

# Analiza primjene bežičnih tehnologija širokog područja pokrivanja male snage pri IoT umrežavanju u pametnim gradovima

---

Brnada, Marijana

Master's thesis / Diplomski rad

2019

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:878928>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-09**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



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

**Sveučilišni studij**

**ANALIZA PRIMJENE BEŽIČNIH TEHNOLOGIJA  
ŠIROKOG PODRUČJA POKRIVANJA MALE SNAGE  
PRI IoT UMREŽAVANJU U PAMETNIM  
GRADOVIMA**

**Diplomski rad**

**Marijana Brnada**

**Osijek, 2019.**

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	1
2. Bežični prijenos podataka .....	2
2.1. Internet stvari .....	3
2.2. Tehnologije za bežični prijenos kratkog dometa .....	4
2.2.1. Bluetooth .....	4
2.2.2. WiFi .....	4
2.2.3. NFC.....	6
2.2.4. RFID .....	6
2.2.5. ZigBee.....	7
3. LPWAN .....	9
3.1. Značajke LPWAN-a.....	10
3.2. LPWAN tehnologije i usporedbe .....	11
3.2.1. Sigfox .....	13
3.2.2. LoRa .....	13
3.2.3. Telensa.....	15
3.2.4. Ingenu.....	15
3.2.5. LTE.....	15
4. Praktični dio.....	17
4.1. <i>CupCarbon</i> .....	17
4.2. Praktični scenariji .....	18
4.3. Prvi praktični scenarij .....	21
4.3.1. Kod korišten u prvom scenariju .....	21
4.3.2. Rezultati prvog praktičnog scenarija .....	23
4.4. Drugi praktični scenarij.....	25
4.4.1. Kod korišten u drugom praktičnom scenariju .....	25
4.4.2. Rezultati drugog praktičnog scenarija .....	27
4.5. Treći praktični scenarij.....	30
4.5.1. Kod korišten u trećem praktičnom scenariju .....	30
4.5.2. Rezultati trećeg praktičnog scenarija .....	32
5. Zaključak .....	33
Sažetak.....	37
Summary .....	37
Životopis.....	38

## **1. Uvod**

Brojne mogućnosti koje pruža koncept Interneta stvari dovele su do njegove primjene u različitim područjima, poput medicine, industrije, poljoprivrede, multimedije te brojnih drugih. Takav koncept bežičnog umrežavanja stvorio je i preduvjete za razvoj pametnih gradova. Pojam „pametni grad“ odnosi se na procese inovativnog i efikasnog upravljanja gradom koji upotrebljava informacijske i komunikacijske tehnologije i druga sredstva za poboljšanje kvalitete života građana, zadovoljavajući pri tome potrebe sadašnjih i budućih generacija i pazeći na aspekte okoliša, te ekonomske i društvene aspekte.

Prema [1], pametni grad predstavlja grad koji upotrebljava različite vrste elektroničkih senzora za prikupljanje podataka potrebnih za upravljanje različitim resursima. To su podatci prikupljeni iz različitih izvora koji se analiziraju u svrhu poboljšanja kvalitete života u gradu. Pametni grad zamišljen je tako da povezuje informacijske i komunikacijske tehnologije te razne fizičke uređaje povezane s mrežom kako bi se poboljšala učinkovitost gradskih usluga. [2] Postoje također i pametne aplikacije kojima je cilj upravljati različitim procesima u gradu i omogućiti reakcije u stvarnom vremenu kako bi pametni grad bio što spremniji i kako bi omogućio učinkovitije rješavanje problema. [3] Primjeri tehnologija i programa temeljenih na konceptu pametnih gradova implementirani su u brojnim gradovima diljem svijeta, poput Singapura, Dubaija, Milton Keynesa, Southamptona, Amsterdama, Barcelone, Madrida, Stockholma i New Yorka, ali i mnogim drugim.

