}$  koji je blago povećan u LR+. Prema Welchovom dvosmjernom t-testu, sve razlike između LR– i LR+ bile su statistički značajne u trening skupu, i u originalnim obilježjima i u VI vrijednostima. U validacijskom skupu, statistički značajne razlike uočene su samo u očitavanjima na 610 i 680 nm. Među VI vrijednostima, izostanak značajnih razlika opažen je za sve indekse s valnom duljinom 730 nm kao nazivnikom i 860 nm kao brojnikom.

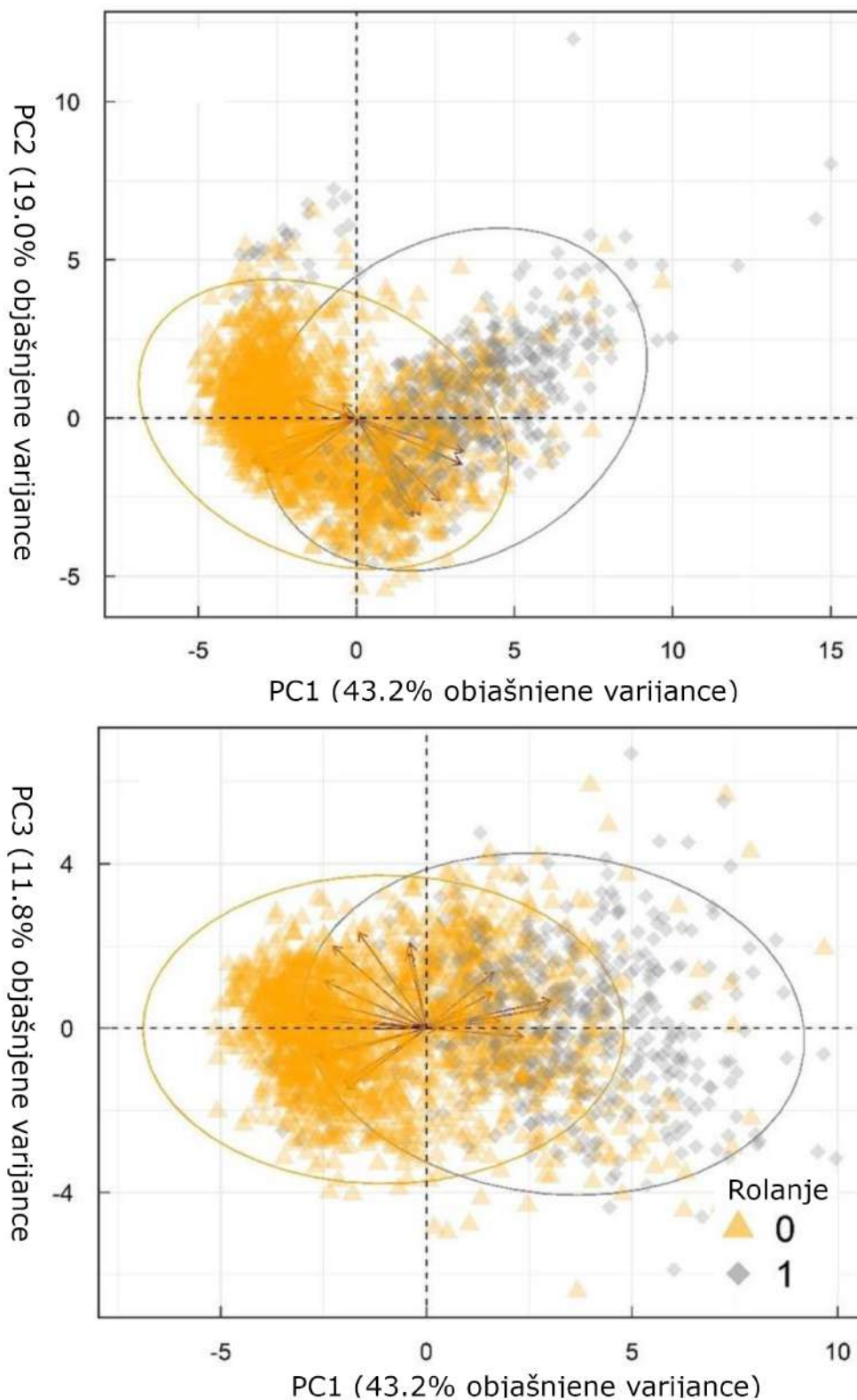
5. Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra

**Tablica 5.2:** Sirova očitavanja senzora na šest valnih duljina i 15 vrijednosti normaliziranih vegetacijskih indeksa (VI) izračunatih iz jedinstvenih kombinacija šest valnih duljina, izraženih kao srednja vrijednost  $\pm$  standardna devijacija za parcele kukuruza s rolanjem lista (LR+) i bez rolanja lista (LR-) u trening ( $n = 2180$ ) i validacijskom ( $n = 145$ ) skupu podataka izmjerenih multispektralnim senzorom. Stupac  $p$  označava značajnost prema dvo-smjernom Welchovom  $t$ -testu pri  $\alpha < 0,05$  (\*),  $< 0,01$  (\*\*),  $< 0,001$  (\*\*\*). Vrijednosti  $p > 0,05$  označene su kao neznačajne (n.z.).

| Obilježje            | Trening skup ( $n = 2180$ ) |                   |     | Vanjski skup ( $n = 144$ ) |                   |      |
|----------------------|-----------------------------|-------------------|-----|----------------------------|-------------------|------|
|                      | LR- (0)                     | LR+ (1)           | $p$ | LR- (0)                    | LR+ (1)           | $p$  |
| $n$                  | 1631                        | 549               |     | 139                        | 7                 |      |
| 610                  | 3309 $\pm$ 1974             | 5769 $\pm$ 1971   | *** | 4131 $\pm$ 1239            | 8047 $\pm$ 2398   | **   |
| 680                  | 3207 $\pm$ 2010             | 6459 $\pm$ 2151   | *** | 3886 $\pm$ 991             | 7220 $\pm$ 2118   | **   |
| 730                  | 7916 $\pm$ 4211             | 10721 $\pm$ 3514  | *** | 12097 $\pm$ 3171           | 12927 $\pm$ 4985  | n.z. |
| 760                  | 12809 $\pm$ 5873            | 15143 $\pm$ 4967  | *** | 19996 $\pm$ 5037           | 18570 $\pm$ 5429  | n.z. |
| 810                  | 14895 $\pm$ 6610            | 16900 $\pm$ 5552  | *** | 22564 $\pm$ 5671           | 19548 $\pm$ 5309  | n.z. |
| 860                  | 14831 $\pm$ 6418            | 17208 $\pm$ 5139  | *** | 22762 $\pm$ 6197           | 20578 $\pm$ 4996  | n.z. |
| VI <sub>680610</sub> | 0,082 $\pm$ 0,069           | 0,109 $\pm$ 0,082 | *** | 0,101 $\pm$ 0,081          | 0,147 $\pm$ 0,107 | n.z. |
| VI <sub>730610</sub> | 0,417 $\pm$ 0,107           | 0,299 $\pm$ 0,094 | *** | 0,489 $\pm$ 0,091          | 0,218 $\pm$ 0,075 | ***  |
| VI <sub>760610</sub> | 0,600 $\pm$ 0,107           | 0,445 $\pm$ 0,102 | *** | 0,651 $\pm$ 0,095          | 0,395 $\pm$ 0,048 | ***  |
| VI <sub>810610</sub> | 0,647 $\pm$ 0,096           | 0,488 $\pm$ 0,097 | *** | 0,683 $\pm$ 0,093          | 0,418 $\pm$ 0,065 | ***  |
| VI <sub>860610</sub> | 0,645 $\pm$ 0,101           | 0,497 $\pm$ 0,099 | *** | 0,680 $\pm$ 0,109          | 0,440 $\pm$ 0,095 | ***  |
| VI <sub>730680</sub> | 0,431 $\pm$ 0,130           | 0,249 $\pm$ 0,126 | *** | 0,508 $\pm$ 0,089          | 0,253 $\pm$ 0,215 | *    |
| VI <sub>760680</sub> | 0,611 $\pm$ 0,116           | 0,397 $\pm$ 0,132 | *** | 0,670 $\pm$ 0,062          | 0,426 $\pm$ 0,150 | **   |
| VI <sub>810680</sub> | 0,656 $\pm$ 0,110           | 0,440 $\pm$ 0,139 | *** | 0,699 $\pm$ 0,072          | 0,450 $\pm$ 0,138 | **   |
| VI <sub>860680</sub> | 0,657 $\pm$ 0,104           | 0,452 $\pm$ 0,121 | *** | 0,699 $\pm$ 0,078          | 0,474 $\pm$ 0,125 | **   |
| VI <sub>760730</sub> | 0,250 $\pm$ 0,079           | 0,173 $\pm$ 0,059 | *** | 0,245 $\pm$ 0,080          | 0,193 $\pm$ 0,075 | n.z. |
| VI <sub>810730</sub> | 0,320 $\pm$ 0,099           | 0,225 $\pm$ 0,088 | *** | 0,299 $\pm$ 0,113          | 0,219 $\pm$ 0,102 | n.z. |
| VI <sub>860730</sub> | 0,318 $\pm$ 0,128           | 0,236 $\pm$ 0,104 | *** | 0,301 $\pm$ 0,134          | 0,246 $\pm$ 0,141 | n.z. |
| VI <sub>810760</sub> | 0,088 $\pm$ 0,060           | 0,069 $\pm$ 0,049 | *** | 0,083 $\pm$ 0,057          | 0,041 $\pm$ 0,022 | ***  |
| VI <sub>860760</sub> | 0,102 $\pm$ 0,073           | 0,086 $\pm$ 0,063 | *** | 0,093 $\pm$ 0,074          | 0,087 $\pm$ 0,052 | n.z. |
| VI <sub>860810</sub> | 0,057 $\pm$ 0,043           | 0,053 $\pm$ 0,037 | *   | 0,050 $\pm$ 0,037          | 0,047 $\pm$ 0,032 | n.z. |

Analiza glavnih komponenti (Slika 5.5) pokazala je raznolike i značajne korelacije između originalnih varijabli i njihovih projekcija (PC), prikazanih kao eigenvektori.

5. Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra

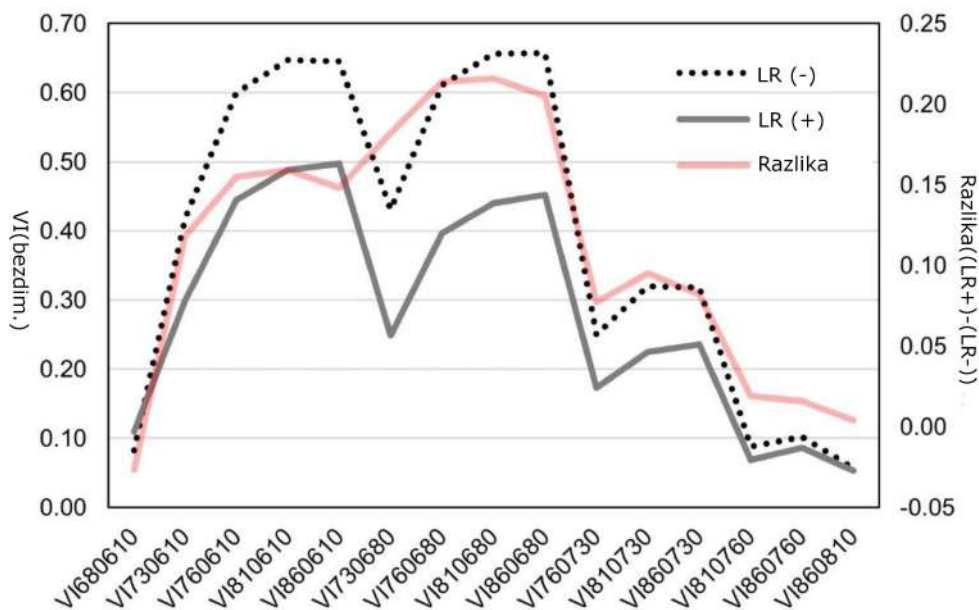


**Slika 5.5:** Analiza glavnih komponenti (PCA) očitavanja multispektralnog senzora i pripadajućih normaliziranih diferencijskih vegetacijskih indeksa. Prikaz (a) odnosi se na prvu i drugu glavnu komponentu, dok su prva i treća glavna komponenta prikazane pod (b). Strelice predstavljaju vlastite vektore varijabli (Tablica S1), a elipse označavaju 95-postotne intervale pouzdanosti za svaku skupinu na temelju Gaussove razdiobe.

## 5. Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra

Prve tri glavne komponente objasnile su 74,0% ukupne varijabilnosti u skupu podataka, pri čemu su pojedine PC objašnjavale 43,2, 19,0 i 11,8% varijance. PCA je potvrdila obrasce koji su uočeni u Tablici 5.2, prikazujući dvije djelomično preklapajuće, ali odvojive grupe promjena valnih duljina u uvjetima rolanja lista unutar triju latentnih varijabli. Unatoč preklapanju dijela odgovora u trodimenzionalnoj hiper-ravnini (3 PC), sposobnost PCA da zahvati 74% varijance između grupa samo s tri komponente, ukazuje na visoku gustoću informacija u malom broju temeljnih obilježja.

Petnaest normaliziranih vegetacijskih indeksa procijenjenih u ovom istraživanju pokazalo je značajnu varijabilnost između parcela s rolanja lista i parcela bez rolanja lista. Između valnih duljina iz crvenog spektra (610 i 680 nm) uočena je manja razlika između LR– i LR+ (Slika 5.6). Isti obrazac uočen je kod VI koji procjenjuju valne duljine iznad 700 nm. Najveće razlike između LR– i LR+ očitavanja uočene su u VI koji kombiniraju valne duljine iznad 760 nm i ispod 700 nm.



**Slika 5.6:** Graf različitih normaliziranih indeksa razlike vegetacije (VI) u proizvoljnim jedinicama (bez dimenzionalno) između dijagrama koji prikazuju rolanje lista (LR+) i dijagrama bez rolanja lista (LR-) i njihovih odgovarajućih razlika.

### 5.4. Vrednovanje algoritama strojnog učenja za predviđanje rolanja lista

U stratificiranoj 5-strukoj križnoj validaciji uočena je značajna varijabilnost između uspješnosti različitih modela (Tablica 5.3). Najveća točnost predviđanja uz najmanji stan-

5. *Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra*

dardni odmak uočena je za SLP, zatim CNN, SVM i MLP. Najveća preciznost u križnoj validaciji opažena je za SVM, praćena drugom najvišom standardnom devijacijom između sklopova. Odziv je bio najveći za SLP, a zatim za CNN. Najviša  $F_1$  mjera uočena je za CNN. Računalna vremena rasla su s kompleksnošću modela u redosljedu SLP < MLP < CNN < SVM.

**Tablica 5.3:** *Rezultati dvaju postupaka validacije za jednoslojni i višeslojni perceptron (SLP i MLP), konvolucijsku neuronsku mrežu (CNN) i stroj potpornih vektora (SVM) na skupu za treniranje ( $n = 2180$ ). Vrijednost u zagradi za stratificiranu 5-struku križnu validaciju predstavlja standardnu devijaciju točnosti između sklopova.*

| Model | Validacija | N         | Točnost      | Preciznost   | Odziv         | $F_1$        | CPU (s) |
|-------|------------|-----------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------|
| SLP   | 5-str. KV  | 1853/2180 | 83,76 (2,29) | 69,67 (8,26) | 66,52 (5,72)  | 65,30 (3,02) | 38,6    |
| MLP   |            |           | 81,27 (1,75) | 64,42 (4,52) | 63,91 (10,44) | 61,13 (5,50) | 49,8    |
| CNN   |            |           | 83,49 (2,53) | 68,88 (6,14) | 64,13 (8,10)  | 64,55 (4,82) | 94,0    |
| SVM   |            |           | 82,68 (1,14) | 70,85 (8,01) | 53,91 (7,44)  | 60,52 (3,50) | 469,0   |
| SLP   | Nasumični  | 327/2180  | 58,41        | 39,46        | 98,88         | 56,41        | 10,0    |
| MLP   | podskup    |           | 86,54        | 74,19        | 77,53         | 75,82        | 12,6    |
| CNN   |            |           | 87,77        | 75,26        | 82,02         | 78,49        | 24,0    |
| SVM   |            |           | 88,69        | 84,21        | 71,91         | 77,58        | 136,0   |

Međutim, pri pokušaju generalizacije rezultata kalibriranih modela na nasumični 15% podskup, točnosti predviđanja su se promijenile. SLP je pokazao najnižu točnost modela, ali uz visoki odziv. Prema metrikama preciznosti, model je klasificirao velik broj uzoraka kao pozitivne (puno lažno pozitivnih), a zatim je postigao velik broj ispravnih detekcija. Takvi rezultati upućuju na pretreniranost u arhitekturi modela, što je vjerojatno uzrokovano velikim brojem neurona (128) u samo jednom sloju. Ukratko, model je bio sposoban izdvojiti obilježja povezana s rolanjem lista u stratificiranom skupu, ali pri pokušaju generalizacije na nepovezani skup podataka metrike uspješnosti dramatično su pale.

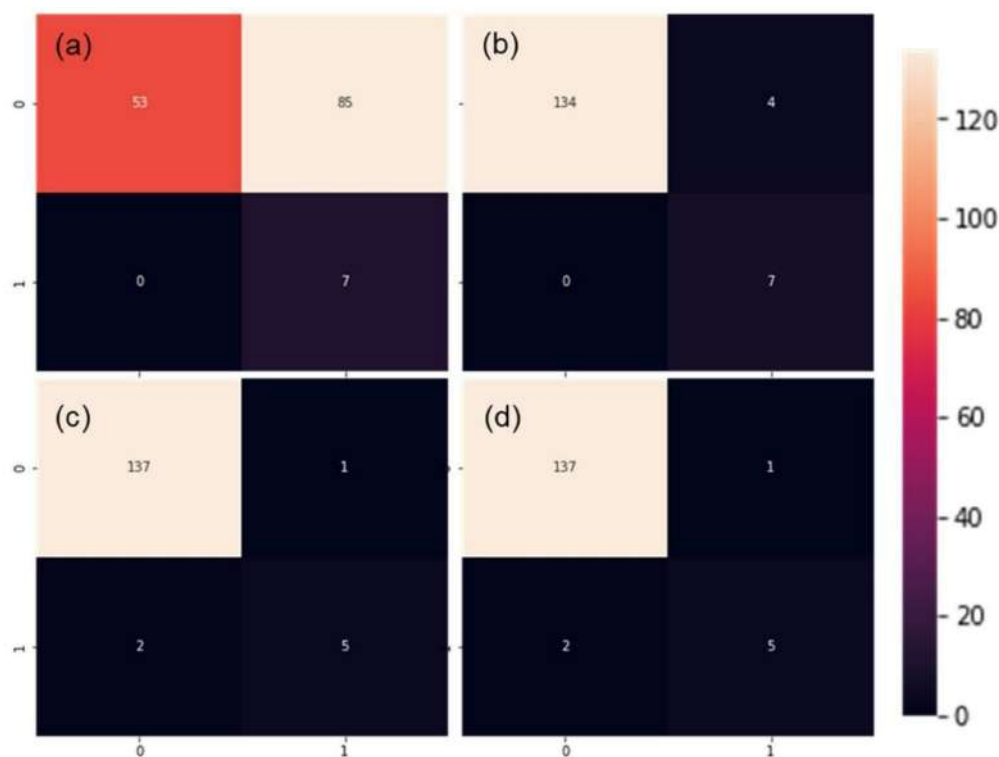
Model SVM pokazao je najveću točnost, ali prema visokoj preciznosti i najnižem odzivu bio je najkonzervativniji model s malim brojem lažno pozitivnih klasifikacija. Visoka točnost i sposobnost generalizacije ovog modela u skladu su s rezultatima PCA-e te s mogućnošću jednostavne redukcije dimenzionalnosti (L2 norma u SVC linearnoj jezgri) za olakšavanje učinkovite ekstrakcije obilježja.

MLP i CNN pokazali su manje konzervativne vrijednosti preciznosti uz drugu najveću točnost (CNN) i 9,04% nižu preciznost u usporedbi s SVM-om. Višeslojni perceptron i CNN pokazali su dobru sposobnost generalizacije zahvaljujući dodatnim slojevima koji su ublažili pretreniranost uočenu kod SLP-a. Ukupno gledajući, SVM i CNN imaju najbolju ukupnu uspješnost, s većom točnošću i preciznošću kod SVM-a te većim odzivom kod CNN-a, što

## 5. Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra

potvrđuju i najviše vrijednosti  $F_1$  mjere.

Uspješnost modela u postupcima validacije bila je u velikoj mjeri usklađena s rezultatima dobivenima na validacijskom skupu podataka. Međutim, zbog obilnih oborina koje su se dogodile između prikupljanja trening i validacijskog skupa (Slika 5.2), u validacijskom je skupu zabilježen ograničen broj parcela s izraženim rolanjem lista. Ukupno je identificirano sedam takvih parcela, od kojih su četiri pripadale SDTrf varijanti s pjeskovito-ilovastim tlom. Unatoč malom broju uzoraka, ovakav skup podataka predstavljao je zahtjevan test robusnosti modela zbog promjena u okolišnim uvjetima i fiziološkom stanju biljaka.

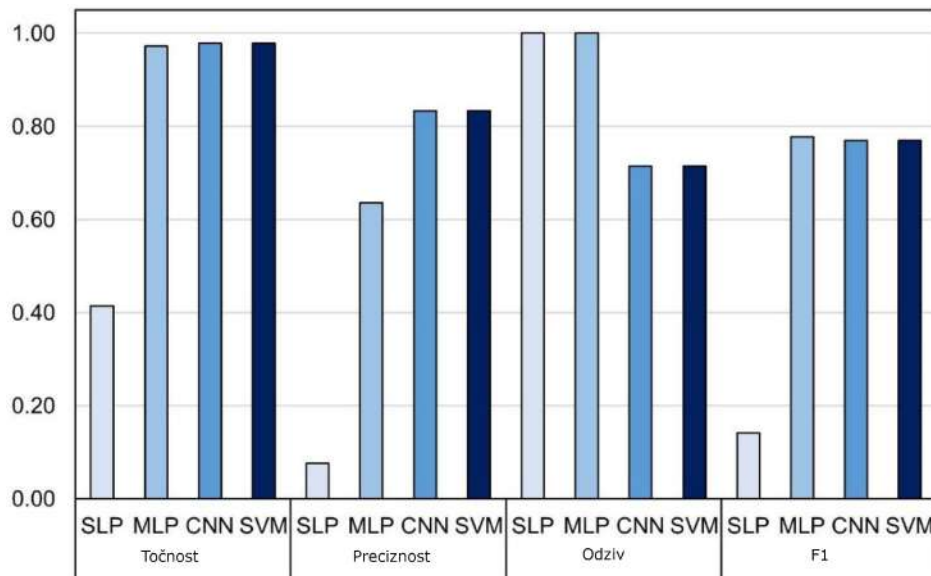


**Slika 5.7:** Performanse modela jednoslojnog i višeslojnog perceptrona (a, b), konvolucijske neuronske mreže (c) te metode potpornih vektora (d) na vanjskom skupu podataka. Kvadranti s lijeva na desno te odozgo prema dolje predstavljaju stvarno negativne (TN), lažno pozitivne (FP), lažno negativne (FN) i stvarno pozitivne (TP) vrijednosti.

Jednoslojni perceptron pokazao je slabu sposobnost generalizacije, što se očitovalo u velikom broju lažno pozitivnih klasifikacija. Posljedično, ostvarena je vrlo niska preciznost od 7,6 %, što je rezultiralo smanjenjem  $F_1$  mjere na svega 14,1 %. Nasuprot tome, višeslojni perceptron (MLP) ostvario je najbolju ukupnu izvedbu. Model je ispravno klasificirao svih sedam pozitivnih slučajeva, uz relativno nizak broj lažno pozitivnih klasifikacija i izostanak istinito negativnih, čime je postignuta  $F_1$  mjera od 77,7 % u validaciji na validacijskom skupu (Slika 5.7a).

## 5. Detekcija rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu primjenom modela strojnog učenja na temelju podataka NIR spektrometra

Modeli temeljeni na konvolucijskim neuronskim mrežama (CNN) i metodama potpornih vektora (SVM) ostvarili su nešto niže  $F_1$  vrijednosti (76,9 %), što se može pripisati nemogućnosti potpune identifikacije svih sedam parcela s prisutnim simptomima (LR+). Iako su njihovi rezultati usporedivi s MLP-om, navedeno ograničenje ukazuje na nešto slabiju osjetljivost u odnosu na najbolje rangirani model, slika 5.8.