### **1.1. Zadatak diplomskog rada**

U ovome radu potrebno je opisati komunikacijske tehnologije širokog područja pokrivanja male snage koje se u okruženjima pametnih gradova primjenjuju pri konceptu IoT umrežavanja. Potrebno je međusobno usporediti značajke pojedinih rješenja. U simuliranom urbanom testnom okruženju potrebno je međusobno analizirati i usporediti efikasnost primjene odabranih rješenja. U praktičnom dijelu rada potrebno je načiniti usporedbu LoRa rješenja s rješenjima u kojima se za prijenos koriste tehnologije kratkog dometa zbog usporedbe u potrošnji energije.

## 2. Bežični prijenos podataka

Bežična mreža predstavlja svaku računalnu mrežu koja za ostvarivanje komunikacije između mrežnih čvorova koristi bežične podatkovne veze. [4] Bežično umrežavanje je način umrežavanja kojim se u kućanstvima i poslovnim prostorima izbjegavaju procesi uvođenja žične infrastrukture, a takav oblik umrežavanja služi kao veza između opreme koja se nalazi na različitim lokacijama. [5] Bežični telekomunikacijski procesi provode se i upravljaju putem uspostavljenih radijskih veza. Implementacija se odvija na fizičkom sloju OSI modela. [6] Primjeri bežičnog umrežavanja uključuju mobilne mreže, bežične lokalne mreže (eng. *Wireless Local Area Network*, skr. WLAN), bežične senzorske mreže, satelitske mreže i zemaljske mikrovalne mreže.

Glavni elementi bežične mreže su bazne stanice, čvorovi, odnosno mrežni uređaji i krajnji uređaji u bežičnoj mreži i bežične veze. Zadatak bazne stanice je predaja i prijem podatkovnih paketa unutar mreže. Primjer bazne stanice je pristupna točna (engl. *Access Point*, AP) koja kontrolira pristup komunikacijskom mediju. Krajnji čvor bežične mreže (engl. *host*) predstavlja krajnji uređaj na kojemu se izvršavaju aplikacije. Postoje različite vrste bežičnih tehnologija o kojima ovisi domet i brzina prijenosa podataka unutar mreže. [30]

Kako bi dvije točke mogle bežično komunicirati, bežične veze se ostvaruju uz primjenu elektromagnetskih valova. Elektromagnetski valovi nastaju kretanjem elektrona u prostoru određenim brojem oscilacija u sekundi. Za bežičan prijenos informacija koriste se radiosignali, mikrovalovi, infracrveni valovi i vidljivi dio svjetla. Više frekvencije elektromagnetskog zračenja imaju UV, X i Gama zrake, ali se one ne upotrebljavaju budući da se ne šire dobro kroz zgrade i nisu pogodne za zdravlje. Radio valovi se nazivaju i radiofrekvencijskim nosiocima zbog toga što prenose energiju signala do prijemnika. Zadaća radioprijemnika je demodulirati primljeni signal tako da se podešava na određenu radio frekvenciju. [9]

IEEE 802.11 standardi određuju dva načina rada: infrastrukturni i *ad hoc* način rada.

Infrastrukturni način rada koristi se za povezivanje bežičnih krajnjih uređaja, poznatim i pod nazivom bežični klijenti, na postojeću ožičenu mrežu uz pomoć bežičnog usmjerivača ili pristupne točke. *Ad hoc* način rada koristi se za izravno povezivanje bežičnih klijenata, bez potrebe za bežičnim usmjerivačem ili pristupnom točkom. *Ad hoc* mreža sastoji se od bežičnih klijenata koji svoje podatke šalju izravno jedni drugima. [31]

## 2.1. Internet stvari

Pojam Internet stvari (engl. *Internet of Things*, IoT) obuhvaća sve komunikacijske procese koji se ostvaruju između čvorova povezanih putem interneta ili izravno jednih s drugima. Putem Interneta stvari ostvaruju se tri oblika komunikacije. Prvi je komunikacija ljudi sa stvarima, drugi je komunikacija između stvari, a treći komunikacija između uređaja (engl. *Machine-to-Machine*, M2M). Omogućuje se komunikacija različitih krajnjih uređaja, od jednostavnih senzora do pametnih telefona te različitih predmeta od novih vrsta materijala. Kombinacijom takvih povezanih uređaja s automatiziranim sustavima moguće je prikupiti informacije i analizirati ih u cilju lakšeg rješavanja određenih zadataka ili učenja iz nekog procesa. [6]