**Slika 5.8:** Metrike performansi četiriju testiranih modela: jednoslojnog i višeslojnog perceptrona (SLP i MLP), konvolucijske neuronske mreže (CNN) te metode potpornih vektora (SVM) na vanjskom skupu podataka.

### 5.5. Rasprava

Fenotipizacija odgovora na sušu u stvarnom vremenu predstavlja novu granicu u oplemenjivanju usjeva i preciznoj poljoprivredi [93], međutim, napredak u ovom području ograničen je visokim troškovima mjernih uređaja poput bespilotnih letjelica i hiperspektralnih kamera. To nameće potrebu za novim, jeftinim rješenjima koja mogu učinkovito procjenjivati morfološki status biljaka u stvarnom vremenu. Vrući i suhi uvjeti tijekom fenotipizacije u ovom istraživanju, unutar velikog broja hibrida kukuruza, omogućili su robusnu procjenu velikog broja eksperimentalnih parcela prototipom NIR spekrometra namijenjenog primjeni u okvirima IoT-a i precizne poljoprivrede. Senzor je korišten za procjenu rolanja lista, osobine koja je pokazala ulogu u prilagodbi uvjetima suše i toplinskog stresa [101].

Postoje različite metode za procjenu rolanja lista [103, 112] i dobro je poznato da različiti hibridi pokazuju različite stupnjeve rolanja lisne plojke, osobito s obzirom na promjenjivu dostupnost vode i temperaturne promjene. Međutim, cilj ovog rada bio je procijeniti može

li se pojava rolanja lista, unatoč različitim razinama fenotipskog izražaja, detektirati ili predvidjeti isključivo na temelju osnovnih očitavanja NIR spektrometra u crvenom i bliskom infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra.

Na početku rolanja lista odvijaju se mnoge fiziološke promjene, kao što su smanjenje fotosintetičke aktivnosti [113] i promjene u metaboličkim mehanizmima genske regulacije [114]. Smanjenje fotosintetičke aktivnosti trebalo bi biti najvidljivije na valnim duljinama između 710 i 740 nm, koje zahvaćaju fluorescencijsko preklapanje fotosustava I i II, te na 685 nm, što predstavlja vrh fluorescencije fotosustava II [115]. Te valne duljine nalaze se unutar spektralnih vrhova koje zahvaćaju fotodiode od 680 i 730 nm u ovom istraživanju, što je potvrđeno smanjenjem VI vrijednosti koje procjenjuju valne duljine 680 i 730 nm.

Stresna prilagodba, kao što je smanjenje fotokemijske aktivnosti, uključuje i translokaciju biokemikalija [116]. Dodatno, u odgovorima poput rolanja lista, prethodno nezasjenjeni biljni dijelovi postaju izloženi sunčevoj svjetlosti, kao što su abaksijalne površine listova koje imaju različite mješavine pigmenata u usporedbi s adaksijalnim površinama [117]. Reflektancija između 700 i 980 nm, gdje se nalaze spektralni odgovori smeđih pigmenata zajedno sa signalima fluorescencije klorofila, može pružiti uvid u biokemijski, a time i fiziološki status biljke [118]. Izloženost abaksijalnih površina listova sunčevoj svjetlosti otkriva crveno-smeđe pigmente zbog vodnog deficita, mijenjajući optička svojstva lista [119]. Kombinacija vodnog i toplinskog stresa, kakva je bila prisutna u ovom istraživanju, očekivano producira najvidljiviji odgovor u reflektanciji lista na valnim duljinama bliskim reflektanciji smeđih pigmenata [120]. To je potvrđeno i u ovim rezultatima, gdje razlika između LR<sup>-</sup> i LR<sup>+</sup> raste u indeksima koji kombiniraju valne duljine iznad 760 nm i ispod 700 nm (Slika 5.6). Među tim indeksima je i uobičajeni NDVI koji kombinira reflektanciju na otprilike 680 i 770 nm [121].

Zbog ubrzanih klimatskih promjena [122], postoji velik pritisak za razvoj novih proksimalnih i daljinskih, podatkovnih rješenja visoke propusnosti za fenotipizaciju biljaka, opravdan nedostatkom radne snage i povećanom potražnjom za visokokvalitetnim podacima [123]. Senzorski sklop korišten u ovom istraživanju ima za cilj pružiti jeftinu alternativu ovome problemu, tako da povećana gustoća senzorskih sklopova koja pruža bolje prostorno uzorkovanje može nadoknaditi veću propusnost bespilotnih letjelica uz niže troškove. Nadalje, u okviru predložene IoT primjene, istodobno prikupljanje podataka u stvarnom vremenu moglo bi osigurati veću gustoću informacija, bez potrebe za ljudskim nadzorom [107]. Spajanje

takvih dostignuća s metodologijom strojnog učenja trebalo bi konvergirati u nove slojeve informacija u paradigmi praćenja biljaka za tranziciju prema Poljoprivredi 4.0 [108].

U ovom istraživanju uočene su samo marginalne razlike između MLP-a i CNN-a, pri čemu oba modela pokazuju dobru sposobnost generalizacije zahvaljujući dodatnim slojevima koji suzbijaju pretreniranost pronađenu kod SLP-a. U stratificiranoj križnoj validaciji SLP je pokazao najvišu  $F_1$  mjeru, praćen CNN-om. Međutim, drastičan pad točnosti SLP-a na nestratificiranim skupovima podataka može se promatrati iz perspektive slabih sposobnosti generalizacije mreža s malim brojem slojeva i pretjeranim brojem neurona [124], što je očigledno slučaj s SLP-om u ovom istraživanju.

Istraživanje na biljci *Bromus inermis* korištenjem hiperspektralnih indeksa i triju algoritama strojnog učenja CNN, SVM i slučajnih šuma pokazalo je mogućnost klasifikacije suše primjenom strojnog učenja, s najvišim točnostima predviđanja korištenjem SVM [116]. U našem istraživanju, SVM je također pokazao najveću ukupnu točnost predviđanja u validaciji nasumičnim podskupom, što je u skladu i s rezultatima PCA-e te sposobnošću jednostavnih tehnika redukcije dimenzionalnosti poput Tikhonovljeve regularizacije (L2 norma u SVC linearnoj jezgri) za učinkovitu ekstrakciju obilježja.

Svi modeli, osim SLP-a, pokazali su dobru uspješnost na danom skupu podataka, a uočene razlike nisu bile diskriminatorne. Istraživanja koja procjenjuju klasifikacije vegetacije uporabom hiperspektralne snimke s SVM-om, umjetnim neuronskim mrežama i CNN-om [125,126] rezultirala su sličnim zaključcima s vrlo visokim točnostima klasifikacije. Dodana vrijednost u provedenom istraživanju vidljiva je u analizi uspješnosti na tabličnim podacima uz dodatni, nepovezani skup za validaciju (Slike 5.7 i 5.7). Pokazano je da CNN i SVM daju konzervativnije, usporedive metrike uspješnosti, dok MLP pokazuje ukupno najbolju uspješnost, ali s povećanjem  $F_1$  mjere od samo 1%.

Ovo istraživanje demonstriralo je sposobnost algoritama strojnog učenja da koriste jednostavna multispektralna očitavanja za učinkovitu klasifikaciju rolanja lista kukuruza kao pokazatelja stresa izazvanog sušom i visokim temperaturama. Pokazano je da postoji varijabilnost između algoritama strojnog učenja kako u metrikama uspješnosti, tako i u računalnim vremenima.

Postoji rastuća potreba za povećanom prostornom i vremenskom rezolucijom praćenja biljaka s pristupačnim rješenjima daljinskog očitavanja, osobito u kontekstu Interneta stvari (IoT). Demonstrirano je da algoritmi strojnog učenja mogu učinkovito izdvajati informacije

iz multispektralnih očitavanja i predviđati stanja biljaka kao što je rolanje lista. Budući da je zamišljena primjena demonstriranog senzora IoT okvir, sklonost je prema manje računalno intenzivnim algoritmima strojnog učenja bez žrtvovanja uspješnosti. Stoga bi primjena MLP-a mogla predstavljati ukupno najoptimalnije rješenje.

Povećanje gustoće informacija i primjena pametnih rješenja za podršku odlučivanju u poljoprivredi mogli bi olakšati tranziciju prema Poljoprivredi 4.0, osnaženu sinergijom između prehrambene proizvodnje i strojnog učenja. Daljnja istraživanja trebala bi testirati ovaj okvir u višestrukim topografijama te scenarijima dostupnosti vode i hranjiva, kako bi se ispitale sposobnosti jednostavnih i pristupačnih senzorskih rješenja u raščlanjivanju bioloških sustava koji pokazuju najvišu razinu složenosti.

Ograničenja provedenog istraživanja mogu se sagledati iz dvije perspektive. Skup podataka prikupljen je samo u jednoj fazi razvoja biljke i u ograničenom broju klimatoloških scenarija [127], pa su stoga potrebni daljnji naponi s povećanom prostornom i vremenskom rezolucijom. Nadalje, modeli dubokog učenja predstavljaju dobar način suočavanja s podacima koji poprimaju mnoge oblike u višedimenzionalnim hiper-ravninama, ali s ograničenom interpretabilnošću. Daljnje vrednovanje trebalo bi stoga uključiti i druge modele strojnog učenja kao što su stabla odlučivanja, koja zadržavaju više informacija o učincima prediktorskih varijabli.

## 6. Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra

Precizna poljoprivreda sve se intenzivnije oslanja na podatkovno utemeljene modele kako bi se omogućilo kontinuirano praćenje stanja usjeva i pravovremeno donošenje agronomskih odluka [128]. Multispektralni podatci programa Copernicus, osobito sa satelita Sentinel-2, javno su dostupni i široko korišteni, no njihova primjena ograničena je relativno niskom vremenskom razlučivošću. Ciklus ponovnog preleta iznosi tri do pet dana ili više, ovisno o oblačnosti i drugim atmosferskim uvjetima [129]. Jedan od pristupa za povećanje dostupnosti i frekvencije podataka jest primjena koncepta Poljoprivrede 4.0, koji uključuje integraciju većeg broja IoT uređaja za kontinuirano prikupljanje podataka [130–132].

Unatoč svojoj vrijednosti, tehnike daljinskog očitavanja temeljene na satelitskim multispektralnim podatcima suočavaju se s nizom ograničenja, uključujući utjecaj oblačnosti, ograničenu vremensku razlučivost i kašnjenje u dostupnosti podataka [133]. Kao odgovor na navedene nedostatke, u ovom se radu predlaže hibridni pristup koji kombinira satelitske podatke Sentinel-2 s podatcima u stvarnom vremenu prikupljenima pomoću jeftinih zemaljskih jednopikslnih detektora (SPD, *engl. Single-Pixel Detectors*), poput NIR spektrometra AS7263 proizvođača ams-OSRAM [134]. Predloženi sustav omogućuje troškovno učinkovito i skalabilno rješenje za kontinuirano praćenje usjeva, kao i predviđanje ključnih agronomskih parametara, uključujući prinos, vlažnost zrna i visinu biljaka.

U svrhu modeliranja primijenjeni su prediktivni modeli temeljeni na parcijalnoj regresiji najmanjih kvadrata (PLSR, *engl. Partial Least Squares Regression*), implementirani izravno na SPD uređajima uz energetski učinkovit algoritam prilagođen izvođenju na mikrokontroleru STM32G030. Time se omogućuje lokalna obrada podataka i smanjenje potrebe za prijenosom velikih količina informacija.

U istraživanju vegetacije razvijen je niz vegetacijskih indeksa (VI) koji omogućuju bolju

interpretaciju spektralnih podataka u odnosu na pojedinačne valne duljine [98]. Jedan od najčešće korištenih indeksa je NDVI [135]. Satelit Sentinel-2 raspolaže s 13 spektralnih kanala koji omogućuju izračun različitih indeksa te se široko primjenjuje u praćenju zdravlja biljaka, sadržaja vode u tlu, razine hranjivih tvari, rotacije usjeva i zaštite od štetnika [129, 136].

S obzirom na ograničen prostorni obuhvat SPD senzora, oni sami po sebi ne mogu pružiti cjelovitu sliku velikih poljoprivrednih površina. Stoga se učinkovita primjena postiže integracijom s daljinskim mjerenjima. Hibridni pristup koji kombinira široki prostorni obuhvat satelitskih sustava s visokofrekventnim lokalnim mjerenjima omogućuje povećanje prostorne i vremenske razlučivosti uz smanjenje utjecaja oblačnosti i kašnjenja podataka [137]. Na taj se način ostvaruje pouzdaniji i sveobuhvatniji sustav za praćenje i analizu stanja usjeva u stvarnim uvjetima.

Primjena satelita Sentinel-2 u preciznoj poljoprivredi vrlo je istražena tema koja obuhvaća širok raspon primjena vegetacijskih indeksa. Na razini procjene fizioloških parametara usjeva, istraživanja su pokazala da indeksi temeljeni na crvenom rubu spektra, poput mSR2 i ND705, postižu snažne linearne korelacije s frakcijom apsorbirane fotosintetski aktivne radijacije (FPAR) u pšenici i kukuruзу [138], dok kombiniranje NDVI vremenskih serija s terenskom verifikacijom omogućuje precizno praćenje fenoloških faza [139]. Predviđanje prinosa dodatno je unaprijeđeno integracijom Sentinel-2 VI s pomoćnim podatcima, kombinacija s prividnom električnom vodljivošću tla (ECa) postigla je  $R^2 = 0,75$  za prinos ječma [140], a duboke neuronske mreže primijenjene na VI Sentinel-2 i indeks lisne površine (LAI) pokazale su obećavajuće rezultate u procjeni biomase kukuruza [141]. U klasifikaciji usjeva i praćenju stanja vegetacije istaknuli su se hibridni modeli strojnog učenja koji kombiniraju RF i SVM [142], a pokazano je i da SAR podatci Sentinel-1 mogu nadopuniti multispektralne podatke [143]. Istraživanja su proširena i na specifične kulture i ekosustave, novi indeksi BARI i BORI razvijeni su za procjenu stanja čahura pamuka [144], NDVIRE za procjenu volumena šumskih površina [145], a teksturna obilježja izvedena iz VI Sentinel-2 pokazala su se učinkovitima za kartiranje šumskih površina [146]. Na primjenjenoj razini, VI su integrirani u platformu Agricolus za potporu upravljanju usjevima [147], u sustave za automatizaciju navodnjavanja vinograda [148] te u praćenje vegetacije i vlage u urbanim sredinama [149–151]. Paralelno s razvojem satelitskih metoda, nekoliko studija istražilo je i primjenu jeftinih zemaljskih spektralnih senzora, poput AS7263, za nedestruktivnu procjenu

kvalitete plodova [152], mjerenje reflektancije u stakleničkim uvjetima [153], procjenu klorofila [154] te razvoj zemaljskog NDVI senzora za praćenje usjeva [155]. Unatoč opsežnosti opisanog istraživačkog korpusa, nijedno od navedenih radova ne adresira energetski učinkovitu metodu za predviđanje krajnjeg sezonskog stanja usjeva koja kombinira satelitska i zemaljska SPD mjerenja u hibridnom sustavu s implementacijom modela izravno na uređaju što predstavlja istraživački doprinos opisan u nastavku ovog poglavlja.

## 6.1. Terenska istraživanja i eksperimentalni postav

Terenska istraživanja provedena su 2023. godine koristeći hibridni kultivar kukuruza OS Semper iz FAO grupe zriobe 400 (PIO, Osijek, Hrvatska). Na pokusnim parcelama Poljoprivrednog instituta Osijek ispitano je pet tretmana uzgoja koji odražavaju uvjete uobičajene u praktičnoj poljoprivrednoj proizvodnji, a njihove koordinate i agrotehničke karakteristike prikazane su u Tablici 6.1. Tretmani su se razlikovali prema primjeni navodnjavanja i dušičnog gnojiva, parcela Navodnjavano navodnjavana je pet puta sustavom kružnog raspršivača uz primjenu 136 kg N/ha, dok su parcele Oborinska vode i NPotpuno primile jednaku količinu dušika bez navodnjavanja. Tretmani N75 i N0 razlikovali su se isključivo u razini gnojidbe 75 kg N/ha odnosno bez dušika, također bez navodnjavanja. Na svakoj parceli postavljen je jedan SPD čvor usmjeren prema sjeveru, pozicioniran najmanje jedan metar unutar usjeva kako bi se minimizirao rubni efekt.

**Tablica 6.1:** Koordinate i okolišni podatci SPD uređaja.

| ID uređaja       | Tretman        | Geogr. širina | Geogr. dužina |
|------------------|----------------|---------------|---------------|
| BE7A000000003048 | Navodnjavano   | 45,53979° S   | 18,73314° I   |
| BE7A000000003049 | Oborinska vode | 45,53885° S   | 18,73664° I   |
| BE7A00000000304A | N0             | 45,53770° S   | 18,72995° I   |
| BE7A00000000304B | N75            | 45,53795° S   | 18,72938° I   |
| BE7A00000000304C | NPotpuno       | 45,53820° S   | 18,72883° I   |



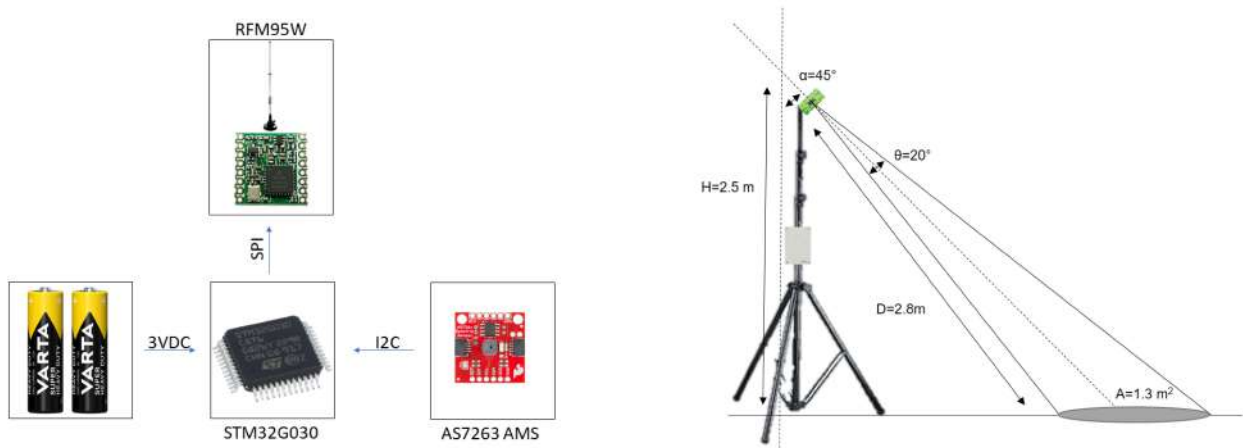
Slika 6.1: Prikaz SPD senzorskog sklopa u poljskom pokusu.

## 6.2. Arhitektura i konfiguracija SPD čvora

Svaki SPD čvor projektiran je oko multispektralnog senzora AMS AS7263 koji pokriva crveni i bliski infracrveni spektar kroz šest kanala (Tablica 6.2). Arhitektura čvora temelji se na mikroupravljaču STM32G030 koji upravlja sensorom putem I<sup>2</sup>C komunikacijskog sučelja, dok se prikupljeni podatci odašilju bežično putem LoRa primopredajnog modula, kako je

6. Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra

opisano u Poglavlju 3. Cijeli sustav napaja se istosmjernim naponom od 3 V, što je u skladu s energetskim zahtjevima dugotrajno terensko snimanje, prikazano na slici 6.2. Senzor je montiran na 3D-tiskanom nosaču postavljenom na stativ na visini 2,5 m od tla, s kutom upada od 20° i otvorom leće od 0.75 mm [134]. Za razliku od ranijeg istraživanja [34] u kojemu je senzor bio montiran okomito na tlo, u ovom je radu orijentacija prilagođena kako bi zahvatila što veći udio površine lišća kukuruza i time povećala reprezentativnost mjerenja spektralne reflektancije lišća.



**Slika 6.2:** Blokovski prikaz sustava lijevo i eksperimentalni postav sa položajem senzora desno.

Na temelju navedenih parametara, površina tla koju senzor pokriva aproksimira se kružnom plohom:

$$A = \pi r^2 \approx 1,30 \text{ m}^2. \quad (6-1)$$

SPD radi bez dodatnih optičkih komponenti, čime je osigurana izravna izloženost upadnom svjetlu. Podatci su se prikupljali od 8. srpnja do 11. rujna 2023., u satnim intervalima od zore do sumraka, što je rezultiralo ukupno 2781 očitavanja.

**Tablica 6.2:** Spektralni kanali senzora AS7263 s odgovarajućim pojasnim širinama (FWHM).

| Kanal | Središnja valna duljina [nm] | FWHM [nm] |
|-------|------------------------------|-----------|
| R     | 610                          | 20        |
| S     | 680                          | 20        |
| T     | 730                          | 20        |
| U     | 760                          | 20        |
| V     | 810                          | 20        |
| W     | 860                          | 20        |

### 6.3. Analiza podataka i matematički okvir

#### Normalizirani razlikovni vegetacijski indeks (NDVI)

Normalizirani razlikovni vegetacijski indeks (NDVI) jedan je od najstarijih i najrasprostranjenijih pokazatelja stanja vegetacije u daljinskom očitavanju [98, 135]. Temelji se na fizikalnoj osnovi da zdrava vegetacija intenzivno apsorbira crveno svjetlo za fotosintezu, a snažno reflektira NIR zračenje zahvaljujući unutarljivoj staničnoj strukturi lista. Matematički se definira kao normalizirana razlika između spektralnih reflektancija u NIR i crvenom pojasu:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{red}}}, \quad (6-2)$$

gdje  $\rho_{\text{NIR}}$  i  $\rho_{\text{red}}$  označavaju spektralne reflektancije u odgovarajućim pojasima. Vrijednost NDVI-ja kreće se u rasponu  $[-1, 1]$ : vrijednosti bliže 1 upućuju na gustu i zdravu vegetaciju, vrijednosti oko 0 karakteristične su za ogoljelo tlo, a negativne vrijednosti javljaju se kod vodenih površina ili snijega.

Za satelit Sentinel-2, NDVI ( $\text{NDVI}_{\text{S2}}$ ) se izračunava iz kanala B8 (842 nm, NIR pojas) i kanala B4 (665 nm, crveni pojas):

$$\text{NDVI}_{\text{S2}} = \frac{w_{842} - w_{665}}{w_{842} + w_{665}}. \quad (6-3)$$

Podatci senzora Sentinel-2 MSI mogu se preuzeti kao atmosferski korigirani površinski reflektancijski koeficijenti na razini dna atmosfere (engl. Bottom of Atmosphere, BOA) [156, 157]. Takva obrada uklanja utjecaj atmosferskih čimbenika, poput aerosola i vodene pare, čime se omogućuje dosljedna i pouzdana usporedba sa spektroradiometrijskim mjerenjima prikupljenima u terenskim uvjetima.

Za SPD sustav zasnovan na senzoru AS7263 koriste se spektralno najbliži raspoloživi kanali: kanal V (810 nm) kao NIR pojas i kanal S (680 nm) kao crveni pojas:

$$\text{NDVI}_{\text{SPD}} = \frac{w_{810} - w_{680}}{w_{810} + w_{680}}. \quad (6-4)$$

SPD mjerenja provedena su izravno iznad lišća usjeva, bez utjecaja atmosferske apsorpcije ili raspršenja kao u pokusima kada se koriste podatci sa Sentinel-2 satelita. Jednadžbe (6-3) i (6-4) dijele istu funkcionalnu formu, uspostavljajući izravnu vezu između dvaju načina

mjerenja. Razlike u središnjim valnim duljinama i spektralnim pojasnim širinama djelomično objašnjavaju sustavna odstupanja između skupova podataka, ali spektralna bliskost opravdava korelacijsku analizu [158].

### Prošireni skup vegetacijskih indeksa

Osim standardnog NDVI-ja, iz šest spektralnih kanala senzora AS7263 izvedeno je 15 normaliziranih vegetacijskih indeksa kao svi mogući neuređeni parovi šest kanala. Broj kombinacija određen je kombinatoričkim izrazom  $\binom{6}{2} = 15$ , a svaki indeks definiran je prema:

$$VI_{ij} = \left| \frac{w_{\lambda_b} - w_{\lambda_a}}{w_{\lambda_a} + w_{\lambda_b}} \right|, \quad (6-5)$$

gdje  $w_{\lambda_a}$  i  $w_{\lambda_b}$  označavaju izmjerene reflektancije u dvama odabranim spektralnim kanalima. Zajedno sa šest izravno izmjerenih spektralnih kanala, ovim pristupom dobiven je skup od 21 prediktorske varijable koje ulaze u PLSR model.

Broj uzoraka po uređaju (Tablica 6.3) blago varira jer su neki podatci filtrirani i odbačeni zbog nevaljanih očitavanja uzrokovanih vremenskim uvjetima ili pogreškama u komunikacijskom kanalu. Upareni skup podataka SPD–Sentinel-2 stvoren je povezivanjem svakog dostupnog satelitskog mjerenja s vremenski najbližim SPD zapisom unutar istog promatranog razdoblja (Tablica 6.4).

**Tablica 6.3:** Opisna statistika vrijednosti  $NDVI_{SPD}$ .

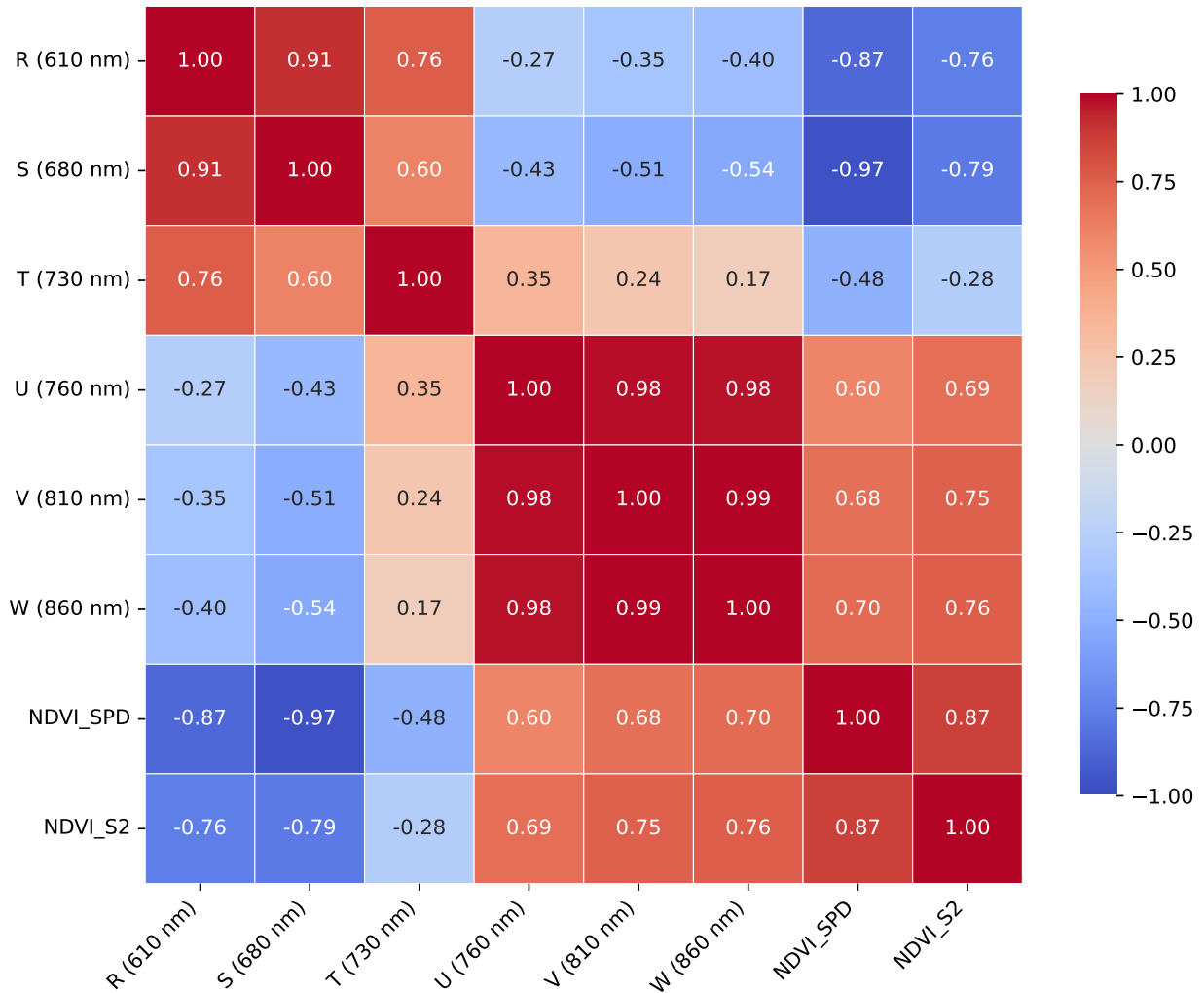
| ID uređaja  | N   | Srednja vr. | Std.   | Min.   | Maks.  |
|-------------|-----|-------------|--------|--------|--------|
| BE7A...3048 | 567 | 0,6402      | 0,1825 | 0,0449 | 0,8446 |
| BE7A...3049 | 567 | 0,5830      | 0,1594 | 0,0454 | 0,7778 |
| BE7A...304A | 519 | 0,5857      | 0,1536 | 0,1232 | 0,7997 |
| BE7A...304B | 567 | 0,5694      | 0,1723 | 0,0248 | 0,8238 |
| BE7A...304C | 561 | 0,6506      | 0,1691 | 0,0832 | 0,8621 |

**Tablica 6.4:** Opisna statistika vrijednosti  $NDVI_{S_2}$  iz Sentinel-2 opažanja.

| ID uređaja  | N  | Srednja vr. | Std.   | Min.   | Maks.  |
|-------------|----|-------------|--------|--------|--------|
| BE7A...3048 | 16 | 0,4671      | 0,0677 | 0,3671 | 0,5596 |
| BE7A...3049 | 17 | 0,5627      | 0,1539 | 0,2656 | 0,7241 |
| BE7A...304A | 12 | 0,5783      | 0,0961 | 0,4290 | 0,7346 |
| BE7A...304B | 18 | 0,6048      | 0,1076 | 0,4122 | 0,7377 |
| BE7A...304C | 19 | 0,6382      | 0,1033 | 0,4413 | 0,7609 |

6. Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra

Prvi korak u analizi prediktorskog prostora sastojao se od ispitivanja međusobnih odnosa šest spektralnih kanala senzora AS7263 te dvaju NDVI vrijednosti —  $NDVI_{SPD}$  izračunatog iz SPD uređaja prema jednadžbi (6-4) i referentnog satelitskog  $NDVI_{S2}$  definiranog jednadžbom (6-3). Rezultati Pearsonove korelacijske analize prikazani su na Slici 6.3.



Slika 6.3: Korelacijska matrica spektralnih kanala AS7263 i NDVI-ja

Korelacijska matrica otkriva jasnu fizikalnu strukturu vegetacijskog signala. Crveni kanali R (610 nm) i S (680 nm) snažno su pozitivno korelirani ( $r \approx 0,91$ ), što potvrđuje da oba mjere istu pojavu — apsorpciju crvenog svjetla od strane klorofila tijekom fotosinteze. Kanali iz bliskog infracrvenog područja U (760 nm), V (810 nm) i W (860 nm) tvore kompaktni klaster s međusobnim korelacijama u rasponu 0,98–1,00, budući da dijele isti fizikalni mehanizam: refleksiju od unutarnje stanične strukture lista. Kanal T (730 nm) nalazi se u *red edge* zoni — prijelaznom području između crvenog i NIR spektra — pa pokazuje umjerene korelacije s obje skupine ( $r = 0,40$  sa S,  $r = 0,35$  s U), što potvrđuje da senzor pravilno razlučuje sve

tri spektralne regije.

Ključan nalaz su negativne korelacije između crvenog i NIR područja (npr.  $r_{R,W} = -0,40$ ,  $r_{S,W} = -0,54$ ): porastom vegetacijskog pokrova apsorpcija crvenog svjetla opada, dok refleksija u bliskom infracrvenom raste, što predstavlja fizikalnu osnovu svakog vegetacijskog indeksa [98, 135]. Upravo zato  $NDVI_{SPD}$  pokazuje snažnu negativnu korelaciju s crvenim kanalima ( $r = -0,87$  s R,  $r = -0,90$  sa S) i jaku pozitivnu s NIR kanalima ( $r = 0,68-0,87$ ), što odgovara očekivanom obrascu zdravog NDVI signala. Korelacija između  $NDVI_{SPD}$  i  $NDVI_{S2}$  iznosi  $r = 0,87$  i predstavlja temeljnu mjeru suglasnosti između terenskog i satelitskog načina mjerenja prije primjene bilo kakve modelirane korekcije.

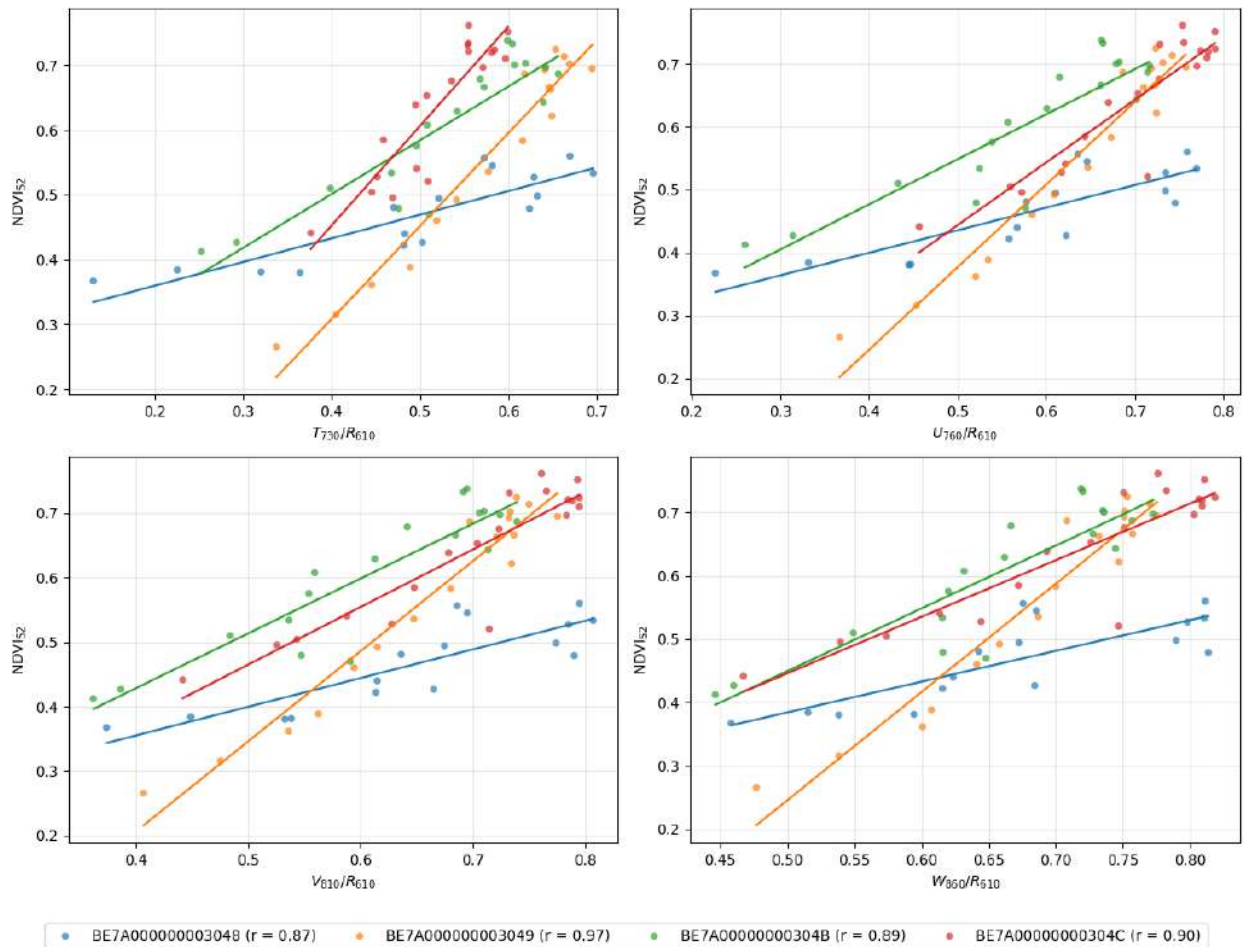
Treba istaknuti da  $NDVI_{S2}$  pokazuje konzistentnije, ali nešto slabije korelacije s pojedinačnim kanalima senzora AS7263 ( $r \in [-0,79; 0,76]$ ) u usporedbi s  $NDVI_{SPD}$  ( $r \in [-0,90; 0,87]$ ). Ova razlika očekivana je s obzirom na to da Sentinel-2 koristi spektralno različite pojasnice (665 nm i 842 nm) od onih dostupnih na senzoru AS7263, pa veza sa SPD kanalima nužno prolazi kroz spektralni prijevod između dvaju mjernih sustava. Ova spektralna neusklađenost glavni je razlog uvođenja proširenog skupa konstruiranih vegetacijskih indeksa kako bi se postigla bolja linearna veza s referentnom satelitskom vrijednošću.

Korelacijska analiza opisana u ovom odjeljku poslužila je kao polazište za odabir podskupa najinformativnijih prediktora. U sljedećem koraku, iz početnih 21 prediktorske varijable (šest izvornih kanala i 15 normaliziranih vegetacijskih indeksa) izdvojena su četiri indeksa koja postižu najjaču linearnu vezu s  $NDVI_{S2}$ .

### Odabir najinformativnijih vegetacijskih indeksa

Polazeći od proširenog skupa od 15 normaliziranih vegetacijskih indeksa definiranih jednadžbom (6-5), proveden je sustavan odabir podskupa s najvećom prediktivnom vrijednošću u odnosu na referentni satelitski  $NDVI_{S2}$ . Analiza korelacije pokazala je da četiri indeksa postižu najjaču linearnu vezu, a svi dijele crveni kanal R (610 nm) kao zajednički nazivnik:  $T_{730}/R_{610}$ ,  $U_{760}/R_{610}$ ,  $V_{810}/R_{610}$  i  $W_{860}/R_{610}$ . Linearne regresijske krivulje između svakog od četiri odabrana indeksa i  $NDVI_{S2}$ , izračunate zasebno za svaki SPD uređaj, prikazane su na Slici 6.4.

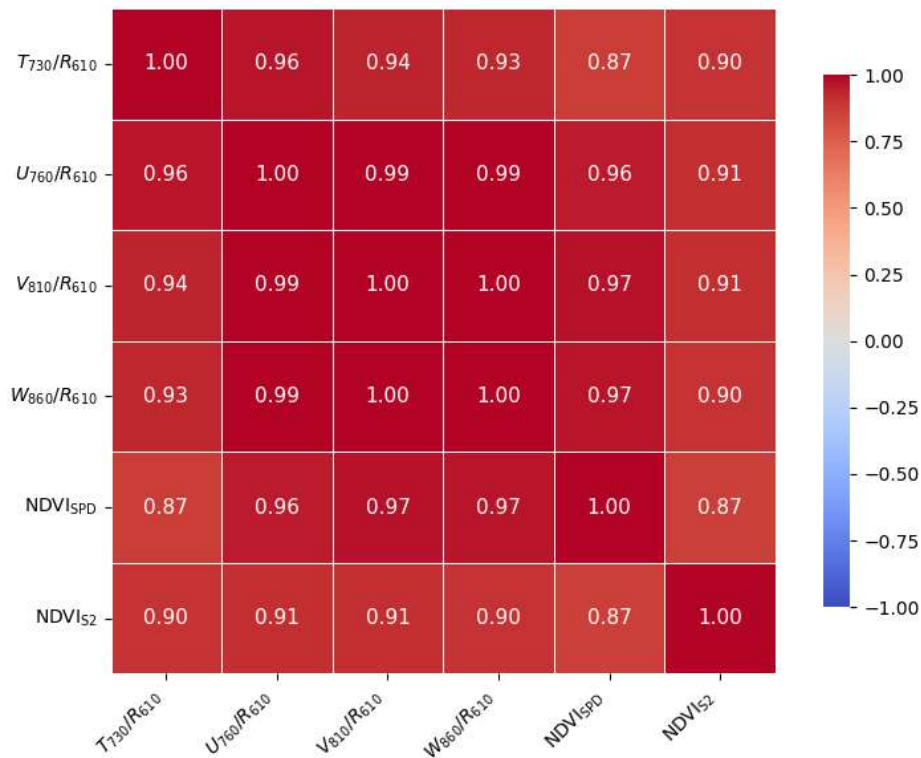
6. Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra



**Slika 6.4:** Linearni regresijski pravci između četiri najjača normalizirana vegetacijska indeksa ( $T_{730}/R_{610}$ ,  $U_{760}/R_{610}$ ,  $V_{810}/R_{610}$  i  $W_{860}/R_{610}$ ) i referentne vrijednosti  $NDVI_{S2}$  dobivene satelitom Sentinel-2. Boje označavaju pojedine SPD uređaje, a Pearsonovi korelacijski koeficijenti  $r$  navedeni su u legendi za svaki uređaj. Uređaj BE7A00000000304A isključen je iz analize zbog nepouzdanih podataka zabilježenih tijekom satelitskih preleta.

Sva četiri indeksa pokazuju jasan pozitivan trend prema  $NDVI_{S2}$  na svim uređajima, pri čemu se točke različitih uređaja gusto preklapaju u rasponu vrijednosti karakterističnom za zdravu vegetaciju ( $NDVI_{S2} \in [0,4; 0,75]$ ). Strukturna sličnost rasporeda točaka u sva četiri panela odraz je visoke međusobne korelacije indeksa svi koriste isti crveni nazivnik, a razlikuju se samo u NIR kanalu u brojniku. Ovo zapažanje kvantitativno je potkrijepljeno korelacijskom matricom prikazanom na Slici 6.5.

Korelacijska matrica potvrđuje očekivanu strukturu odabranog prediktorskog prostora. Sva četiri indeksa međusobno koreliraju s koeficijentima u rasponu 0,93-1,00, pri čemu parovi koji dijele bliske NIR kanale ( $V_{810}/R_{610}$  i  $W_{860}/R_{610}$ ) postižu praktički savršenu korelaciju ( $r = 1,00$ ). Korelacije indeksa s  $NDVI_{S2}$  kreću se u rasponu 0,90–0,91 i sustavno nadmašuju izravnu korelaciju  $NDVI_{SPD}$ – $NDVI_{S2}$  koja iznosi 0,87. Ovaj nalaz pokazuje da konstruirani



**Slika 6.5:** Korelacijska matrica četiri najinformativnija normalizirana vegetacijska indeksa ( $T_{730}/R_{610}$ ,  $U_{760}/R_{610}$ ,  $V_{810}/R_{610}$  i  $W_{860}/R_{610}$ ) i NDVI vrijednosti dobivenih SPD uređajem ( $NDVI_{SPD}$ ) odnosno satelitom Sentinel-2 ( $NDVI_{S2}$ ).

indeksi sadrže komplementarnu informaciju koju  $NDVI_{SPD}$  sam po sebi ne obuhvaća, a koja se može iskoristiti za poboljšanje predikcije pri prijelazu sa SPD na Sentinel-2 referentnu skalu.

Istovremeno, visoka međusobna korelacija indeksa ukazuje na izraženu multikolinearnost prediktorskog prostora, pojavu koja onemogućuje primjenu obične višestruke linearne regresije zbog nestabilnosti procjene regresijskih koeficijenata. Upravo zato se kao metoda modeliranja u ovom radu koristi parcijalna regresija najmanjih kvadrata (PLSR), koja projekcijom prediktora u manji broj nekoreliranih latentnih komponenti elegantno reducira multikolinearnost i istovremeno maksimizira kovarijancu s odzivnom varijablom.

### 6.3.1. Parcijalna regresija najmanjih kvadrata (PLSR)

Parcijalna regresija najmanjih kvadrata (PLSR) statistička je metoda koja istovremeno reducira dimenzionalnost prostora prediktora i modelira vezu s odzivnim varijablama [159]. Posebno je pogodna kada je broj prediktora  $p$  velik u usporedbi s brojem opažanja  $n$  i kada postoji visoka multikolinearnost između prediktora što je tipičan slučaj pri radu s multis-

pektralnim podacima. U takvim uvjetima standardna višestruka linearna regresija postaje numerički nestabilna, dok PLSR ekstrakcijom latentnih komponenti koje maksimiziraju kovarijancu s odzivnom varijablom zadržava prediktivnu moć uz stabilnost modela.

PLSR pronalazi  $k$  latentnih komponenti kao linearne kombinacije prediktora koje simultano opisuju varijancu u matrici prediktora  $\mathbf{X}$  i koreliraju s odzivnim vektorom  $\mathbf{y}$ . Konačna prediktivna jednadžba za skalarnu odzivnu varijablu (prinos, vlažnost zrna ili visina biljke) glasi:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{21} \beta_i \mathbf{x}_i, \quad (6-6)$$

gdje je  $\beta_0$  slobodni član,  $\beta_i$  su regresijski koeficijenti dobiveni PLSR modelom, a  $x_i$  su ulazne spektralne varijable izmjerene SPD čvorom šest izravno izmjerenih valnih duljina i 15 izvedenih vegetacijskih indeksa prema jednadžbi (6-5). Predikcija se na uređaju izračunava učinkovito kao skalarni produkt između vektora ulaznih varijabli i unaprijed pohranjenih koeficijenata, bez pohrane cijelih matrica modela [160].

Zbog dinamičke prirode sadržaja vlage u zrnu kukuruza, predikcije su najkorisnije kao relativna odstupanja, a ne apsolutne vrijednosti osobito u berbenoj sezoni kada je vlažnost zrna ispod 20 %. Predikcije izvan realnog raspona od 5 % do 15 % korigirane su ograničavanjem na te granične vrijednosti [161]. Mjerenja za kalibraciju ograničena su na interval 10:00 do 12:00 sati radi minimizacije utjecaja promjenjivih kutova Sunčevog osvjetljenja.

Optimalni broj latentnih komponenti  $k^*$  određen je peterostrukom unakrsnom validacijom. Kao kriterij odabira koristi se korijen srednje kvadratne pogreške predikcije (RMSEP):

$$\text{RMSEP} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{val}}} \sum_{j=1}^{n_{\text{val}}} (y_j - \hat{y}_j)^2}, \quad (6-7)$$

gdje  $y_j$  označava izmjerenu vrijednost,  $\hat{y}_j$  predviđenu vrijednost, a  $n_{\text{val}}$  broj uzoraka u validacijskom skupu. Bira se model s minimalnim RMSEP-om. Cijeli postupak treniranja i unakrsne validacije formaliziran je Algoritmom 1, a rezultirajući koeficijenti  $\beta$  izvezeni su za implementaciju izravno na SPD uređajima.

Izvedba svakog od triju modela kvantificirana je dvjema komplementarnim mjerama pogreške. Srednja apsolutna pogreška (MAE) opisuje prosječnu apsolutnu devijaciju:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j|. \quad (6-8)$$

---

**Algoritam 1** Treniranje PLSR modela i peterostruka unakrsna validacija

---

**Ulaz:** Skup podataka s prediktorima  $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{n \times p}$ , odzivima  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$

**Izlaz:** Optimalni PLSR model s  $k^*$  komponentama i koeficijenti  $\beta$

- 1: model  $\leftarrow$  pls( $\mathbf{y} \sim \mathbf{X}$ , validacija = "CV")
  - 2:  $k^* \leftarrow$  selectNcomp(model)
  - 3:  $\hat{\mathbf{y}} \leftarrow$  fitted(model)[ $k^*$ ]
  - 4:  $r \leftarrow$  Pearson( $\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}$ )
  - 5: **ako**  $r > r_{\min}$  **tada**
  - 6:      $\beta \leftarrow$  coef(model,  $k = k^*$ )
  - 7:     izvozKoeficijenata( $\beta$ , naziv\_datoteke)
  - 8: **kraj ako**
- 

Korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE) osjetljiviji je na velika pojedinačna odstupanja:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}. \quad (6-9)$$

Koeficijent determinacije  $R^2$  nije izračunat jer svaki tretman sadrži samo jedno mjerenje, što onemogućuje statistički valjanu procjenu varijance [161].