Budući da će i u 21. stoljeću broj stanovnika na Zemlji rasti, povećavat će se i potražnja za inteligentnim održivim okruženjima koja smanjuju negativan utjecaj na okoliš i omogućuje visoku kvalitetu života građana. Pametan grad obuhvaća koncepte pametne ekonomije, pametne mobilnosti, pametnog okruženja i pametnog upravljanja. [5]

Postoji nekoliko načina na koje se danas koristi ovakva tehnologija diljem svijeta. Neki od najčešćih načina su:

- senzori ugrađeni u mostove za detekciju degradacije i učinaka seizmičkih sila;
- senzori ugrađeni u prometnice za detekciju propadanja i habanja, kao i protok prometa;
- senzori ugrađeni u zgrade za detekciju sile vjetra, slijeganja temelja, seizmičkih aktivnosti i dr.;
- senzori u unutrašnjosti zgrada za detekciju prisutnosti ljudi i kontrolu rasvjete, grijanja i proračivanja i drugih sustava, za ograničavanje potrošnje energije kada je to nepotrebno;
- senzori na ulazima za prepoznavanja lica i povećanje sigurnosti unutar stambenih i poslovnih zgrada, ureda i sl. [5]

## 2.2. Tehnologije za bežični prijenos kratkog dometa

### 2.2.1. Bluetooth

Bluetooth je standard za bežičnu razmjenu podataka između fiksnih i mobilnih uređaja na kratkim udaljenostima pomoću UHF radiovalova kratke valne duljine u industrijskim, znanstvenim i medicinskim (ISM) radijskim frekvencijskim pojasevima. Izvorno je zamišljen kao bežična alternativa RS-232 podatkovnim kabelima. Bluetoothom upravlja *Special Interest Group* (SIG) organizacija koja povezuje više od 30.000 tvrtki članica na području telekomunikacija, računarstva, umrežavanja i potrošačke elektronike. IEEE standardizira Bluetooth kao IEEE 802.15.1. Bluetooth SIG nadzire razvoj specifikacije, upravlja procesom ovjere i zaštite brenda. [10] Bluetooth radi na frekvencijama između 2402 i 2480 MHz, odnosno 2400 i 2483,5 MHz, uključujući sigurnosne pojaseve širine 2 MHz na dnu i 3,5 MHz na vrhu. To je globalno nelicencirani industrijski, znanstveni i medicinski radio frekvencijski pojas kratkog dometa od 2,4 GHz. Bluetooth koristi radio metodu nazvanu frekvencijski skokovi (eng. *Frequency Hop*). Dijeli prenesene podatke u pakete i prenosi svaki paket na jedan od 79 određenih Bluetooth kanala. Svaki kanal ima širinu pojasa od 1 MHz. Obično obavlja 1600 skokova u sekundi, s omogućenim prilagodljivim skokovima frekvencije. [10]

### 2.2.2. WiFi

Wi-Fi predstavlja skup radio tehnologija koje se obično koriste za bežično lokalno umrežavanje uređaja (WLAN) koje se temelji na IEEE 802.11 standardu. Wi-Fi je prvotno zamišljen kao zamjena LAN kabela, kao veza na Internet između uređaja s većim napajanjem, kao što su prijenosna računala i pisači. Razvijen je tako da ima visoku propusnost podataka od 10 do 50 Mbit/s. Postoje mnoge inačice IEEE 802.11xx standarda i one se stalno razvijaju kako nastaju nove ideje i tehnologije. Trenutno najpopularniji oblik IoT-a djeluje u ISM opsezima 2,4 i 5 GHz. Različite verzije Wi-Fi protokola određene su raznim IEEE 802.11 protokolnim standardima, s različitim radio tehnologijama koje određuju opsege, radio frekvencije i brzine koje se mogu postići. Wi-Fi je potencijalno podložniji napadima nego žične mreže jer svatko u dometu bežične mreže može joj pokušati pristupiti. Wi-Fi zaštićeni pristup (WPA) je skup tehnologija stvoren za zaštitu informacija koje se prosljeđuju kroz Wi-Fi mrežu i uključuje rješenja za privatne i poslovne mreže. [11]