### 6.3.2. Obrada podataka u stvarnom vremenu na SPD uređaju

Terenski SPD uređaji odgovorni su za prethodnu obradu sirovih spektrometrijskih podataka u stvarnom vremenu te primjenu unaprijed postavljenih koeficijenata modela za generiranje predikcija. Protokol implementacije i računalni zadatci koji se izvode na uređajima prikazani su Algoritmom 2.

## 6.4. Rezultati

Istraživanje integrira daljinsko istraživanje i IoT-bazirane multispektralne SPD senzore radi unaprjeđenja poljoprivrednog praćenja korištenjem Sentinel-2 podataka za izvedbu vegetacijskih indeksa, posebice NDVI. Terenski podatci prikupljeni su SPD sensorima postavljenim na više lokacija, dok su Sentinel-2 podatci korišteni za validaciju terenskih mjerenja.

Istraživanjem je utvrđena visoka korelacija ( $r > 0,85$ ) između vrijednosti  $\text{NDVI}_{\text{SPD}}$  i  $\text{NDVI}_{\text{S2}}$  za sve promatrane uređaje (Pearsonovi koeficijenti u rasponu 0,84–0,93), čime je demonstrirana učinkovitost senzora u zatvaranju vremenskih praznina u satelitskim snimkama uzrokovanih oblačnim pokrivačem. Uređaj BE7A0000000304A isključen je iz treniranja i testiranja modela jer su podatci proglašeni nepouzdanima tijekom satelitskih preleta.

6. Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra

---

**Algoritam 2** Obrada podataka SPD uređaja u polju

---

```

1: postupak OBRADISPDPODATKE(SPD_podaci,  $\beta$ )
2:   // 1. Prikupljanje i priprema podataka
3:    $R \leftarrow$  izvuci crveni kanal iz SPD_podaci (680 nm)
4:    $NIR \leftarrow$  izvuci NIR kanal iz SPD_podaci (810 nm)
5:   Kalibriraj( $R$ ,  $NIR$ )
6:   // 2. Izračun NDVI iz SPD podataka
7:    $NDVI_{SPD} \leftarrow \frac{NIR - R}{NIR + R}$ 
8:   // 3. Korelacija sa satelitskim NDVI
9:    $r \leftarrow$  Pearson( $NDVI_{SPD}$ ,  $NDVI_{S2}$ )
10:  // 4. Izračun predikcije za visinu, vlagu i prinos skalarnim produktom
11:   $\hat{y} \leftarrow \beta_0 + \sum_{i=1}^{21} \beta_i \mathbf{x}_i$ 
12:  vrați  $\hat{y}$ ,  $r$ 
13: kraj postupak

```

---

Po završetku vegetacijske sezone obavljena je berba te su izmjereni stvarni prinosi, vlažnost zrna i visina biljaka (Tablica 6.5).

**Tablica 6.5:** Metapodatci parcela s izmjerenim agronomskim atributima pri berbi.

| Br. | Tretman        | Prinos [t/ha] | Vlažnost [%] | Visina [cm] |
|-----|----------------|---------------|--------------|-------------|
| 1   | Navodnjeno     | 10,91         | 21,5         | 235         |
| 2   | Oborinska voda | 10,63         | 19,9         | 220         |
| 3   | N0             | 6,89          | 22,7         | 180         |
| 4   | N75            | 9,81          | 20,5         | 185         |
| 5   | NFull          | 10,15         | 20,9         | 195         |

Tablica 6.6 prikazuje slobodne članove i regresijske koeficijente triju razvijenih PLSR modela prema jednadžbi (6-6).

6. Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra

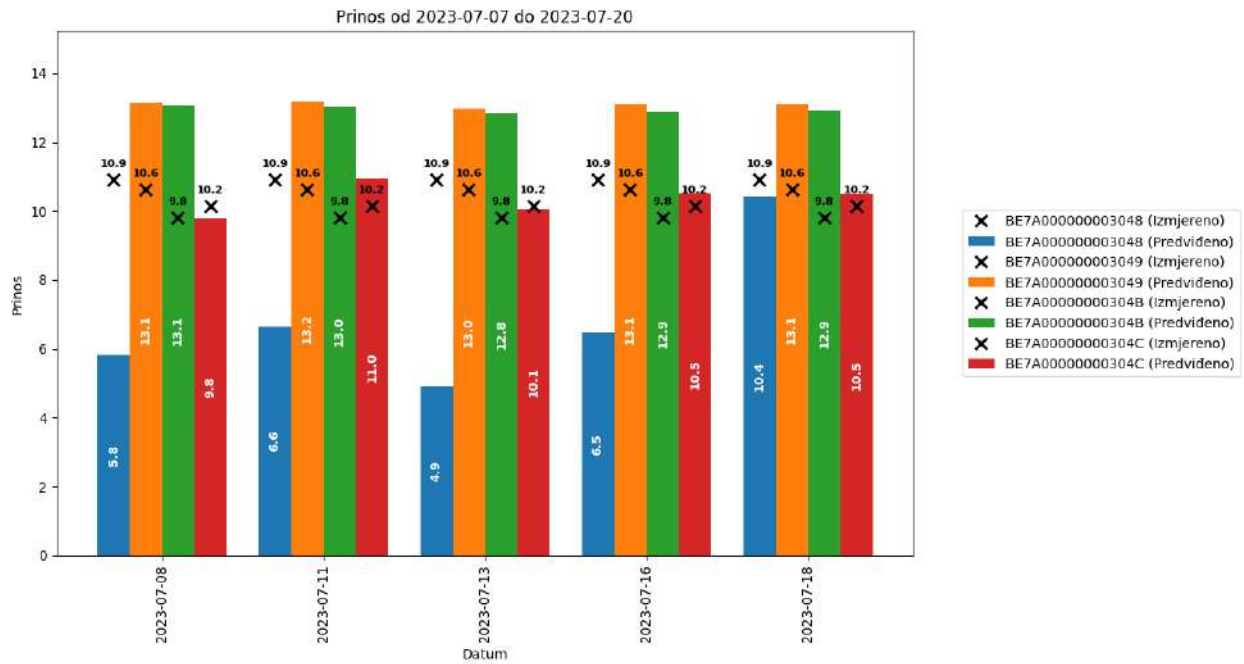
**Tablica 6.6:** Slobodni članovi i regresijski koeficijenti PLSR modela za visinu biljke, vlažnost zrna i prinos.

| Varijabla     | Visina [cm]            | Vlažnost [%] | Prinos [t/ha]          |
|---------------|------------------------|--------------|------------------------|
| Slobodni član | 182,1546               | 48,3681      | 13,9714                |
| R             | -0,01179               | -0,00423     | -0,00127               |
| S             | -0,01374               | -0,00363     | -0,00110               |
| T             | 0,00098                | 0,00054      | -0,00081               |
| U             | 0,00089                | 0,00037      | 0,00053                |
| V             | 0,00005                | 0,00047      | 0,00012                |
| W             | 0,00188                | 0,00006      | -0,00013               |
| SR            | $5,24 \times 10^{-7}$  | -5,3555      | $-1,70 \times 10^{-8}$ |
| TR            | $2,50 \times 10^{-6}$  | -7,5270      | $1,70 \times 10^{-7}$  |
| UR            | $1,94 \times 10^{-6}$  | -3,1106      | $1,95 \times 10^{-7}$  |
| VR            | $2,01 \times 10^{-6}$  | -4,7838      | $1,71 \times 10^{-7}$  |
| WR            | $2,08 \times 10^{-6}$  | -2,1401      | $1,33 \times 10^{-7}$  |
| TS            | $2,48 \times 10^{-6}$  | -6,7967      | $1,26 \times 10^{-7}$  |
| US            | $2,09 \times 10^{-6}$  | -4,4162      | $1,61 \times 10^{-7}$  |
| VS            | $2,26 \times 10^{-6}$  | -5,4608      | $1,44 \times 10^{-7}$  |
| WS            | $2,27 \times 10^{-6}$  | -3,4470      | $1,20 \times 10^{-7}$  |
| UT            | $1,29 \times 10^{-7}$  | -0,5883      | $8,29 \times 10^{-8}$  |
| VT            | $3,71 \times 10^{-7}$  | -3,8964      | $5,07 \times 10^{-8}$  |
| WT            | $4,50 \times 10^{-7}$  | -1,2334      | $1,64 \times 10^{-8}$  |
| VU            | $-2,82 \times 10^{-7}$ | 0,2776       | $-6,02 \times 10^{-8}$ |
| WU            | $1,36 \times 10^{-6}$  | -0,2115      | $-2,86 \times 10^{-8}$ |
| WV            | $3,44 \times 10^{-7}$  | -4,9294      | $1,76 \times 10^{-8}$  |

Tablica 6.7 prikazuje usporedbu predviđenih i izmjerenih vrijednosti pri berbi, dok Slike 6.6, 6.7 i 6.8 dodatno ilustriraju dinamiku predikcija tijekom razdoblja od 7. do 20. srpnja 2023. za sva četiri SPD uređaja uključena u model. Na svakom dijagramu izmjerene vrijednosti pri berbi označene su crnim križićima, dok obojeni stupci prikazuju predviđene vrijednosti po datumu mjerenja.

Analiza pokazuje da predikcije prinosa i vlažnosti zrna dobro odgovaraju izmjerenim podacima, što potvrđuju relativno niske vrijednosti srednje apsolutne pogreške (MAE) i korijena srednje kvadratne pogreške (RMSE). Za prinos (Slika 6.6) ukupne pogreške iznose  $MAE = 2,52 \text{ t/ha}$  i  $RMSE = 2,64 \text{ t/ha}$ . Najbolja podudarnost ostvarena je za tretman NFull, u kojem je razlika između predviđene i izmjerene vrijednosti iznosila svega  $0,23 \text{ t/ha}$ , dok je najveće odstupanje zabilježeno za navodnjavanu parcelu, gdje je model sustavno podcijenio prinos. Predikcije ostaju vremenski stabilne kroz promatrano razdoblje, s blagim porastom predviđene vrijednosti uređaja 3048 prema kraju razdoblja, što sugerira da model uhvaća postupno sazrijevanje kulture.

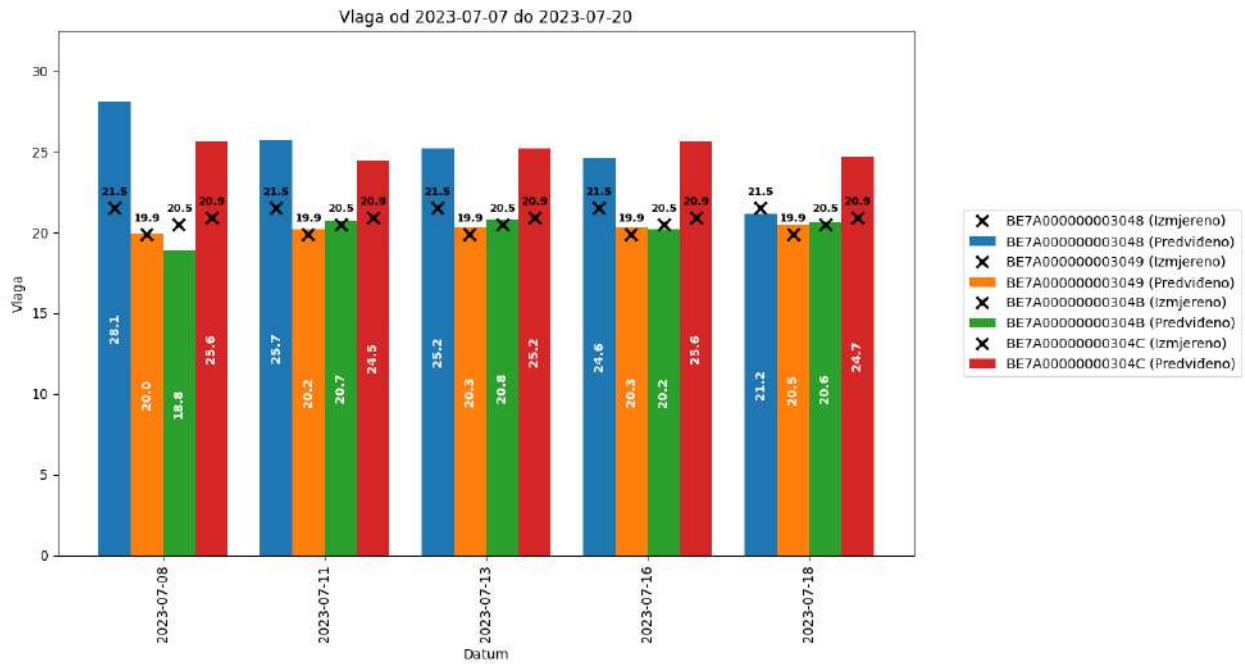
6. Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra



**Slika 6.6:** Predviđene vrijednosti prinosa (obojeni stupci) i izmjerene vrijednosti pri berbi (crni križići) za četiri SPD uređaja tijekom razdoblja od 7. do 20. srpnja 2023. Brojčane oznake unutar stupaca prikazuju predviđene vrijednosti za pojedini datum, a oznake iznad križića izmjerene vrijednosti pri berbi.

Za vlažnost zrna (Slika 6.7) ukupne pogreške iznose  $MAE = 2,17\%$  i  $RMSE = 2,39\%$ , što predstavlja praktično prihvatljivu razinu točnosti za potrebe odlučivanja o terminu berbe. Predikcije za tretmane s oborinskom vodom i N75 gotovo se savršeno poklapaju s izmjerenim vrijednostima ( $MAE < 0,55\%$ ), dok je za navodnjavanu i NFull parcelu model blago precijenio vlažnost u prvom dijelu razdoblja. Vidljivo je da predviđene vrijednosti opadaju s vremenom, što odgovara očekivanom fiziološkom procesu dehidracije zrna tijekom dozrijevanja prije berbe.

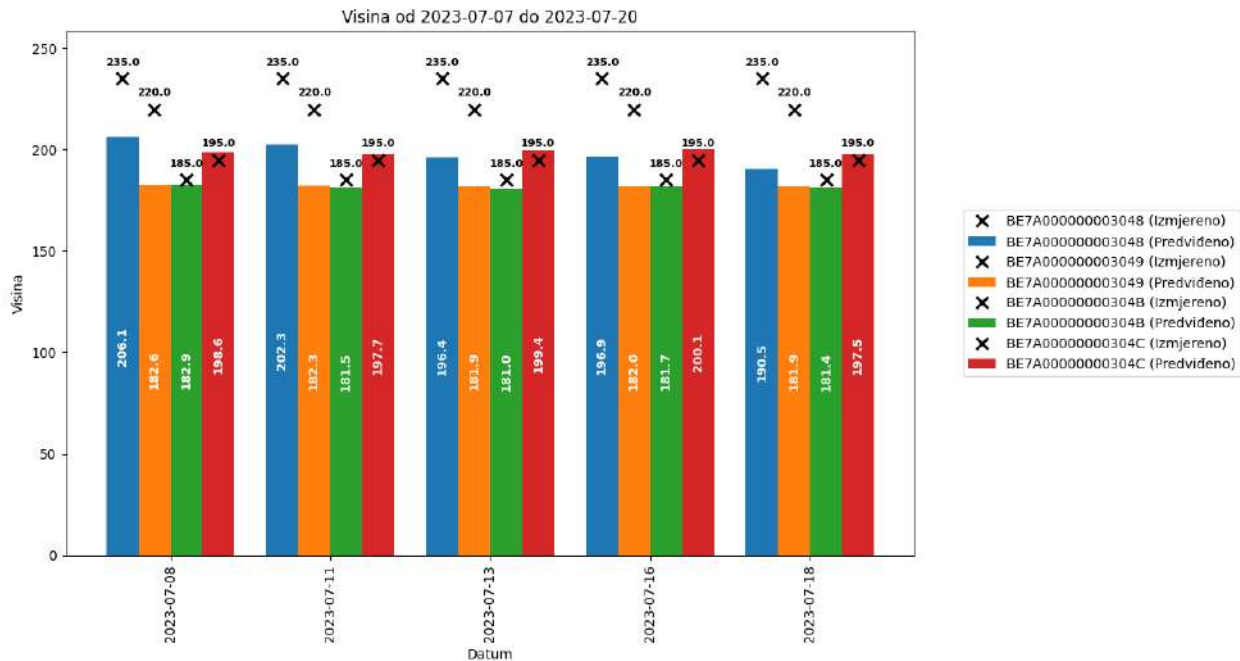
6. Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra



**Slika 6.7:** Predviđene vrijednosti vlažnosti zrna (obojeni stupci) i izmjerene vrijednosti pri berbi (crni križići) za četiri SPD uređaja tijekom razdoblja od 7. do 20. srpnja 2023.

Predikcije visine biljke (Slika 6.8) bile su manje precizne, s ukupnim vrijednostima MAE = 20,35 cm i RMSE = 20,51 cm. Iz dijagrama je jasno vidljivo da model sustavno podcjenjuje visinu za navodnjavanu parcelu (235 cm izmjereno naspram 198 cm predviđeno) i parcelu s oborinskom vodom (220 cm naspram 182 cm), dok za niže parcele (N75 i NFull) predikcije ostaju unutar nekoliko centimetara od stvarne vrijednosti. Ovo odstupanje može se pripisati malom broju kalibracijskih uzoraka u višem rasponu visina te ograničenom spektralnom odzivu na kasno-sezonske varijacije strukture krošnje, kada se rast biljke usporava a spektralni signal saturira. Rezultat sugerira da bi model visine zahtijevao proširenje kalibracijskog skupa s većim brojem opažanja iznad 200 cm, kao i potencijalno uključivanje strukturnih indikatora osim spektralnih.

6. Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra



**Slika 6.8:** Predviđene vrijednosti visine biljke (obojeni stupci) i izmjerene vrijednosti pri berbi (crni križići) za četiri SPD uređaja tijekom razdoblja od 7. do 20. srpnja 2023. Vidljivo je sustavno podcjenjivanje visine za parcele s izmjerenim vrijednostima iznad 200 cm.

**Tablica 6.7:** Usporedba predviđenih i izmjerenih vrijednosti pri berbi (empirijski rezultati, 7.–20. srpnja 2023.).

| Varijabla     | Tretman        | Izmjereno | Predviđeno | MAE  | RMSE  |
|---------------|----------------|-----------|------------|------|-------|
| Prinos [t/ha] | Navodnjeno     | 10,91     | 6,84       | 4,07 | 4,48  |
|               | Oborinska voda | 10,63     | 13,10      | 2,47 | 2,47  |
|               | N75            | 9,81      | 12,94      | 3,13 | 3,13  |
|               | NFull          | 10,15     | 10,38      | 0,39 | 0,47  |
|               | <i>Ukupno</i>  |           |            |      | 2,52  |
| Vlažnost [%]  | Navodnjeno     | 21,5      | 24,96      | 3,58 | 4,11  |
|               | Oborinska voda | 19,9      | 20,26      | 0,36 | 0,39  |
|               | N75            | 20,5      | 20,34      | 0,52 | 0,79  |
|               | NFull          | 20,9      | 25,12      | 4,22 | 4,24  |
|               | <i>Ukupno</i>  |           |            |      | 2,17  |
| Visina [cm]   | Navodnjeno     | 235       | 198,2      | 36,8 | 37,2  |
|               | Oborinska voda | 220       | 182,2      | 37,8 | 37,8  |
|               | N75            | 185       | 181,8      | 3,2  | 3,29  |
|               | NFull          | 195       | 198,6      | 3,6  | 3,74  |
|               | <i>Ukupno</i>  |           |            |      | 20,35 |

Sveukupno gledano, predikcije prinosa i vlažnosti zrna pokazuju zadovoljavajuću točnost za praktičnu primjenu u preciznoj poljoprivredi, dok rezultati za visinu biljke ukazuju na ograničenja modela u području strukturnih atributa krošnje. Vremenska konzistentnost

6. Energetski učinkovita metoda za procjenu prinosa, visine i vlage zrna kukuruza primjenjiva na LoRaWAN senzorskom sklopu korištenjem NIR spektrometra

predikcija kroz promatrano dvotjedno razdoblje, vidljiva na svim trima slikama, potvrđuje stabilnost PLSR modela — odsutnost naglih skokova ili anomalija u predikcijama svjedoči da model uhvaća stvarno spektralno stanje usjeva, a ne slučajne fluktuacije signala.

## 6.5. Analiza energetske učinkovitosti

Energetska analiza prikazana u Tablici 6.8 daje detaljan uvid u potrošnju struje, snagu i energiju u svakoj fazi rada SPD čvora. Mjerenja su provedena pri nominalnom naponu od 3 V, a vrijednosti snage i energije izračunate su prema:

$$P = I \cdot U, \quad E = P \cdot t. \quad (6-10)$$

**Tablica 6.8:** Analiza potrošnje energije tijekom jednog radnog ciklusa SPD uređaja ( $U = 3 \text{ V}$ ).

| Poč. [s]                                    | Kraj [s] | Traj. [s] | Struja [A]           | Snaga [W]            | Energija [W·s] |
|---|----------|-----------|----------------------|----------------------|----------------|
| 8,481                                       | 10,824   | 2,343     | 0,01375              | 0,0454               | 0,1061         |
| 10,890                                      | 11,583   | 0,693     | 0,12048              | 0,3976               | 0,2754         |
| 11,616                                      | 12,243   | 0,627     | 0,01304              | 0,0430               | 0,0269         |
| 12,276                                      | 12,606   | 0,330     | 0,13235              | 0,4368               | 0,1433         |
| 12,639                                      | 13,266   | 0,627     | 0,04800              | 0,1584               | 0,0993         |
| 13,299                                      | 15,454   | 2,155     | 0,01280              | 0,0422               | 0,0909         |
| 15,477                                      | 15,840   | 0,363     | 0,01045              | 0,0345               | 0,0125         |
| 15,873                                      | 18,876   | 3,003     | 0,00670              | 0,0221               | 0,0664         |
| 18,909                                      | 618,909  | 600,000   | $2,3 \times 10^{-6}$ | $7,6 \times 10^{-6}$ | 0,0046         |
| Ukupna aktivna energija (10,14 s):          |          |           |                      |                      | 0,8208 W·s     |
| Energija u mirovanju (600 s, 0,6 % ukupne): |          |           |                      |                      | 0,0046 W·s     |
| Prosječna snaga cijelog ciklusa:            |          |           |                      |                      | 0,00023 W      |

Budući da sustav miruje 98,4 % vremena, jasno je da ta faza najviše utječe na ukupnu potrošnju energije, dok prosječna struja u aktivnoj fazi iznosi 69,6  $\mu\text{A}$ . Uz napajanje pomoću dviju serijski spojenih VARTA Industrial Pro AA baterija, sustav može raditi 2–5 godina, ovisno o uvjetima. U idealnom okruženju trajanje je 4,8 godina, u realnim uvjetima (uz 20 % gubitaka) 3–4 godine, dok konzervativna procjena za niske temperature iznosi najmanje 2 godine. Time ovaj sustav predstavlja dugotrajno i energetski neovisno rješenje za IoT praćenje vegetacije.

## 6.6. Rasprava

Provedeno terensko istraživanje potvrđuje da predloženi hibridni pristup uspješno prevladava ključna ograničenja satelitskog daljinskog očitavanja. Visoka korelacija ( $r > 0,85$ ) između  $NDVI_{SPD}$  i  $NDVI_{S2}$  potvrđuje sposobnost zemaljskih SPD senzora da pouzdano nadomjeste satelitska mjerenja u periodima oblačnog pokrivača ili dugog ciklusa preleta satelita.

PLSR modeli pokazali su dobru prediktivnu sposobnost za prinos i vlažnost zrna, posebno relevantnu za donošenje berbeničkih odluka. Manja preciznost predikcija visine biljke može se pripisati malom broju kalibracijskih uzoraka ( $n = 4$ ) i spektralnoj neosjetljivosti senzora na kasno-sezonske promjene u arhitekturi krošnje. Provedba eksperimenta u jednoj vegetacijskoj sezoni otežava generalizaciju zaključaka na različite klimatske uvjete i kultivare. Uočene razlike između regresijskih jednadžbi za različite uređaje (Tablica 6.1) nastaju jer su provedeni neovisni pokusi s različitim lokacijama uređaja, što je doprinijelo odstupanjima u rezultatima.

U ovom poglavlju predstavljen je energetski učinkovit hibridni sustav koji kombinira satelitske podatke Sentinel-2 s zemaljskim SPD sensorima za kontinuirano praćenje stanja usjeva u stvarnom vremenu. Sustav premošćuje ograničenja vremenskog razlučivanja satelitskih snimaka i oblačnog pokrivača mrežom SPD sklopova koji autonomno mjere spektralnu reflektanciju vegetacije i generiraju predikcije agronomskih atributa izravno na uređaju. Hibridni okvir akvizicije koji kombinira Sentinel-2 i SPD mjerenja omogućuje vremenski guste intervale NDVI mjerenja na razini polja, usporedive sa satelitskim NDVI nakon jednostavne regresijske korekcije.

Prediktivni modeli PLSR, validirani peterostrukom unakrsnom validacijom, ostvarili su zadovoljavajuću preciznost u predviđanju prinosa ( $MAE = 2,52$  t/ha) i vlažnosti zrna ( $MAE = 2,17$  %). Energetska analiza potvrdila je energetsku učinkovitost sustava, s procijenjenim vijekom trajanja baterija od 2 do 5 godina ovisno o frekvenciji slanja podataka. Time predloženi sustav pruža ekonomski učinkovito, skalabilno i dugotrajno rješenje za potporu agronomskom odlučivanju i procjenu prinosa u preciznoj poljoprivredi.

## 7. Zaključak

U ovom je radu predstavljeno cjelovito tehnološko rješenje koje odgovara na složene izazove suvremene poljoprivrede, objedinjujući bežične senzorske mreže, napredne algoritme strojnoga učenja te fuziju zemaljskih i satelitskih podataka. Temelj predloženoga sustava čini robusna i energetski učinkovita infrastruktura LoRaWAN. Dokazano je da se prikladnim odabirom komunikacijskih parametara, poput kodnog omjera (CR) i faktora širenja (SF), može ostvariti pouzdana komunikacija čak i u zahtjevnim uvjetima bez izravne optičke vidljivosti (NLOS), dok mehanizmi poput prilagodljive brzine prijenosa (ADR) znatno produljuju radni vijek baterijskih uređaja. Nakon osiguravanja stabilne komunikacijske infrastrukture u zvjezdastoj topologiji, ključan je iskorak napravljen u obradi prikupljenih multispektralnih očitavanja izravno na senzorskim sklopovima. U tu su svrhu razvijeni modeli strojnoga učenja za klasifikaciju rolanja lista kukuruza, što predstavlja dragocjen rani indikator stresa uzrokovanoga sušom i visokim temperaturama. U ovom su istraživanju uočene samo marginalne razlike između višeslojnoga perceptrona (MLP) i konvolucijskih neuronskih mreža (CNN), pri čemu oba modela pokazuju iznimno dobru sposobnost generalizacije zahvaljujući dodatnim slojevima koji suzbijaju pretreniranost. Ta je pretreniranost bila izražen problem kod jednoslojnoga perceptrona (SLP) iako je u stratificiranoj unakrsnoj validaciji SLP ostvario najvišu vrijednost  $F_1$  mjere, njegov značajan pad točnosti na nestratificiranim skupovima potvrdio je slabu sposobnost generalizacije plitkih neuronskih mreža s pretjeranim brojem neurona. Nadalje, u evaluaciji algoritama, strojevi potpornih vektora (SVM) pokazali su najveću ukupnu točnost predviđanja u validaciji nasumičnim podskupom. Ovi su nalazi u suglasju s prethodnim istraživanjima klasifikacije stresa na biljkama, ali i s rezultatima analize glavnih komponenti (PCA) u našem radu, koja potvrđuje učinkovitost jednostavnih tehnika redukcije dimenzionalnosti poput Tikhonovljeve regularizacije za ekstrakciju obilježja. Konačno, dodana vrijednost ovoga istraživanja leži u rigoroznoj usporednoj analizi uz korištenje dodatnoga, potpuno nepovezanoga skupa za validaciju. Iako CNN i SVM daju nešto konzervativnije, ali vrlo pouzdane metrike, pokazano je da MLP predstavlja ukupno najoptimalnije

rješenje za primjenu u IoT okruženju, ostvarujući poboljšanje  $F_1$  mjere za 1 %, uz zadržavanje niske računalne složenosti koja ne iscrpljuje energetske resurse mikroupravljača. Uz lokalnu obradu podataka, arhitektura je proširena i na makro-razinu razvojem inovativnoga hibridnog sustava koji kombinira satelitske podatke Sentinel-2 sa spomenutim zemaljskim SPD sensorima. Ovaj sustav uspješno premošćuje poznata ograničenja satelitskih snimaka, poput niske vremenske rezolucije i česte prisutnosti oblačnoga pokrivača. Integracijom satelitskih podataka i zemaljskih mjerenja, ostvareni su vremenski iznimno gusti intervali NDVI mjerenja na razini polja, koji su nakon jednostavne regresijske korekcije postali potpuno usporedivi sa satelitskim podacima. Na temelju tako objedinjenih podataka, prediktivni su modeli (PLSR) izravno na uređaju ostvarili visoku preciznost u predviđanju prinosa (MAE = 2,52 t/ha) i vlažnosti zrna (MAE = 2,17 %), zadržavši pritom procijenjeni vijek trajanja baterija između 2 i 5 godina. Unatoč postignutim rezultatima, istraživanje ukazuje i na određena ograničenja. Trenutni su modeli predikcije rolanja lista trenirani na podacima prikupljenima tijekom jedne razvojne faze biljke i u ograničenom broju klimatoloških scenarija, što iziskuje daljnja testiranja u raznolikim topografijama te uvjetima dostupnosti vode i hranjiva. Buduća bi istraživanja stoga trebala uključiti i transparentnije modele, poput stabala odlučivanja, kako bi se jasnije razlučili učinci prediktorskih varijabli unutar složenih bioloških sustava. Zaključno, dokazano je da sinergija robusne LoRaWAN komunikacije, pristupačnih multispektralnih senzora i optimiziranih algoritama strojnoga učenja predstavlja ekonomski učinkovito i skalabilno rješenje za kontinuirani nadzor usjeva. Povećanje gustoće informacija i njihova brza obrada izravno olakšavaju tranziciju prema Poljoprivredi 4.0, čvrsto povezujući održivu proizvodnju hrane s punim potencijalom umjetne inteligencije.

## Literatura

- [1] Reto J. Strasser, Merope Tsimilli-Michael, and Alaka Srivastava. *Analysis of the Chlorophyll a Fluorescence Transient*, pages 321–362. Springer Netherlands, Dordrecht, 2004. doi:[10.1007/978-1-4020-3218-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_12).
- [2] H. Lepeduš et al. Chlorophyll fluorescence analysis of photosynthetic performance in seven maize inbred lines under water-limited conditions. *Period. Biol.*, 114(1):73–76, 2012.
- [3] Domagoj imić, Hrvoje Lepeduš, Vlatka Jurković, Jasenka Antunović, and Vera Cesar. Quantitative genetic analysis of chlorophyll a fluorescence parameters in maize in the field environments. *Journal of Integrative Plant Biology*, 56(7):695–708, jul 2014. PMID: 24521148. doi:[10.1111/jipb.12179](https://doi.org/10.1111/jipb.12179).
- [4] Mario Franić, Maja Mazur, Mirna Volenik, Josip Brkić, Andrija Brkić, and Domagoj Šimić. Effect of plant density on agronomic traits and photosynthetic performance in the maize ibm population. *Poljoprivreda*, 21:36–40, 12 2015. doi:[10.18047/poljo.21.2.6](https://doi.org/10.18047/poljo.21.2.6).
- [5] M. Franić, A. Jambrović, Z. Zdunić, D. Šimić, and V. Galić. Photosynthetic properties of maize hybrids under different environmental conditions probed by the chlorophyll a fluorescence. *Maydica*, 64(3):M25, 2019.
- [6] Vlatko Galic, Mario Franic, Antun Jambrovic, Tatjana Ledencan, Andrija Brkic, Zvonimir Zdunic, and Domagoj Simic. Genetic correlations between photosynthetic and yield performance in maize are different under two heat scenarios during flowering. *Frontiers in Plant Science*, Volume 10 - 2019, 2019. doi:[10.3389/fpls.2019.00566](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00566).

- [7] Identification of nutrient deficiency in maize and tomato plants by in vivo chlorophyll a fluorescence measurements. *Plant Physiology and Biochemistry*, 81:16–25, 2014. Photosynthesis Research for Sustainability. doi:[10.1016/j.plaphy.2014.03.029](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.029).
- [8] Vlatko Galić, Maja Mazur, Domagoj Šimić, Zvonimir Zdunić, and Mario Franić. Special issue in honour of prof. reto j. strasser - plant biomass in salt-stressed young maize plants can be modelled with photosynthetic performance. *Photosynthetica*, 58:194–204, 05 2020. doi:[10.32615/ps.2019.131](https://doi.org/10.32615/ps.2019.131).
- [9] M. Franić, V. Galić, M. Mazur, and D. imić. Effects of excess cadmium in soil on jip-test parameters, hydrogen peroxide content and antioxidant activity in two maize inbreds and their hybrid. *Photosynthetica*, 56(2):660–669, jun 2018. doi:[10.1007/s11099-017-0710-7](https://doi.org/10.1007/s11099-017-0710-7).
- [10] Hazem M. Kalaji, Anjana Jajoo, Abdallah Oukarroum, Marian Brestic, Marek Zivcak, Izabela A. Samborska, Magdalena D. Cetner, Izabela Łukasik, Vasilij Goltsev, and Richard J. Ladle. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(4):102, mar 2016. doi:[10.1007/s11738-016-2113-y](https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y).
- [11] Steady-state and maximum chlorophyll fluorescence responses to water stress in grapevine leaves: A new remote sensing system. *Remote Sensing of Environment*, 73(3):283–297, 2000. doi:[10.1016/S0034-4257\(00\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00104-8).
- [12] Albert Porcar-Castell, Erhard Pfündel, Janne F. J. Korhonen, and Eija Juurola. A new monitoring pam fluorometer (moni-pam) to study the short- and long-term acclimation of photosystem ii in field conditions. *Photosynthesis Research*, 96(2):173–179, may 2008. doi:[10.1007/s11120-008-9292-3](https://doi.org/10.1007/s11120-008-9292-3).
- [13] E.H. Murchie and T. Lawson. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 64(13):3983–3998, 10 2013. doi:[10.1093/jxb/ert208](https://doi.org/10.1093/jxb/ert208).
- [14] P.J. Zarco-Tejada, V. González-Dugo, and J.A.J. Berni. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117:322–337, 2012. doi:[10.1016/j.rse.2011.10.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007).

- [15] R. Calderón, J.A. Navas-Cortés, C. Lucena, and P.J. Zarco-Tejada. High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of *Verticillium* wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, 139:231–245, 2013. doi:[10.1016/j.rse.2013.07.031](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.031).
- [16] G. Wohlfahrt, K. Gerdel, M. Migliavacca, E. Rotenberg, F. Tatarinov, J. Müller, A. Hammerle, T. Julitta, F. M. Spielmann, and D. Yakir. Sun-induced fluorescence and gross primary productivity during a heat wave. *Scientific Reports*, 8(1):14169, sep 2018. doi:[10.1038/s41598-018-32602-z](https://doi.org/10.1038/s41598-018-32602-z).
- [17] Christian Frankenberg and J. Berry. Solar induced chlorophyll fluorescence: Origins, relation to photosynthesis and retrieval. 12 2017. doi:[10.1016/B978-0-12-409548-9.10632-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10632-3).
- [18] G. Miao et al. Sun-induced chlorophyll fluorescence, photosynthesis, and light use efficiency of a soybean field from seasonally continuous measurements. *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, 123(2), 2018. doi:[10.1002/2017JG004180](https://doi.org/10.1002/2017JG004180).
- [19] X. Yang et al. Fluospec 2—an automated field spectroscopy system to monitor canopy solar-induced fluorescence. *Sensors (Switzerland)*, 18(7):2063, 2018.
- [20] Jidai Chen, Xinjie Liu, Shanshan Du, Yan Ma, and Liangyun Liu. Integrating sif and clearness index to improve maize gpp estimation using continuous tower-based observations. *Sensors*, 20(9), 2020.
- [21] Xi Yang, Hanyu Shi, Atticus Stovall, Kaiyu Guan, Guofang Miao, Yongguang Zhang, Yao Zhang, Xiangming Xiao, Youngryel Ryu, and Jung-Eun Lee. Fluospec 2—an automated field spectroscopy system to monitor canopy solar-induced fluorescence. *Sensors*, 18(7), 2018.
- [22] Josip Spisic, Josip Balen, Drago Zagar, and Vlatko Galic. Iot based network model and sensor node prototype for precision agriculture application. 2022. doi:[10.1109/WF-IoT54382.2022.10152218](https://doi.org/10.1109/WF-IoT54382.2022.10152218).
- [23] Joel Segarra, Maria Luisa Buchailot, Jose Luis Araus, and Shawn C. Kefauver. Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy*, 10(5), 2020.

- [24] Jeff Bennetzen and Sarah Hake. *Handbook of Maize: Its Biology*. 01 2009. doi:  
[10.1007/978-0-387-79418-1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-79418-1).
- [25] A. Sesay. Handbook of plant and crop physiology. *F. Crop. Res.*, 43(2–3):143–144,  
1995. doi:[10.1016/0378-4290\(95\)90064-0](https://doi.org/10.1016/0378-4290(95)90064-0).
- [26] Reto Strasser, Merope Tsimilli-Michael, and Alaka Srivastava. Analysis of the  
chlorophyll a fluorescence transient. *Chlorophyll fluorescence: A signature of pho-*  
*tosynthesis, advances in photosynthesis and respiration*, 01 2004. doi:[10.1007/  
978-1-4020-3218-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_12).
- [27] H. Kautsky and A. Hirsch. Neue versuche zur kohlen säureassimilation. *Naturwissens-*  
*chaften*, 1931. doi:[10.1007/BF01516164](https://doi.org/10.1007/BF01516164).
- [28] Reto J. Strasser and Govindjee. The fo and the o-j-i-p fluorescence rise in higher  
plants and algae. In Joan H. Argyroudi-Akoyunoglou, editor, *Regulation of Chlo-*  
*roplast Biogenesis*, pages 423–426. Springer US, Boston, MA, 1992. doi:[10.1007/  
978-1-4615-3366-5\\_60](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3366-5_60).
- [29] R. J. Strasser, A. Srivastava, and M. Tsimilli-Michael. The fluorescence transient as a  
tool to characterize and screen photosynthetic samples. In *Probing Photosynth. Mech.*  
*Regul. Adapt.* 2000.
- [30] Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820-nm reflec-  
tion changes during drying and after rehydration of the resurrection plant *haberlea*  
*rhodopensis*. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1797(6):1313–  
1326, 2010. 16th European Bioenergetics Conference 2010. doi:[10.1016/j.bbabbio.  
2010.03.008](https://doi.org/10.1016/j.bbabbio.2010.03.008).
- [31] N. Zhou, W. Dong, and X. Mei. Realistic simulation of seasonal variant maples. In  
*Proc. Second Int. Symp. Plant Growth Model. Simulation, Vis. Appl. PMA 2006*, pages  
295–301, 2006. doi:[10.1109/PMA.2006.29](https://doi.org/10.1109/PMA.2006.29).
- [32] P. J. Zarco-Tejada, A. Morales, L. Testi, and F. J. Villalobos. Spatio-temporal pat-  
terns of chlorophyll fluorescence and physiological and structural indices acquired from  
hyperspectral imagery as compared with carbon fluxes measured with eddy covariance.  
*Remote Sens. Environ.*, 2013. doi:[10.1016/j.rse.2013.02.003](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.003).

- [33] V. Galić et al. Genetic correlations between photosynthetic and yield performance in maize are different under two heat scenarios during flowering. *Front. Plant Sci.*, 10:566, 2019. doi:10.3389/fpls.2019.00566.
- [34] J. Spišić, D. Šimić, J. Balen, A. Jambrović, and V. Galić. Machine learning in the analysis of multispectral reads in maize canopies responding to increased temperatures and water deficit. *Remote Sensing*, 14(11):2596, 2022. doi:10.3390/rs14112596.
- [35] M. Zrnic, J. Spisic, A. Pejkovic, K. Grgic, J. Balen, and D. Zagar. Low-cost wireless sensor node for smart agriculture applications. In *2021 16th International Conference on Telecommunications (ConTEL)*, 2021.
- [36] Josip Spišić, Davor Vinko, Ivana Podnar Žarko, and Vlatko Galić. An energy-efficient hybrid system combining sentinel-2 satellite data and ground-based single-pixel detector for crop monitoring. *Applied Sciences*, 15(24), 2025. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/24/13241>, doi:10.3390/app152413241.
- [37] Parinaz Rahimzadeh-Bajgiran, Bayaer Tubuxin, and Kenji Omasa. Estimating chlorophyll fluorescence parameters using the joint fraunhofer line depth and laser-induced saturation pulse (fld-lisp) method in different plant species. *Remote Sensing*, 9(6), 2017. doi:10.3390/rs9060599.
- [38] Shanshan Du, Liangyun Liu, Xinjie Liu, Xinwei Zhang, Xianlian Gao, and Weigang Wang. The solar-induced chlorophyll fluorescence imaging spectrometer (sifis) onboard the first terrestrial ecosystem carbon inventory satellite (tecis-1): Specifications and prospects. *Sensors*, 20(3), 2020. doi:10.3390/s20030815.
- [39] Neus Sabater Medina, Luis Alonso, Sergio Cogliati, Jorge Vicent, Carolina Tenjo, Jochem Verrelst, and Jose Moreno. A sun-induced vegetation fluorescence retrieval method from top of atmosphere radiance for the flex/sentinel-3 tandem mission. In *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 2669–2672. 07 2015. doi:10.1109/IGARSS.2015.7326362.
- [40] Andreas Burkart, A. Schickling, M.Pilar Cendrero-Mateo, Thomas Wrobel, Micol Rossini, Sergio Cogliati, Tommaso Julitta, and Uwe Rascher. A method for uncertainty assessment of passive sun-induced chlorophyll fluorescence retrieval using an infrared

- reference light. *IEEE Sensors Journal*, 15:1–1, 08 2015. doi:[10.1109/JSEN.2015.2422894](https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2422894).
- [41] Menghao Ji and Bo-Hui Tang. Comparison of four different sun-induced chlorophyll fluorescence retrieval algorithms using simulated and field-measured data. pages 2741–2744, 07 2018. doi:[10.1109/IGARSS.2018.8519140](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519140).
- [42] Bayu Taruna Widjaja Putra. New low-cost portable sensing system integrated with on-the-go fertilizer application system for plantation crops. *Measurement*, 155:107562, 2020. doi:[10.1016/j.measurement.2020.107562](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107562).
- [43] L. Alves, E. Antunes, R. Ferreira, N. Miranda, and J. Nacif. A mesh sensor network based on bluetooth: Comparing topologies to crop monitoring. In *IX Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais*, pages 125–130, 2019.
- [44] C. Gull, M. T. Minkov, E. G. Pereira, and J. A. M. Nacif. A low-cost chlorophyll fluorescence sensor system. In *VI Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*, pages 186–191, 2016.
- [45] C. J. Gull. A novel low- cost chlorophyll fluorescence sensor for early detection of environmental pollution. Master’s thesis, University of Florida Smathers, 2017.
- [46] Vladimir Lysenko, Ya Guo, Alexey Kosolapov, Elena Usova, Tatyana Varduny, and Vladimir Krasnov. Polychromatic fourier-pam fluorometry and hyperspectral analysis of chlorophyll fluorescence from phaseolus vulgaris leaves: Effects of green light. *Information Processing in Agriculture*, 7(2):204–211, 2020. doi:[10.1016/j.inpa.2019.09.009](https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.009).
- [47] X. Liu and L. Liu. Improving chlorophyll fluorescence retrieval using reflectance reconstruction based on principal components analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(8):1645–1649, 2015. doi:[10.1109/LGRS.2015.2417857](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2417857).
- [48] Gina H Mohammed, Roberto Colombo, Elizabeth M Middleton, Uwe Rascher, Christiaan van der Tol, Ladislav Nedbal, Yves Goulas, Oscar Pérez-Priego, Alexander Damm, Michele Meroni, Joanna Joiner, Sergio Cogliati, Wouter Verhoef, Zbyněk Malenovský, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, John R Miller, Luis Guanter, Jose Moreno, Ismael

- Moya, Joseph A Berry, Christian Frankenberg, and Pablo J Zarco-Tejada. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. *Remote Sens Environ*, 231, July 2019. doi:[10.1016/j.rse.2019.04.030](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.030).
- [49] Maahiya Shaik and Sung Won Kim. Security in wireless sensor networks using omnet++: Literature review. *Sensors*, 25(10), 2025.
- [50] Ala Al-Fuqaha, Mohsen Guizani, Mehdi Mohammadi, Mohammed Aledhari, and Moussa Ayyash. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):2347–2376, 2015. doi:[10.1109/COMST.2015.2444095](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095).
- [51] Usman Raza, Parag Kulkarni, and Mahesh Sooriyabandara. Low-power wide-area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2):855–873, 2017. doi:[10.1109/COMST.2017.2652320](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320).
- [52] Md. Najmul Mowla, Neazmul Mowla, A. F. M. Shahen Shah, Khaled M. Rabie, and Thokozani Shongwe. Internet of things and wireless sensor networks for smart agriculture applications: A survey. *IEEE Access*, 11:145813–145852, 2023. doi:[10.1109/ACCESS.2023.3346299](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3346299).
- [53] Julia Amorós-López, Joan Vila-Francés, Luis Gómez-Chova, Luis Alonso, Luis Guanter, Secundino del Valle-Tascón, Javier Calpe, and José Moreno. Remote sensing of chlorophyll fluorescence for estimation of stress in vegetation: Recommendations for future missions. In *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 3769–3772, Barcelona, Spain, 2007. IEEE. doi:[10.1109/IGARSS.2007.4423663](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423663).
- [54] B. Balaji Bhanu, K. Raghava Rao, J. V. N. Ramesh, and Mohammed Ali Hussain. Agriculture field monitoring and analysis using wireless sensor networks for improving crop production. In *2014 Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, pages 1–7, Vijayawada, India, 2014. IEEE. doi:[10.1109/WOCN.2014.6923043](https://doi.org/10.1109/WOCN.2014.6923043).
- [55] T. Wark et al. Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks. *IEEE Pervasive Comput.*, 6(2):50–57, April 2007. doi:[10.1109/MPRV.2007.47](https://doi.org/10.1109/MPRV.2007.47).

- [56] H. C. Lee and K. H. Ke. Monitoring of large-area iot sensors using a lora wireless mesh network system: Design and evaluation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(9):2177–2187, 2018. doi:[10.1109/TIM.2018.2814082](https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2814082).
- [57] I. Butun, N. Pereira, and M. Gidlund. Security risk analysis of lorawan and future directions. *Future Internet*, 11(1):3, December 2018. doi:[10.3390/fi11010003](https://doi.org/10.3390/fi11010003).
- [58] O. Khutsoane, B. Isong, and A. M. Abu-Mahfouz. Iot devices and applications based on lora/lorawan. In *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 6107–6112, October 2017. doi:[10.1109/IECON.2017.8217061](https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217061).
- [59] M. I. Nashiruddin and A. Yusri. Sigfox network planning for smart metering based on internet of things for dense urban scenario. In *2020 8th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, 2020. doi:[10.1109/ICoICT49345.2020.9166398](https://doi.org/10.1109/ICoICT49345.2020.9166398).
- [60] M. Lauridsen, H. Nguyen, B. Vejlgard, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, and M. Sorensen. Coverage comparison of gprs, nb-iot, lora, and sigfox in a 7800km<sup>2</sup> area. In *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, June 2017. doi:[10.1109/VTCSpring.2017.8108182](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108182).
- [61] R. Fujdiak et al. On track of sigfox confidentiality with end-to-end encryption. In *Proceedings of the 13th International Conference on Availability, Reliability and Security*, pages 1–6, August 2018. doi:[10.1145/3230833.3232805](https://doi.org/10.1145/3230833.3232805).
- [62] A. Lavric, A. I. Petrariu, and V. Popa. Long range sigfox communication protocol scalability analysis under large-scale, high-density conditions. *IEEE Access*, 7:35816–35825, 2019. doi:[10.1109/ACCESS.2019.2903157](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903157).
- [63] 4mhz pwm buck regulator with hyperlight load switching scheme, 2011. Accessed: 01-Mar-2026. URL: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/268/mic23050-1082741.pdf>.
- [64] Rfm95w feature the loratm long range model.
- [65] Single chip solution for 1-cell li+ battery pack, 2021. Accessed: 01-Mar-2026. URL: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/115/AP9211-838143.pdf>.

- [66] Naga Srinivasarao Chilamkurthy, Om Jee Pandey, Anirban Ghosh, Linga Reddy Cenkaramaddi, and Hong-Ning Dai. Low-power wide-area networks: A broad overview of its different aspects. *IEEE Access*, 10:81926–81959, 2022. doi:[10.1109/ACCESS.2022.3196182](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3196182).
- [67] B. Zhu, W. Han, Y. Wang, N. Wang, Y. Chen, and C. Guo. Development and evaluation of a wireless sensor network monitoring system in various agricultural environments. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 48:170–183, 2014. doi:[10.1080/08327823.2014.11689812](https://doi.org/10.1080/08327823.2014.11689812).
- [68] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo. On the coverage of lpwans: range evaluation and channel attenuation model for lora technology. In *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, pages 55–59, 2015. doi:[10.1109/ITST.2015.7377400](https://doi.org/10.1109/ITST.2015.7377400).
- [69] A. E. Ferreira, F. M. Ortiz, L. H. M. K. Costa, et al. A study of the lora signal propagation in forest, urban, and suburban environments. *Annals of Telecommunications*, 75:333–351, 2020. doi:[10.1007/s12243-020-00789-w](https://doi.org/10.1007/s12243-020-00789-w).
- [70] Bernat Carbonés Fargas and Martin Nordal Petersen. Gps-free geolocation using lora in low-power wans. In *2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*, pages 1–6, 2017. doi:[10.1109/GIOTS.2017.8016251](https://doi.org/10.1109/GIOTS.2017.8016251).
- [71] Nico Podevijn, David Plets, Jens Trogh, Luc Martens, Pieter Suanet, Kim Hendrikse, and Wout Joseph. Tdoa-based outdoor positioning with tracking algorithm in a public lora network. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018(1):1864209. doi:[10.1155/2018/1864209](https://doi.org/10.1155/2018/1864209).
- [72] O. Iova, A. L. Murphy, G. P. Picco, L. Ghio, D. Molteni, F. Ossi, and F. Cagnacci. Lora from the city to the mountains: Exploration of hardware and environmental factors. In *Proceedings of the 2017 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, 2017.
- [73] Marius Lucian Andrei, Liviu Alexandru Rădoi, and Dan Ștefan Tudose. Measurement of node mobility for the lora protocol. In *2017 16th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, pages 1–6, 2017. doi:[10.1109/ROEDUNET.2017.8123763](https://doi.org/10.1109/ROEDUNET.2017.8123763).

- [74] Aloÿs Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen, and William Mark Townsley. A study of lora: Long range low power networks for the internet of things. *Sensors*, 16(9), 2016.
- [75] Juha Petäjäjärvi, Konstantin Mikhaylov, Marko Pettissalo, Janne Janhunen, and Jari Linatti. Performance of a low-power wide-area network based on lora technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13(3):1550147717699412, 2017. doi:[10.1177/1550147717699412](https://doi.org/10.1177/1550147717699412).
- [76] Shie-Yuan Wang, Yo-Ru Chen, Tzu-Yang Chen, Chia-Hung Chang, Yu-Hsiang Cheng, Chun-Chia Hsu, and Yi-Bing Lin. Performance of lora-based iot applications on campus. In *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pages 1–6, 2017. doi:[10.1109/VTCFall.2017.8288154](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2017.8288154).
- [77] V. Križanović, K. Grgić, J. Spišić, and D. Žagar. An advanced energy-efficient environmental monitoring in precision agriculture using lora-based wireless sensor networks. *Sensors*, 23(14):6332, 2023. doi:[10.3390/s23146332](https://doi.org/10.3390/s23146332).
- [78] Josip Spišić, Ana Pejković, Matko Zrnić, Višnja Križanović, Krešimir Grgić, and Drago Žagar. Lorawan parameters optimization for efficient communication. In *2022 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, pages 335–339, 2022. doi:[10.1109/SST55530.2022.9954704](https://doi.org/10.1109/SST55530.2022.9954704).
- [79] Semtech. Sx1272/73 - 860 mhz to 1020 mhz low power long range transceiver. Datasheet, March 2015. %url<http://www.semtech.com/images/datasheet/sx1272.pdf>.
- [80] Using cloud iot for disease prevention in precision agriculture. *Procedia Computer Science*, 130:575–582, 2018. The 9th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2018) / The 8th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2018) / Affiliated Workshops. doi:[10.1016/j.procs.2018.04.106](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.106).
- [81] Muhammad Shoaib Farooq, Shamyla Riaz, Adnan Abid, Kamran Abid, and Muhammad Azhar Naeem. A survey on the role of iot in agriculture for the implementation of smart farming. *IEEE Access*, 7:156237–156271, 2019. doi:[10.1109/ACCESS.2019.2949703](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949703).

- [82] HopeRF. Rfm95/96/97/98(w) v1.0 & v2.0 - low power long range transceiver module. [%urlhttps://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html](https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html).
- [83] A framework for use of wireless sensor networks in forest fire detection and monitoring. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(6):614–625, 2012. Special Issue: Advances in Geocomputation. [doi:10.1016/j.compenvurbsys.2012.03.002](https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2012.03.002).
- [84] Gilles Callebaut. Gillesc/loraenergysim: v0.1.0, April 2018. [doi:10.5281/zenodo.1217125](https://doi.org/10.5281/zenodo.1217125).
- [85] T. Bouguera, J.-F. Diouris, J.-J. Chaillout, R. Jaouadi, and G. Andrieux. Energy consumption model for sensor nodes based on lora and lorawan. *Sensors*, 18(7):2104, 2018. [doi:10.3390/s18072104](https://doi.org/10.3390/s18072104).
- [86] Gilles Callebaut, Geoffrey Ottoy, and Liesbet van der Perre. Cross-layer framework and optimization for efficient use of the energy budget of iot nodes. In *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6, 2019. [doi:10.1109/WCNC.2019.8885739](https://doi.org/10.1109/WCNC.2019.8885739).
- [87] Gilles Callebaut, Geoffrey Ottoy, and Liesbet Van der Perre. Optimizing transmission of iot nodes in dynamic environments. In *2020 International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS)*, pages 1–5, 2020. [doi:10.1109/COINS49042.2020.9191674](https://doi.org/10.1109/COINS49042.2020.9191674).
- [88] LoRa Alliance Technical Committee. RP002-1.0.5 LoRaWAN Regional Parameters. Technical specification, LoRa Alliance, 2024. Available: [%urlhttps://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-5-lorawan-regional-parameters](https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-5-lorawan-regional-parameters).
- [89] Dave Kjendal. LoRa Alliance Regional Parameters Overview. *Journal of ICT Standardization*, 9(1):35–46, 2021. [doi:10.13052/jicts2245-800X.912](https://doi.org/10.13052/jicts2245-800X.912).
- [90] Višnja Križanović, Krešimir Grgić, Josip Spišić, and Drago Žagar. An advanced energy-efficient environmental monitoring in precision agriculture using lora-based wireless sensor networks. *Sensors*, 23(14), 2023.
- [91] O. Lhotka, J. Kyselý, and A. Farda. Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties. *Theoretical and Applied Climatology*, 131:1043–1054, 2018. [doi:10.1007/s00704-016-2031-6](https://doi.org/10.1007/s00704-016-2031-6).

- [92] D.B. Lobell, M.J. Roberts, W. Schlenker, N. Braun, B.B. Little, R.M. Rejesus, and G.L. Hammer. Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the U.S. Midwest. *Science*, 344:516–519, 2014. doi:[10.1126/science.1251423](https://doi.org/10.1126/science.1251423).
- [93] J.L. Araus and J.E. Cairns. Field high-throughput phenotyping: The new crop breeding frontier. *Trends in Plant Science*, 19:52–61, 2014. doi:[10.1016/j.tplants.2013.09.008](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.09.008).
- [94] M. Trnka, P. Hlavinka, M. Možný, D. Semerádová, P. Štěpánek, J. Balek, L. Bartošová, P. Zahradniček, M. Bláhová, P. Skalák, et al. Czech drought monitor system for monitoring and forecasting agricultural drought and drought impacts. *International Journal of Climatology*, 40:5941–5958, 2020. doi:[10.1002/joc.6587](https://doi.org/10.1002/joc.6587).
- [95] L.F. Johnson and T.J. Trout. Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California’s San Joaquin Valley. *Remote Sensing*, 4:439–455, 2012. doi:[10.3390/rs4020439](https://doi.org/10.3390/rs4020439).
- [96] P. Ramos-Giraldo, C. Reberg-Horton, A.M. Locke, S. Mirsky, and E. Lobaton. Drought stress detection using low-cost computer vision systems and machine learning techniques. *IT Professional*, 22:27–29, 2020. doi:[10.1109/MITP.2020.2986103](https://doi.org/10.1109/MITP.2020.2986103).
- [97] P.J. Zarco-Tejada, V. González-Dugo, and J.A.J. Berni. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117:322–337, 2012. doi:[10.1016/j.rse.2011.10.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007).
- [98] J. Xue and B. Su. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017:1353691, 2017. doi:[10.1155/2017/1353691](https://doi.org/10.1155/2017/1353691).
- [99] G.H. Mohammed, R. Colombo, E.M. Middleton, U. Rascher, C. van der Tol, L. Nedbal, Y. Goulas, O. Pérez-Priego, A. Damm, M. Meroni, et al. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. *Remote Sensing of Environment*, 231:111177, 2019. doi:[10.1016/j.rse.2019.04.030](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.030).

- [100] B. Moulia. Leaves as shell structures: Double curvature, auto-stresses, and minimal mechanical energy constraints on leaf rolling in grasses. *Journal of Plant Growth Regulation*, 19:19–30, 2000. doi:[10.1007/s003440000004](https://doi.org/10.1007/s003440000004).
- [101] P. Monneveux, C. Sanchez, and A. Tiessen. Future progress in drought tolerance in maize needs new secondary traits and cross combinations. *Journal of Agricultural Science*, 146:287–300, 2008. doi:[10.1017/S0021859608007818](https://doi.org/10.1017/S0021859608007818).
- [102] J. Bolaños and G.O. Edmeades. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Research*, 48:65–80, 1996. doi:[10.1016/S0378-4290\(96\)01018-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(96)01018-4).
- [103] F. Baret, S. Madec, K. Irfan, J. Lopez, A. Comar, M. Hemmerlé, D. Dutartre, S. Praud, and M.H. Tixier. Leaf-rolling in maize crops: From leaf scoring to canopy-level measurements for phenotyping. *Journal of Experimental Botany*, 69:2705–2716, 2018. doi:[10.1093/jxb/ery068](https://doi.org/10.1093/jxb/ery068).
- [104] A.E. Maxwell, T.A. Warner, and F. Fang. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International Journal of Remote Sensing*, 39:2784–2817, 2018. doi:[10.1080/01431161.2018.1433343](https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343).
- [105] J. Behmann, A.K. Mahlein, T. Rumpf, C. Römer, and L. Plümer. A review of advanced machine learning methods for the detection of biotic stress in precision crop protection. *Precision Agriculture*, 16:239–260, 2015. doi:[10.1007/s11119-014-9372-7](https://doi.org/10.1007/s11119-014-9372-7).
- [106] W. Yang, T. Nigon, Z. Hao, G. Dias Paiao, F.G. Fernández, D. Mulla, and C. Yang. Estimation of corn yield based on hyperspectral imagery and convolutional neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184:106092, 2021. doi:[10.1016/j.compag.2021.106092](https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106092).
- [107] D. Sun, K. Robbins, N. Morales, Q. Shu, and H. Cen. Advances in optical phenotyping of cereal crops. *Trends in Plant Science*, 27:191–208, 2022. doi:[10.1016/j.tplants.2021.07.015](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.07.015).
- [108] I. Herrmann and K. Berger. Remote and proximal assessment of plant traits. *Remote Sensing*, 13:1893, 2021. doi:[10.3390/rs13101893](https://doi.org/10.3390/rs13101893).

- [109] L.M. Dwyer, D.W. Stewart, L. Carrigan, B.L. Ma, P. Neave, and D. Balchin. Guidelines for comparisons among different maize maturity. *Agronomy Journal*, 91:946–949, 1999. [doi:10.2134/agronj1999.916946x](https://doi.org/10.2134/agronj1999.916946x).
- [110] R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021.
- [111] M. Abadi, P. Barham, J. Chen, Z. Chen, A. Davis, J. Dean, M. Devin, S. Ghemawat, G. Irving, M. Isard, et al. TensorFlow: A system for large-scale machine learning. In *12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 16)*, pages 265–283, Savannah, GA, USA, 2016.
- [112] X.R.R. Sirault, A.G. Condon, J.T. Wood, G.D. Farquhar, and G.J. Rebetzke. “Rolled-upness”: Phenotyping leaf rolling in cereals using computer vision and functional data analysis approaches. *Plant Methods*, 11:52, 2015. [doi:10.1186/s13007-015-0095-4](https://doi.org/10.1186/s13007-015-0095-4).
- [113] A. Saglam, A. Kadioglu, M. Demiralay, and R. Terzi. Leaf rolling reduces photosynthetic loss in maize under severe drought. *Acta Botanica Croatica*, 73:315–332, 2014. [doi:10.2478/botcro-2013-0041](https://doi.org/10.2478/botcro-2013-0041).
- [114] A. Kadioglu, R. Terzi, N. Saruhan, and A. Saglam. Current advances in the investigation of leaf rolling caused by biotic and abiotic stress factors. *Plant Science*, 182:42–48, 2012. [doi:10.1016/j.plantsci.2011.01.013](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.01.013).
- [115] E. Kim, T.K. Ahn, and S. Kumazaki. Changes in antenna sizes of photosystems during state transitions in granal and stroma-exposed thylakoid membrane of intact chloroplasts in *Arabidopsis* mesophyll protoplasts. *Plant and Cell Physiology*, 56:759–768, 2015. [doi:10.1093/pcp/pcv004](https://doi.org/10.1093/pcp/pcv004).
- [116] P.D. Dao, Y. He, and C. Proctor. Plant drought impact detection using ultra-high spatial resolution hyperspectral images and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102:102364, 2021. [doi:10.1016/j.jag.2021.102364](https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102364).
- [117] Z. Lu, M.A. Quiñones, and E. Zeiger. Abaxial and adaxial stomata from Pima cotton (*Gossypium barbadense* L.) differ in their pigment content and sensitivity to light

- quality. *Plant, Cell & Environment*, 16:851–858, 1993. doi:[10.1111/j.1365-3040.1993.tb00509.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1993.tb00509.x).
- [118] J. Peñuelas and L. Filella. Technical focus: Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 3:151–156, 1998. doi:[10.1016/S1360-1385\(98\)01213-8](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01213-8).
- [119] J.P. Moore, M. Hearshaw, N. Ravenscroft, G.G. Lindsey, J.M. Farrant, and W.F. Brandt. Desiccation-induced ultrastructural and biochemical changes in the leaves of the resurrection plant *Myrothamnus flabellifolia*. *Australian Journal of Botany*, 55:482–491, 2007. doi:[10.1071/BT06206](https://doi.org/10.1071/BT06206).
- [120] V.S. Weber, J.L. Araus, J.E. Cairns, C. Sanchez, A.E. Melchinger, and E. Orsini. Prediction of grain yield using reflectance spectra of canopy and leaves in maize plants grown under different water regimes. *Field Crops Research*, 128:82–90, 2012. doi:[10.1016/j.fcr.2011.12.016](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.016).
- [121] D.E. Martin, J.D. López, and Y. Lan. Laboratory evaluation of the GreenSeeker™ hand-held optical sensor to variations in orientation and height above canopy. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5:43–47, 2012.
- [122] K.J. Dietz, C. Zörb, and C.M. Geilfus. Drought and crop yield. *Plant Biology*, 23:881–893, 2021. doi:[10.1111/plb.13304](https://doi.org/10.1111/plb.13304).
- [123] D. Reynolds, F. Baret, C. Welcker, A. Bostrom, J. Ball, F. Cellini, A. Lorence, A. Chawade, M. Khafif, K. Noshita, et al. What is cost-efficient phenotyping? optimizing costs for different scenarios. *Plant Science*, 282:14–22, 2019. doi:[10.1016/j.plantsci.2018.06.015](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.06.015).
- [124] D. Hunter, H. Yu, M.S. Pukish, J. Kolbusz, and B.M. Wilamowski. Selection of proper neural network sizes and architectures — a comparative study. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8:228–240, 2012. doi:[10.1109/TII.2012.2187914](https://doi.org/10.1109/TII.2012.2187914).
- [125] H. Hasan, H.Z.M. Shafri, and M. Habshi. A comparison between support vector machine (SVM) and convolutional neural network (CNN) models for hyperspectral image classification. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, volume 357, page 012035, 2019. doi:[10.1088/1755-1315/357/1/012035](https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012035).

- [126] M. Hasan, S. Ullah, M.J. Khan, and K. Khurshid. Comparative analysis of SVM, ANN and CNN for classifying vegetation species using hyperspectral thermal infrared data. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, volume 42, pages 1861–1868, 2019. doi:[10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1861-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1861-2019).
- [127] V. Galic, M. Franic, A. Jambrovic, T. Ledencan, A. Brkic, Z. Zdunic, and D. Simic. Genetic correlations between photosynthetic and yield performance in maize are different under two heat scenarios during flowering. *Frontiers in Plant Science*, 10:566, 2019. doi:[10.3389/fpls.2019.00566](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00566).
- [128] N. Tantalaki, S. Souravlas, and M. Roumeliotis. Data-driven decision making in precision agriculture: The rise of big data in agricultural systems. *Journal of Agricultural & Food Information*, 20(4):344–380, 2019. doi:[10.1080/10496505.2019.1638264](https://doi.org/10.1080/10496505.2019.1638264).
- [129] J. Segarra, M. L. Buchailot, J. L. Araus, and S. C. Kefauver. Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy*, 10(5):641, 2020. doi:[10.3390/agronomy10050641](https://doi.org/10.3390/agronomy10050641).
- [130] R. Abbasi, P. Martinez, and R. Ahmad. The digitization of agricultural industry — a systematic literature review on agriculture 4.0. *Smart Agricultural Technology*, 2:100042, 2022. doi:[10.1016/j.atech.2022.100042](https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042).
- [131] A. Rejeb, K. Rejeb, A. Abdollahi, F. Al-Turjman, and H. Treiblmaier. The interplay between the internet of things and agriculture: A bibliometric analysis and research agenda. *Internet of Things*, 19:100580, 2022. doi:[10.1016/j.iot.2022.100580](https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100580).
- [132] Y. C. Mihret, M. M. Takele, and S. M. Mintesinot. Advancements in agriculture 4.0 and the needs for introduction and adoption in ethiopia: A review. *Advances in Agriculture*, 2025:8828400, 2025. doi:[10.1155/adag/8828400](https://doi.org/10.1155/adag/8828400).
- [133] J. Bukowiecki, T. Rose, and H. Kage. Sentinel-2 data for precision agriculture? — a UAV-based assessment. *Sensors*, 21(8):2861, 2021. doi:[10.3390/s21082861](https://doi.org/10.3390/s21082861).
- [134] ams-OSRAM AG. AS7263 near infrared (NIR) 6-channel spectral sensor — data-sheet. %url<https://cdn.sparkfun.com/assets/1/b/7/3/b/AS7263.pdf>, 2025. Pristupljeno: 24. ožujka 2025.

- [135] G. L. Spadoni, A. Cavalli, L. Congedo, and M. Munafò. Analysis of normalized difference vegetation index (NDVI) multi-temporal series for the production of forest cartography. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20:100419, 2020. doi:[10.1016/j.rsase.2020.100419](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100419).
- [136] N. Darra, B. Espejo-Garcia, V. Psiroukis, E. Psomiadis, and S. Fountas. Spectral bands vs. vegetation indices: An AutoML approach for processing tomato yield predictions based on Sentinel-2 imagery. *Smart Agricultural Technology*, 10:100805, 2025. doi:[10.1016/j.atech.2024.100805](https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100805).
- [137] J. Meier, W. Mauser, T. Hank, and H. Bach. Assessments on the impact of high-resolution-sensor pixel sizes for common agricultural policy and smart farming services in european regions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169:105205, 2020. doi:[10.1016/j.compag.2019.105205](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105205).
- [138] T. Dong, J. Meng, J. Shang, J. Liu, and B. Wu. Evaluation of chlorophyll-related vegetation indices using simulated Sentinel-2 data for estimation of crop fraction of absorbed photosynthetically active radiation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(8):4049–4059, 2015. doi:[10.1109/JSTARS.2015.2400134](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2400134).
- [139] M. S. Boori, K. Choudhary, and A. V. Kupriyanov. Crop growth monitoring through Sentinel and Landsat data based NDVI time-series. *Computer Optics*, 44(3):409–419, 2020. doi:[10.18287/2412-6179-CO-700](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-700).
- [140] J. A. Martínez-Casasnovas, A. Uribeetxebarria, A. Escolà, and J. Arnó. Sentinel-2 vegetation indices and apparent electrical conductivity to predict barley yield. In *Precision Agriculture '19*. Wageningen Academic Publishers, 2019. doi:[10.3920/978-90-8686-888-9\\_86](https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_86).
- [141] X. Jin, Z. Li, H. Feng, Z. Ren, and S. Li. Deep neural network algorithm for estimating maize biomass based on simulated Sentinel 2A vegetation indices and leaf area index. *The Crop Journal*, 8(1):87–97, 2020. doi:[10.1016/j.cj.2019.06.005](https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.06.005).
- [142] R. Sonobe, Y. Yamaya, H. Tani, X. Wang, N. Kobayashi, and K. Mochizuki. Crop classification from Sentinel-2-derived vegetation indices using ensemble learning. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(2):026019, 2018. doi:[10.1117/1.JRS.12.026019](https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.026019).

- [143] J. Alvarez-Mozos, J. Villanueva, M. Arias, and M. Gonzalez-Audicana. Correlation between NDVI and Sentinel-1 derived features for maize. In *Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 6773–6776, Brussels, Belgium, 2021. doi:10.1109/IGARSS47720.2021.9554493.
- [144] Y. Ren, J. Zhou, J. Chen, S. Tao, L. Qin, G. Li, Z. Lin, and H. Luo. Novel vegetation indices for cotton boll opening status estimation using Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 12(10):1712, 2020. doi:10.3390/rs12101712.
- [145] T. Ma, Y. Hu, J. Wang, M. Beckline, D. Pang, L. Chen, X. Ni, and X. Li. A novel vegetation index approach using Sentinel-2 data and random forest algorithm for estimating forest stock volume in the Helan mountains, ningxia, china. *Remote Sensing*, 15(7):1853, 2023. doi:10.3390/rs15071853.
- [146] G. Fang, X. He, Y. Weng, and L. Fang. Texture features derived from Sentinel-2 vegetation indices for estimating and mapping forest growing stock volume. *Remote Sensing*, 15(11):2821, 2023. doi:10.3390/rs15112821.
- [147] S. Antognelli. The great value of vegetation indices from satellite for farmers, 2020.
- [148] J. Bellvert, A. Pelechà, M. Pamies-Sans, J. Virgili, M. Torres, and J. Casadesús. Assimilation of Sentinel-2 biophysical variables into a digital twin for the automated irrigation scheduling of a vineyard. *Water*, 15(13):2506, 2023. doi:10.3390/w15132506.
- [149] O. Strashok, M. Ziemiańska, and V. Strashok. Evaluation and correlation of Sentinel-2 NDVI and NDMI in kyiv (2017–2021). *Journal of Ecological Engineering*, 23(3):212–218, 2022. doi:10.12911/22998993/145659.
- [150] S. P. Ubale, J. Prasanna, A. A. Atre, C. Pande, and S. D. Gorantiwar. Application of NDVI in vegetation monitoring using Sentinel-2 data for shrirampur region of maharashtra. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 10(2):799–806, 2021. doi:10.20546/ijcmas.2021.1002.093.
- [151] C. J. Harmse, H. Gerber, and A. van Niekerk. Evaluating several vegetation indices derived from Sentinel-2 imagery for quantifying localized overgrazing in a semi-arid region of south africa. *Remote Sensing*, 14(7):1720, 2022. doi:10.3390/rs14071720.

- [152] S. B. Sulistyono, Siswantoro, A. Margiwiyo, Masrukhi, A. Mustofa, A. Sudarmaji, R. Ediati, R. Listanti, and H. H. Hidayat. Handheld Arduino-based near infrared spectrometer for non-destructive quality evaluation of siamese oranges. In *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, volume 653, page 012119, 2021. doi:10.1088/1755-1315/653/1/012119.
- [153] R. S. Fletcher and D. K. Fisher. A miniature sensor for measuring reflectance, relative humidity, and temperature: A greenhouse example. *Agricultural Sciences*, 9:1516–1527, 2018. doi:10.4236/as.2018.912107.
- [154] P. Lopin, P. Nawsang, S. Laywisadkul, and K. V. Lopin. Evaluation of low-cost multi-spectral sensors for measuring chlorophyll levels across diverse leaf types. *Sensors*, 25(7):2198, 2025. doi:10.3390/s25072198.
- [155] R. Macagga, G. Sossa, Y. Ayaribil, R. Bayot, P. Sanchez, J. Augustin, S. D. Bellingrath-Kimura, and M. Hoffmann. A new, low-cost ground-based NDVI sensor for manual and automated crop monitoring. *Smart Agricultural Technology*, 11:100892, 2025. doi:10.1016/j.atech.2025.100892.
- [156] D. P. Roy, H. K. Zhang, J. Ju, J. L. Gomez-Dans, P. E. Lewis, C. B. Schaaf, Q. Sun, J. Li, H. Huang, and V. Kovalsky. A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 176:255–271, 2016. doi:10.1016/j.rse.2016.01.023.
- [157] D. P. Roy, J. Li, H. K. Zhang, L. Yan, H. Huang, and Z. Li. Examination of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) reflectance anisotropy and the suitability of a general method to normalize MSI reflectance to nadir BRDF adjusted reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 199:25–38, 2017. doi:10.1016/j.rse.2017.06.019.
- [158] W. Lucht, C. B. Schaaf, and A. H. Strahler. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2):977–998, 2000. doi:10.1109/36.841980.
- [159] B.-H. Mevik and R. Wehrens. The pls package: Principal component and partial least squares regression in R. *Journal of Statistical Software*, 18(2):1–23, 2007. doi:10.18637/jss.v018.i02.

- [160] H. Izadkhah. A review of machine learning. In H. Izadkhah, editor, *Deep Learning in Bioinformatics*, pages 9–30. Academic Press, Cambridge, MA, USA, 2022. doi:  
[10.1016/B978-0-323-90928-9.00006-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90928-9.00006-8).
- [161] F. Wang, C. Zhao, and G. Yang. Development of a non-destructive method for detection of the juiciness of pear via VIS/NIR spectroscopy combined with chemometric methods. *Foods*, 9(12):1778, 2020. doi:[10.3390/foods9121778](https://doi.org/10.3390/foods9121778).

## Popis slika

|  |    |
|--|----|
| 2.1. Srednjaci dnevnih temperatura za 2020. godinu u usporedbi s podacima od 1961.-1990. godine (Izvor: Državni hidrometeorološki zavod, <a href="https://meteo.hr/">https://meteo.hr/</a> )   | 10 |
| 2.2. Kumulativna oborina (mm) za Osijek za lipanj 2020. s dnevnim percentilima izračunatim na temelju višegodišnjeg prosjeka za mjesec lipanj (Izvor: Državni hidrometeorološki zavod, <a href="https://meteo.hr/">https://meteo.hr/</a> ) | 11 |
| 2.3. Kumulativna oborina (mm) za Osijek za srpanj 2020. s dnevnim percentilima izračunatim na temelju višegodišnjeg prosjeka za mjesec srpanj (Izvor: Državni hidrometeorološki zavod, <a href="https://meteo.hr/">https://meteo.hr/</a> ) | 11 |
| 2.4. Štipaljka za adaptaciju na tamu na listu na klipu cvatuće biljke kukuruza (lijevo) i mjerenje fluorescencije klorofija a u polju ručnim fluorometrom (desno)  | 13 |
| 2.5. LoRa, klasa A   | 26 |
| 2.6. LoRa, mrežna topologija   | 27 |
| 3.1. Blokovski prikaz sklopovlja razvijenog prototipa  | 34 |
| 3.2. Prototip uređaja  | 37 |
| 3.3. Shema primopredajnog LoRa modula RFM95W   | 38 |
| 3.4. LM3658D punjač za litijsku bateriju   | 39 |
| 3.5. AP9211SA zaštitni integrirani krug za litijsku bateriju   | 41 |
| 3.6. Shema spajanja istosmjerni pretvarača napona  | 42 |
| 3.7. Snimanje karakteristike I2C komunikacijske sabirnice  | 43 |
| 4.1. Postavke mrežnih čvorova u CupCarbon simulatoru za pristupnik (s1) i senzorske čvorove (s2-s5).   | 46 |
| 4.2. Zvezdasta mrežna topologija   | 47 |
| 4.3. Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju ZigBee tehnologije  | 48 |

|  |    |
|--|----|
| 4.4. Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju LoRa tehnologije . . . . .  | 49 |
| 4.5. Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju Wi-Fi tehnologije . . . . .   | 49 |
| 4.6. Usporedba ukupne potrošnje energije senzorskih sklopova pri korištenju Zig-Bee, LoRa i Wi-Fi tehnologija . . . . .  | 50 |
| 4.7. Prikaz razmještaja čvorova u zvjezdastoj topologiji . . . . .   | 54 |
| 4.8. Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji . . . . .   | 55 |
| 4.9. Kombinacija linijskih mrežnih topologija sa CH čvorovima . . . . .  | 56 |
| 4.10. Prikaz razmještaja čvorova u linijskoj topologiji s CH čvorovima najbližima pristupniku . . . . .  | 57 |
| 4.11. Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju u LoRa mreži s linijskom topologijom i CH čvorovima najbližima pristupniku . . . . .                           | 58 |
| 4.12. Prikaz razmještaja čvorova u linijskoj topologiji s CH čvorovima najudaljenijima od pristupnika . . . . .  | 59 |
| 4.13. Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju u LoRa mreži s linijskom topologijom i CH čvorovima najudaljenijima od pristupnika . . . . .                   | 60 |
| 4.14. Usporedba ukupne potrošnje energije senzorskih sklopova (LoRaWAN) pri različitim mrežnim topologijama (trajanje simulacije 10 s) . . . . .   | 61 |
| 4.15. Prikaz razmještaja čvorova u mreži za analizu utjecaja prometa . . . . .   | 63 |
| 4.16. Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji uz jednaku količinu podataka s jednako udaljenih čvorova . . . . .   | 64 |
| 4.17. Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena simulacije [s] pri korištenju LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji uz različitu količinu podataka s jednako udaljenih čvorova . . . . . | 65 |
| 4.18. Usporedba potrošnje energije za čvorove S2 – S5 tijekom vremena [s] pri korištenju LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji uz rjeđe slanje podataka . . . . .  | 66 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.19. Usporedba ukupne potrošnje energije senzorskih čvorova pri slanju jednake i različite količine podataka . . . . .   | 67  |
| 4.20. Potrošnja energije pri primjeni LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji uz $SF = 7$ i $CR = 4/8$ . . . . .  | 73  |
| 4.21. Potrošnja energije pri primjeni LoRa tehnologije u zvjezdastoj topologiji uz $SF = 12$ i $CR = 4/5$ . . . . .   | 73  |
| 4.22. Usporedba ukupne potrošnje energije senzorskih sklopova pri različitim postavkama faktora širenja (SF) i kodnog omjera (CR) u zvjezdastoj topologiji .  | 74  |
| 4.23. Topologija terena između senzorskog sklopa i pristupnika u prvom scenariju .  | 79  |
| 4.24. Topologija terena između senzorskog sklopa i pristupnika u drugom scenariju   | 81  |
| 4.25. Topologija terena između senzorskog sklopa i pristupnika u trećem scenariju   | 82  |
| 4.26. Topologija terena između senzorskog sklopa i pristupnika u četvrtom scenariju   | 83  |
| 4.27. Postotak dostavljenih paketa pri minimalnoj veličini paketa . . . . .   | 87  |
| 4.28. Postotak dostavljenih paketa pri maksimalnoj veličini paketa . . . . .  | 88  |
| 4.29. Energije slanja (Tx) i primanja (Rx) u ukupnoj korištenoj energiji . . . . .  | 92  |
| 4.30. Ukupna energija pri različitim veličinama paketa . . . . .  | 94  |
| 4.31. Prikaz mrežne arhitekture . . . . .   | 97  |
| 5.1. Ožičenje senzora postavljenog na stativ koji je korišten za provedbu mjerenja. Na slici, lijevi prikaz prikazuje jedinicu na stativu, središnji prikaz donosi krupni plan ožičenja i 3D ispisanog nosača, dok desni prikaz prikazuje NIR spektrometar AMS AS7263. . . . .          | 104 |
| 5.2. Prikaz dnevnog hoda temperature ( $^{\circ}C$ ), deficita tlaka vodene pare-(VPD-a) (hPa) i dnevne količine oborina ( $mm/m^2$ ) za srpanj 2021. Sivi okviri označavaju vremena mjerenja, dok crveni okvir označava vrijeme mjerenja skupa podataka za vanjsku validaciju. . . . . | 104 |
| 5.3. (a) Biljke kukuruza bez rolanja listova (LR-) i biljke s rolanja listova (b) . .   | 105 |
| 5.4. Shematski prikaz konvolucijske neuronske mreže (CNN) s jednim konvolucijskim slojem, 2 skrivena potpuno povezana čvora, izravnavajućim slojem i softmax funkcijom. . . . .   | 109 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.5. | Analiza glavnih komponenti (PCA) očitavanja multispektralnog senzora i pripadajućih normaliziranih diferencijskih vegetacijskih indeksa. Prikaz (a) odnosi se na prvu i drugu glavnu komponentu, dok su prva i treća glavna komponenta prikazane pod (b). Strelice predstavljaju vlastite vektore varijabli (Tablica S1), a elipse označavaju 95-postotne intervale pouzdanosti za svaku skupinu na temelju Gaussove razdiobe. . . . .  | 113 |
| 5.6. | Graf različitih normaliziranih indeksa razlike vegetacije (VI) u proizvoljnim jedinicama (bez dimenzionalno) između dijagrama koji prikazuju rolanje lista (LR+) i dijagrama bez rolanja lista (LR-) i njihovih odgovarajućih razlika. . . . .  | 114 |
| 5.7. | Performanse modela jednoslojnog i višeslojnog perceptrona (a, b), konvolucijske neuronske mreže (c) te metode potpornih vektora (d) na vanjskom skupu podataka. Kvadranti s lijeva na desno te odozgo prema dolje predstavljaju stvarno negativne (TN), lažno pozitivne (FP), lažno negativne (FN) i stvarno pozitivne (TP) vrijednosti. . . . .  | 116 |
| 5.8. | Metrike performansi četiriju testiranih modela: jednoslojnog i višeslojnog perceptrona (SLP i MLP), konvolucijske neuronske mreže (CNN) te metode potpornih vektora (SVM) na vanjskom skupu podataka. . . . .   | 117 |
| 6.1. | Prikaz SPD senzorskog sklopa u poljskom pokusu. . . . .   | 124 |
| 6.2. | Blokovski prikaz sustava lijevo i eksperimentalni postav sa položajem senzora desno. . . . .  | 125 |
| 6.3. | Korelacijska matrica spektralnih kanala AS7263 i NDVI-ja . . . . .  | 128 |
| 6.4. | Linearni regresijski pravci između četiri najjača normalizirana vegetacijska indeksa ( $T_{730}/R_{610}$ , $U_{760}/R_{610}$ , $V_{810}/R_{610}$ i $W_{860}/R_{610}$ ) i referentne vrijednosti $NDVI_{S2}$ dobivene satelitom Sentinel-2. Boje označavaju pojedine SPD uređaje, a Pearsonovi korelacijski koeficijenti $r$ navedeni su u legendi za svaki uređaj. Uređaj BE7A0000000304A isključen je iz analize zbog nepouzdanih podataka zabilježenih tijekom satelitskih preleta. . . . . | 130 |
| 6.5. | Korelacijska matrica četiri najinformativnija normalizirana vegetacijska indeksa ( $T_{730}/R_{610}$ , $U_{760}/R_{610}$ , $V_{810}/R_{610}$ i $W_{860}/R_{610}$ ) i NDVI vrijednosti dobivenih SPD uređajem ( $NDVI_{SPD}$ ) odnosno satelitom Sentinel-2 ( $NDVI_{S2}$ ). . . . .   | 131 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.6. Predviđene vrijednosti prinosa (obojeni stupci) i izmjerene vrijednosti pri berbi (crni križići) za četiri SPD uređaja tijekom razdoblja od 7. do 20. srpnja 2023. Brojčane oznake unutar stupaca prikazuju predviđene vrijednosti za pojedini datum, a oznake iznad križića izmjerene vrijednosti pri berbi. . . . | 136 |
| 6.7. Predviđene vrijednosti vlažnosti zrna (obojeni stupci) i izmjerene vrijednosti pri berbi (crni križići) za četiri SPD uređaja tijekom razdoblja od 7. do 20. srpnja 2023. . . . .   | 137 |
| 6.8. Predviđene vrijednosti visine biljke (obojeni stupci) i izmjerene vrijednosti pri berbi (crni križići) za četiri SPD uređaja tijekom razdoblja od 7. do 20. srpnja 2023. Vidljivo je sustavno podcjenjivanje visine za parcele s izmjerenim vrijednostima iznad 200 cm. . . . .                                     | 138 |

## Popis tablica

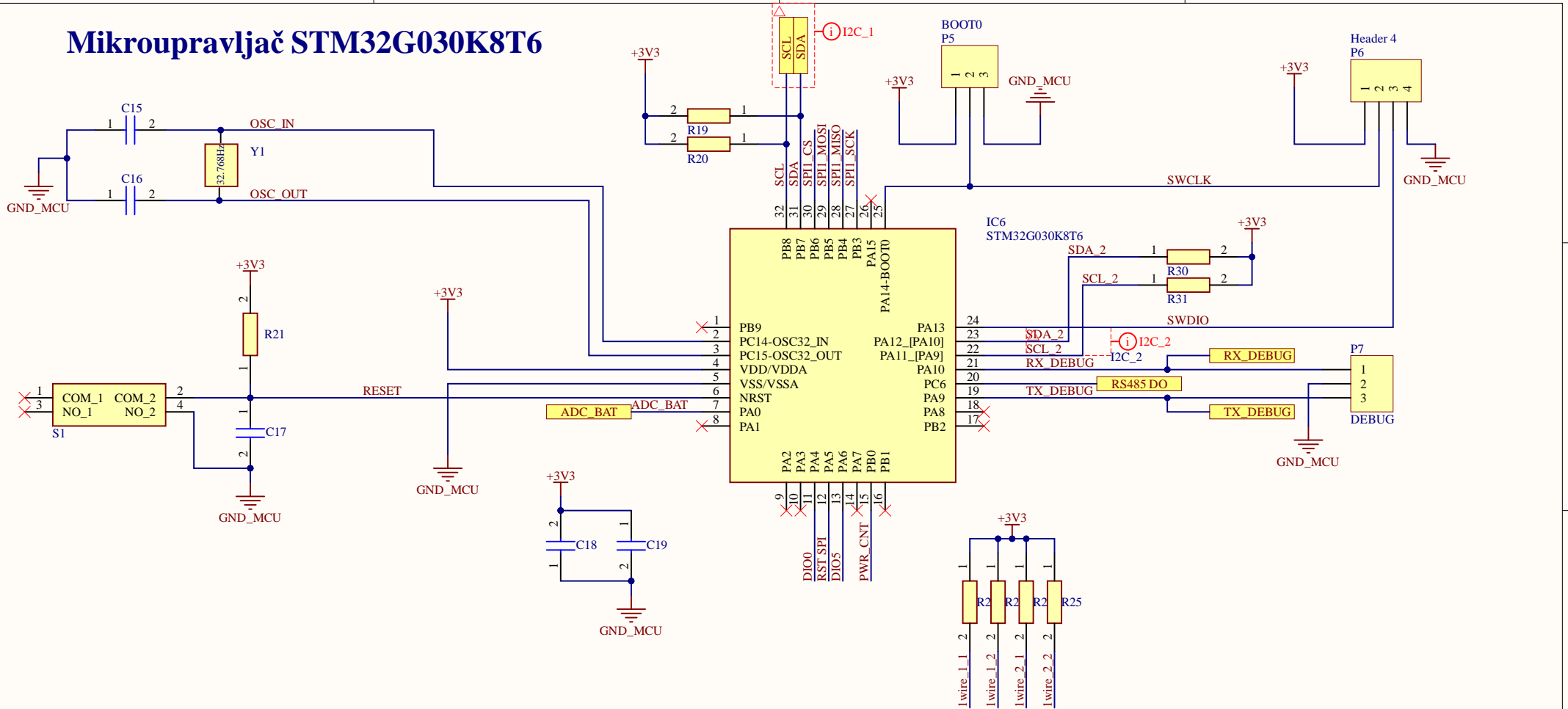
|   |    |
|---|----|
| 1.1. Usporedba spektrometra, multispektralnog i hiperspektralnog senzora . . . . .  | 4  |
| 2.1. Sigfox radio konfiguracija po regijama s pripadajućim frekvencijama i snagama  | 30 |
| 2.2. Usporedba IoT tehnologija (LoRa, Sigfox i NB-IoT) . . . . .  | 32 |
| 3.1. Glavne karakteristike i sučelja mikroupravljača STM32G030K8T6 . . . . .  | 36 |
| 3.2. Status punjenja baterije signaliziran putem svjetlećih dioda . . . . .   | 40 |
| 4.1. Primjer konfiguracije parametara pristupnika i čvorova s2–s5 u Cup Carbon simulatoru . . . . .                                     | 47 |
| 4.2. Procijenjeni vijek trajanja litijske ćelije (1800 mAh) za pojedine čvorove uz interval slanja od 15 min . . . . .                  | 51 |
| 4.3. Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova s2–s5 za zvjezdastu topologiju  | 55 |
| 4.4. Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova s2–s5 za linijsku topologiju s CH najbližima pristupniku . . . . .                  | 58 |
| 4.5. Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova s2–s5 za linijsku topologiju s CH najudaljenijima od pristupnika . . . . .          | 60 |
| 4.6. Procijenjeni vijek trajanja litijske ćelije (1800 mAh) uz slanje svake 15 min za različite topologije LoRaWAN mreže . . . . .      | 61 |
| 4.7. Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova za jednaku količinu prometa   | 64 |
| 4.8. Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova za različitu količinu prometa   | 65 |
| 4.9. Konfiguracija parametara pristupnika i čvorova za rjeđe slanje paketa . . . . .  | 66 |
| 4.10. Primjer konfiguracije parametara pristupnika i čvorova S2–S5 u CupCarbon simulatoru . . . . .                                     | 67 |
| 4.11. Procijenjeni vijek trajanja litijske ćelije (1800 mAh) uz slanje svake 15 min pri različitim količinama mrežnog prometa . . . . . | 67 |
| 4.12. Konfiguracija parametara za $SF = 7$ i $CR = 4/8$ . . . . .   | 72 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.13. Konfiguracija parametara za SF = 12 i CR = 4/5 . . . . .   | 72  |
| 4.14. Procijenjeni vijek trajanja litijske ćelije (1800 mAh) uz slanje svake 15 min pri različitim parametrima LoRa modulacije . . . . .   | 75  |
| 4.15. Minimalne vrijednosti RSSI-a i maksimalne vrijednosti SNR-a za LP i HP modove s aproksimacijom za SF12 (Scenarij 1: <100 m, NLOS) . . . . .  | 80  |
| 4.16. Minimalne vrijednosti RSSI-a i SNR-a za LP i HP modove (Scenarij 2: 5000 m, NLOS) . . . . .  | 81  |
| 4.17. Minimalne vrijednosti RSSI-a i SNR-a za LP i HP modove s aproksimacijom za SF12 (Scenarij 3: 7000 m, LOS, ruralno) . . . . .   | 82  |
| 4.18. Minimalne vrijednosti RSSI-a i SNR-a za LP i HP modove s aproksimacijom za SF12 (Scenarij 4: 7000 m, NLOS, ruralno). Znak „-“ označuje potpuni gubitak prijema. . . . .  | 84  |
| 4.19. Teoretske razine RF osjetljivosti za širinu kanala od 125 kHz prema specifikacijama primopredajnika [82]. . . . .  | 85  |
| 4.20. Postotak isporuke paketa (DP) u različitim scenarijima za odabrane kombinacije komunikacijskih parametara . . . . .  | 89  |
| 4.21. Format podatkovnog dijela paketa s prikazom mogućih veličina korisnog sadržaja i pripadajućih parametara . . . . .   | 96  |
| 5.1. Pregled eksperimentalnog dizajna pokusa. . . . .  | 103 |
| 5.2. Sirova očitavanja senzora na šest valnih duljina i 15 vrijednosti normaliziranih vegetacijskih indeksa (VI) izračunatih iz jedinstvenih kombinacija šest valnih duljina, izraženih kao srednja vrijednost $\pm$ standardna devijacija za parcele kukuruza s rolanjem lista (LR+) i bez rolanja lista (LR-) u trening ( $n = 2180$ ) i validacijskom ( $n = 145$ ) skupu podataka izmjerenih multispektralnim sensorom. Stupac $p$ označava značajnost prema dvosmjernom Welchovom t-testu pri $\alpha < 0,05$ (*), $< 0,01$ (**) i $< 0,001$ (***). Vrijednosti $p > 0,05$ označene su kao neznačajne (n.z.). . . . . | 112 |
| 5.3. Rezultati dvaju postupaka validacije za jednoslojni i višeslojni perceptron (SLP i MLP), konvolucijsku neuronsku mrežu (CNN) i stroj potpornih vektora (SVM) na skupu za treniranje ( $n = 2180$ ). Vrijednost u zagradi za stratificiranu 5-struku križnu validaciju predstavlja standardnu devijaciju točnosti između sklopova. . . . .   | 115 |

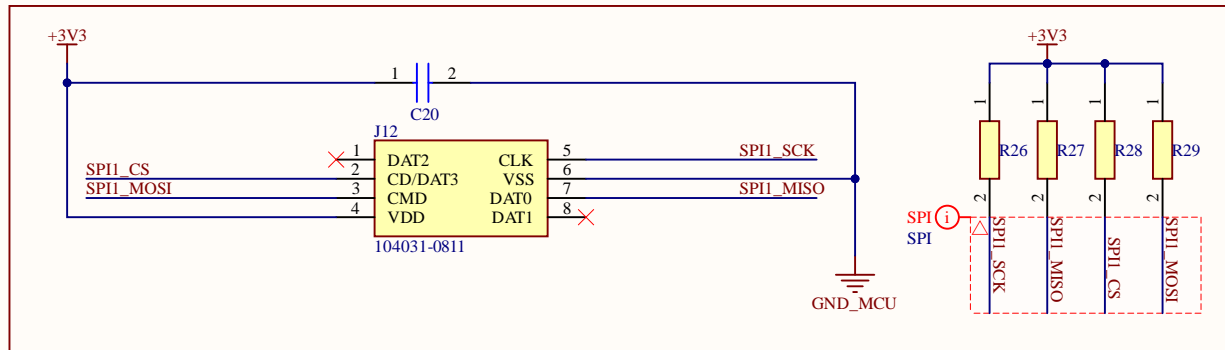
|   |     |
|---|-----|
| 6.1. Koordinate i okolišni podatci SPD uređaja. . . . .   | 123 |
| 6.2. Spektralni kanali senzora AS7263 s odgovarajućim pojasnim širinama (FWHM). . . . .                               | 125 |
| 6.3. Opisna statistika vrijednosti $NDVI_{SPD}$ . . . . .   | 127 |
| 6.4. Opisna statistika vrijednosti $NDVI_{S2}$ iz Sentinel-2 opažanja. . . . .  | 127 |
| 6.5. Metapodatci parcela s izmjerenim agronomskim atributima pri berbi. . . . .                                       | 134 |
| 6.6. Slobodni članovi i regresijski koeficijenti PLSR modela za visinu biljke, vlaž-<br>nost zrna i prinos. . . . .   | 135 |
| 6.7. Usporedba predviđenih i izmjerenih vrijednosti pri berbi (empirijski rezultati,<br>7.–20. srpnja 2023.). . . . . | 138 |
| 6.8. Analiza potrošnje energije tijekom jednog radnog ciklusa SPD uređaja ( $U =$<br>3 V). . . . .                    | 139 |

## Prilozi

# Mikroupravljáč STM32G030K8T6

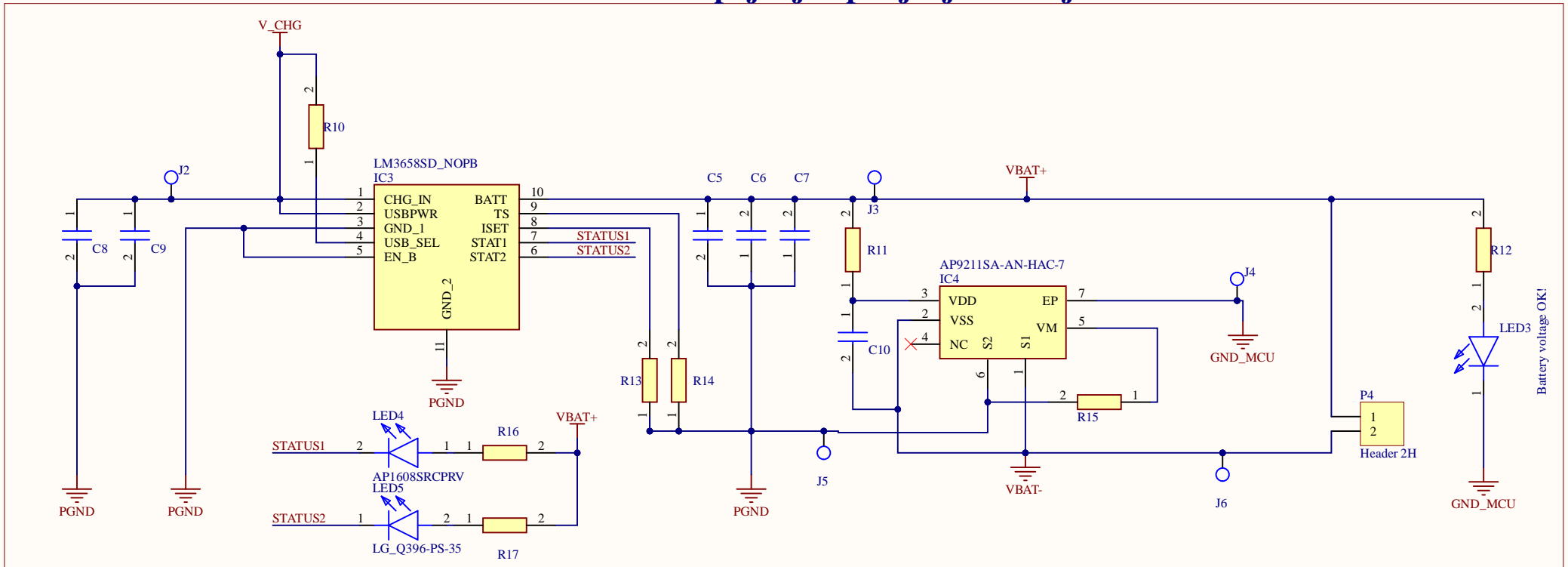


## Micro SD card connector

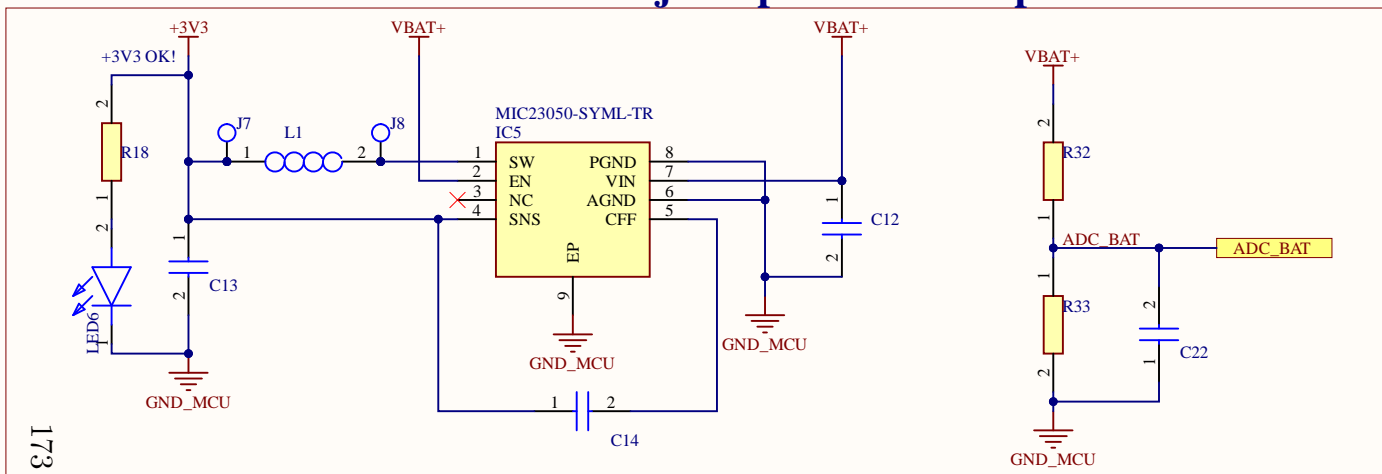


|       |                                  |           |
|-------|----------------------------------|-----------|
| Title |                                  |           |
| Size  | Number                           | Revision  |
| A4    |                                  |           |
| Date: | 5.23.2026                        | Sheet of  |
| File: | G:\My Drive\...\STM32_MCU.SchDoc | Drawn By: |

# Shema napajanja i punjenja baterije



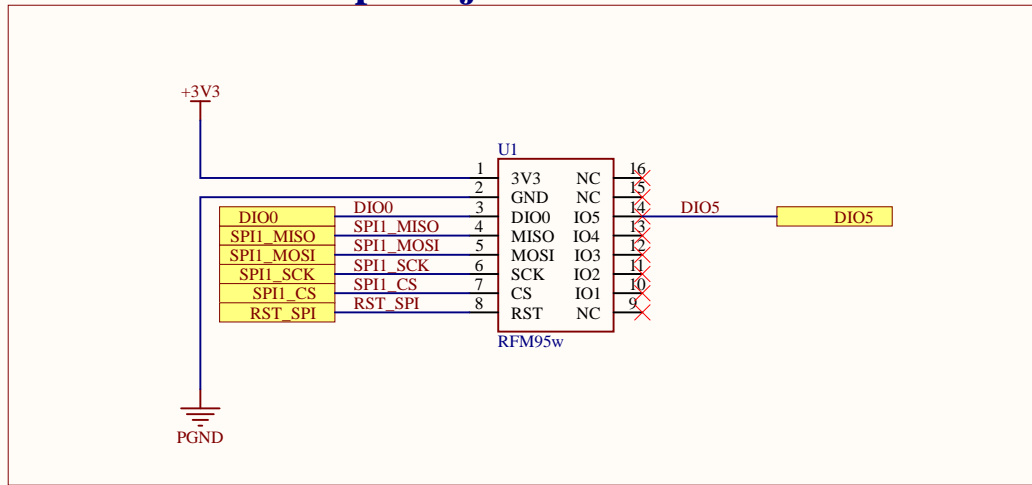
# Istosmjerni pretvarača napona



|       |   |          |
|-------|---|----------|
| Title |   |          |
| Size  | Number  | Revision |
| A4    |   |          |
| Date: | 5.23.2026                                     | Sheet of |
| File: | G:\My Drive\...\Solar_and_battery_charger\... | By:      |

173

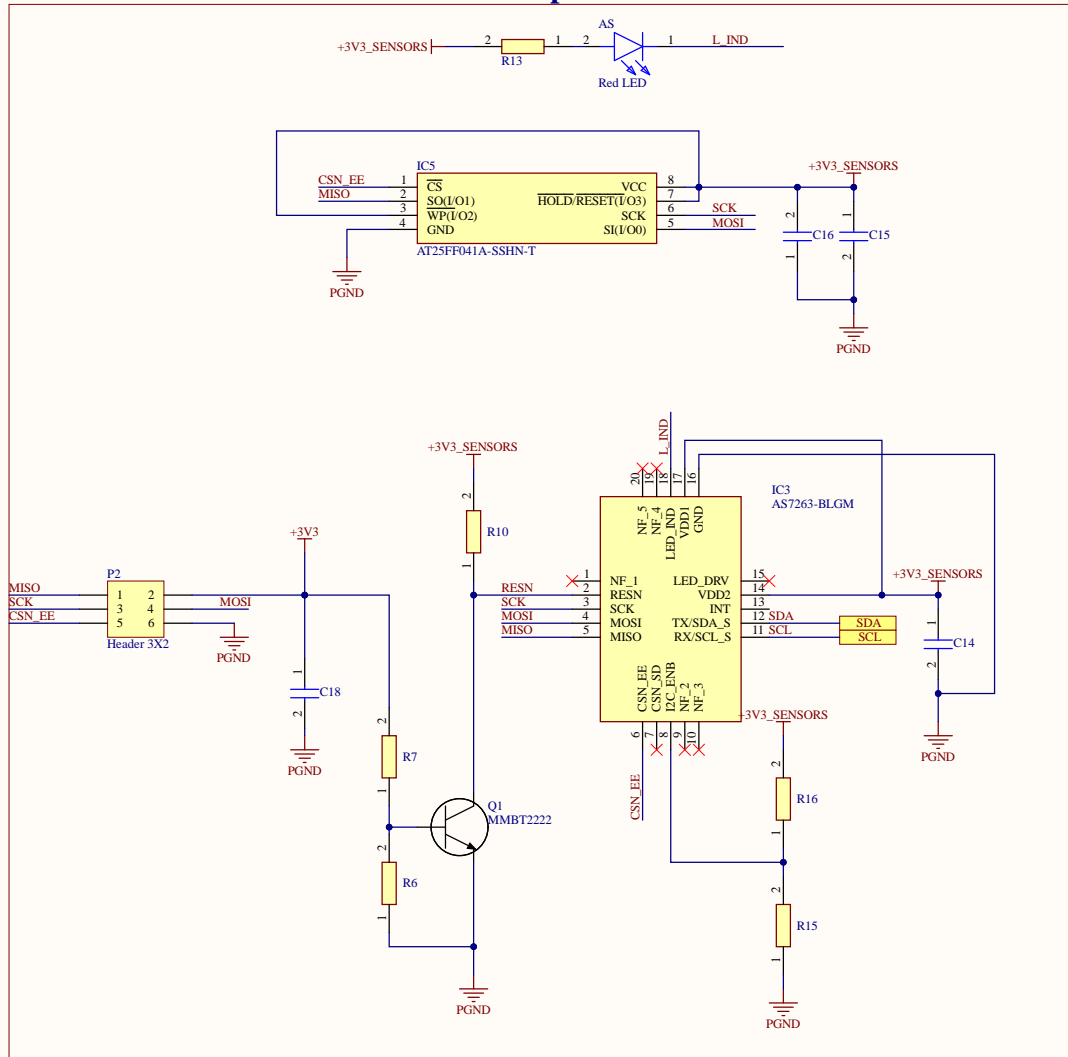
# Primopredajni modul RFM95W



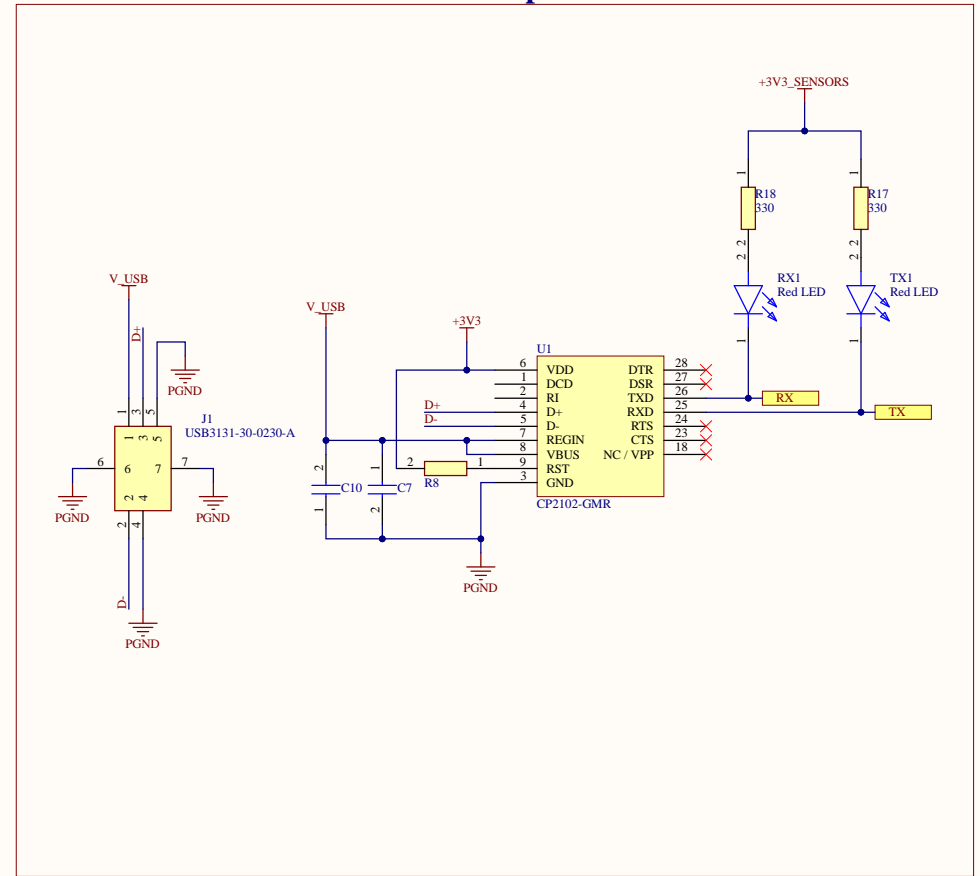
174

|       |                              |           |
|-------|------------------------------|-----------|
| Title |                              |           |
| Size  | Number                       | Revision  |
| A4    |                              |           |
| Date: | 5.23.2026                    | Sheet of  |
| File: | G:\My Drive\...\RFM95.SchDoc | Drawn By: |

## AS7263 NIR spektrometar



## USB - TTL pretvarač



| Title |                                       |           |
|-------|---------------------------------------|-----------|
| Size  | Number                                | Revision  |
| A3    |                                       |           |
| Date: | 5.23.2026                             | Sheet of  |
| File: | G:\Other computers\...\AS7265x.SchDoc | Drawn By: |

## Sažetak

Suvremena precizna poljoprivreda zahtijeva pouzdane, jeftine i energetski učinkovite senzorske sklopove za kontinuirano praćenje usjeva u stvarnim poljskim uvjetima. Satelitske platforme poput Sentinel-2 pružaju vrijedne informacije o vegetaciji na globalnoj razini. Međutim, njihova je primjenjivost ograničena intervalima ponovnog preleta, oblačnim pokrivačem i grubom prostornom razlučivošću u odnosu na pojedinačne parcele. Zemaljske senzorske mreže mogu nadopuniti satelitska opažanja mjerenjima visoke vremenske razlučivosti na razini parcele. Da bi to bilo moguće, takve mreže moraju zadovoljiti stroga ograničenja u pogledu potrošnje energije, komunikacije i računalnih resursa.

Ova doktorska disertacija opisuje razvoj, validaciju i terensku primjenu autonomnog senzorskog sklopa za procjenu morfo-fizioloških parametara biljaka kukuruza. Sklop se temelji na AS7263 NIR spektrometru, integriranom u bežičnu LoRaWAN mrežu. Rad obuhvaća četiri međusobno povezana znanstvena doprinosa.

Prvi doprinos čini eksperimentalna analiza parametara protokola LoRaWAN s ciljem povećanja postotka uspješno dostavljenih paketa u poljoprivrednim okruženjima. Sustavnom varijacijom faktora razlaganja, snage odašiljanja i radnog ciklusa identificirane su konfiguracije koje održavaju pouzdanu komunikaciju uz minimalnu potrošnju energije.

Drugi doprinos predstavlja metodu za detekciju rolanja lista kukuruza u stvarnom vremenu, kao vidljivog pokazatelja vodnog stresa. Metoda se temelji na vrednovanju četiriju modela strojnog učenja jednoslojnog perceptrona, višeslojnog perceptrona, konvolucijske neuronske mreže i metode potpornih vektora treniranih na spektralnim očitajima u šest kanala koji pokrivaju raspon 610–860 nm. Višeslojni perceptron pokazao se najprikladnijim rješenjem jer postiže najbolju ravnotežu između točnosti klasifikacije i računalne učinkovitosti potrebne za izvođenje obrade na samom sklopu.

Treći doprinos uvodi metodu izračuna normaliziranog diferencijalnog vegetacijskog indeksa (NDVI) izravno iz spektralnih očitajanja senzora AS7263 na samom uređaju. Kao NIR kanal koristi se kanal V (810 nm), a kao crveni kanal koristi se kanal S (680 nm). Dobivena

vrijednost  $NDVI_{SPD}$  može se izračunavati i prenositi u stvarnom vremenu, čime se učinkovito premošćuju vremenski raskorci satelitskih mjerenja. Korelacijska analiza s referentnim vrijednostima satelita Sentinel-2 rezultirala je Pearsonovim koeficijentima u rasponu od 0,84 do 0,93.

Četvrti doprinos uspostavlja energetske učinkovitu metodu za predikciju prinosa, visine biljke i vlažnosti zrna kukuruza. Metoda primjenjuje parcijalnu regresiju najmanjih kvadrata (PLSR) na prošireni skup od dvadeset i jednog prediktora: šest izvornih kanala i petnaest normaliziranih vegetacijskih indeksa izvedenih kao parovni omjeri tih kanala. Četiri indeksa  $T_{730}/R_{610}$ ,  $U_{760}/R_{610}$ ,  $V_{810}/R_{610}$  i  $W_{860}/R_{610}$  pokazuju najjaču korelaciju s referentnim satelitskim vrijednostima. PLSR je odabran zbog svoje sposobnosti modeliranja prediktora s izraženom multikolinearnošću.

Terenska validacija provedena je tijekom vegetacijske sezone 2023. godine na pet parcela podvrgnutih različitim režimima navodnjavanja i gnojidbe dušikom. Predikcije prinosa postigle su  $MAE = 2,52$  t/ha i  $RMSE = 2,64$  t/ha. Predikcije vlažnosti zrna rezultirale su s  $MAE = 2,17$  % i  $RMSE = 2,39$  %, što je u praktično prihvatljivim granicama za podršku odlučivanju pri berbi. Predikcije visine biljke pokazale su veće pogreške ( $MAE = 20,35$  cm), što se može pripisati ograničenom broju kalibracijskih uzoraka u višem rasponu visina i učincima spektralne saturacije u kasnoj fazi sezone.

Analiza potrošnje energije pokazala je prosječnu snagu od 0,23 mW, pri čemu faza mirovanja čini 98,4 % radnog ciklusa. Sustav napajan s jednom ćelijom litijske baterije postiže procijenjeni radni vijek od dvije do pet godina. Time se potvrđuje njegova prikladnost za dugotrajnu, energetske autonomnu primjenu.

Disertacija pokazuje da pažljivo projektirani jeftini senzorski sklop može pružiti informacije o vegetaciji usporedive kvalitete sa satelitskim mjerenjima, uz prevladavanje njihovih ključnih vremenskih ograničenja. To je ostvareno kombinacijom šestokanalnog NIR spektrometra, komunikacije LoRaWAN i lokalnog zaključivanja na uređaju. Četiri doprinosa zajedno čine cjelovit okvir od prikupljanja spektralnih podataka, preko pouzdanog bežičnog prijenosa i izračuna indeksa na uređaju, do prediktivnog modeliranja agronomskih ishoda. Rad time unapređuje praktično stanje područja energetske autonomnog senzorskog praćenja u preciznoj poljoprivredi.

# Abstract

Modern precision agriculture demands reliable, low-cost, and energy-efficient sensing systems for continuous crop monitoring under real field conditions. Satellite platforms such as Sentinel-2 provide valuable vegetation information at a global scale, but their utility is limited by revisit intervals, cloud cover, and coarse spatial resolution relative to individual plots. Ground-based sensor networks can complement satellite observations with high-temporal-resolution measurements at the plot level, provided they overcome strict power, communication, and computational constraints. This doctoral thesis presents the development, validation, and field deployment of an autonomous sensor node based on the AS7263 six-channel near-infrared (NIR) spectrometer, integrated into a LoRaWAN wireless network for the assessment of morpho-physiological parameters of maize plants, and it addresses four scientific contributions.

The first contribution consists of an experimental analysis of LoRaWAN protocol parameters aimed at maximizing the packet delivery ratio in agricultural environments through systematic variation of spreading factor, transmission power, and duty cycle, identifying configurations that maintain reliable communication while minimizing energy consumption.

The second contribution presents a method for real-time detection of maize leaf rolling, a visible indicator of water stress, based on the evaluation of four machine learning models: single-layer perceptron, multi-layer perceptron, convolutional neural network, and support vector machine trained on spectral readings from six channels covering the 610-860 nm range. The multi-layer perceptron emerged as the most suitable choice, offering the best balance between classification accuracy and computational efficiency required for on-device inference.

The third contribution introduces an on-device method for the computation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) directly from AS7263 spectral readings, using channel V (810 nm) as the NIR band and channel S (680 nm) as the red band. The resulting  $NDVI\_SPD$  value can be computed and transmitted in real time, effectively bridging temporal gaps in satellite acquisitions, with correlation analysis against reference Sentinel-2

values yielding Pearson coefficients in the range 0.84-0.93. The fourth contribution establishes an energy-efficient method for the prediction of maize yield, plant height, and grain moisture content, employing Partial Least Squares Regression (PLSR) applied to an extended feature set of twenty-one predictors: the six original channels and fifteen normalized vegetation indices derived as pairwise combinations, with four indices: T/R, U/R, V/R, and W/R, showing the strongest correlation with reference satellite values. PLSR was selected for its ability to model predictors with strong multicollinearity. Field validation was conducted during the 2023 maize growing season on five plots subjected to different irrigation and nitrogen treatments: yield predictions achieved MAE = 2.52 t/ha and RMSE = 2.64 t/ha, grain moisture predictions yielded MAE = 2.17% and RMSE = 2.39%, both within practically acceptable limits for harvest decision support, while plant height predictions showed larger errors (MAE = 20.35 cm) attributable to limited calibration samples in the upper height range and to spectral saturation effects at late season. Energy consumption analysis yielded an average power draw of 0.23 mW with the sleep phase accounting for 98.4% of the cycle, and the system powered by single lithium cell achieves an estimated operational lifetime of two to five years, confirming its suitability for long-term, energy-autonomous deployment.

The thesis demonstrates that a carefully designed low-cost sensor node can deliver vegetation information of a quality comparable to satellite-based observations while overcoming their key temporal limitations. This is achieved by combining a six-channel NIR spectrometer with LoRaWAN communication and on-device inference. Together, the four contributions form a coherent framework from spectral acquisition, through reliable wireless transmission and on-device index computation, to predictive modelling of agronomic outcomes advancing the practical state of the art in energy-autonomous precision agriculture sensing.

## Životopis

Josip Spišić rođen je 26. srpnja 1995. godine u Đakovu. Osnovnu školu završava 2010. godine u Semeljcima te iste godine upisuje Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer tehničar za računarstvo. Kroz srednjoškolsko obrazovanje sudjeluje na projektima vezanim uz električne automobile kao što su dizajniranje i izrada prvog solarnog električnog automobila u srednjim školama pri projektu „Solarni električni automobil“ (SOELA) i ljetna škola „Dizajniranje solarnih automobila“ 2013. godine u slobodno vrijeme volontira kao asistent u nastavi robotike u Centru tehničke kulture Osijek. 2014. godine upisuje Elektrotehnički fakultet Osijek, stručni studij, smjer automatika koji završava 2017. godine. Iste godine upisuje razlikovne obveze na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, te u jesen 2018. godine upisuje diplomski studij Računarstva, smjer Robotika i umjetna inteligencija. Nakon završetka studija zapošljava se na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija i upisuje poslijediplomski doktorski studij računarstva. U slobodno vrijeme bavi se elektronikom i sportom. Aktivno se služi engleskim jezikom u govoru i pismu.