Budući da se WiFi u raznim inačicama pojavljuje već desetljećima, ima mnogo proizvođača čipova i modula, što dizajnerima pruža puno izbora u hardverskim komponentama za WiFi. Treba biti oprezan pri procjeni specifikacija radija, posebno prijemnika, jer mogu postojati velike razlike u performansama (npr. u dometu, propusnosti, brzini slanja paketa i potrošnji baterije), ovisno o tome koji su čipovi odabrani. Budući da je WiFi namijenjen brzom prijenosu podataka, obično troši više energije od ostalih protokola kratkog dometa, pa dizajneri vjerojatno neće ciljati na 10-godišnji vijek trajanja malih baterija WiFi uređaja. Budući da se WiFi može izravno povezati s internetom, sigurnosni problemi trebali bi uzeti u obzir takav dizajn, osiguravajući privatnost podataka i pravilan rad uređaja. [11]

802.11 je skup IEEE standarda koji regulira načine bežičnog prijenosa podataka. Danas se uobičajeno koriste u verzijama 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n i 802.11ac za pružanje bežične povezanosti u kući, uredu i nekim poslovnim objektima. Wi-Fi 1 neslužbeni je naziv za 802.11b. Inačica 802.11b WiFi koristi tehniku modulacije raspršenja spektra izravnim slijedom (DSSS) koja se naziva komplementarno kodiranje kodova (CCK) u 2,4 GHz ISM opsegu i ima pristup CSMA/CA kako bi se izbjegla signalna kolizija s drugim uređajima koji rade na principu 802.11b. CSMA/CA metoda pruža stvarnu brzinu do oko 6 Mbit/s. [11]

802.11g WiFi je također 2,4 GHz WiFi standard i djeluje pri većim brzinama prijenosa pomoću OFDM modulacije i CSMA/CA za smanjenje kolizije. Signal ortogonalnog frekvencijskog multipleksa (OFDM) sastoji se od mnogobrojnih radio nosioca, od kojih svaki istovremeno nosi dio podataka koji se šalje preko linka. OFDM također omogućava radiju da nadoknadi smetnje u kretanju i višestaznom signalu koji se može naći u zgradama s puno metala ili kod WiFi korisnika koji su u pokretu. Iako ima drugačiju modulacijsku shemu, može surađivati s 802.11b kako bi se izbjegle smetnje, iako će miješani sustavi imati nižu propusnost od čistih 802.11g instalacija. Radiopostaje mogu adaptivno mijenjati vrstu modulacije radi poboljšanja propusnosti u povoljnijim RF okruženjima, donoseći brzine do 54 Mbits/s. Radio stanice na svakom kraju veze usklađuju modulacije i brzine prema lokalnom radijskom okruženju. To može biti velika prednost za uređaje koji trebaju visoku brzinu prijenosa podataka ili instalacije s velikim brojem uređaja, jer brzina također znači kraći prijenos i manje prometno opterećenje. Budući da 802.11a koristi ISM radio frekvencije 5 GHz, dostupno je više propusnog opsega. To znači da signali na ovoj frekvenciji neće prodirati u predmete, kao ni signali od 2,4 GHz. Dostupni kanali se razlikuju ovisno o pojedinoj državi. Pored toga, opseg od 5 GHz koriste i određeni radari, tako da su neki kanali (zvani "DFS" kanali) onemogućeni za WiFi ili dopušteni samo pod uvjetom da moraju isprazniti kanale u kojima je detektiran radarski signal. [12] Drugi



problem koji se odnosi na 802.11a jest da mnoge bežične mreže za *backhaul* djeluju u ovom frekvencijskom rasponu od 5 GHz, tako da smetnje mogu nastati zbog velike snage susjednog kanala ili antene zrake u blizini ovih mreža. Uz sve to, područje od 5 GHz ima puno prostora za puno signala velike propusnosti, ali s istim smetnjama koje se pojavljuju u svakom nelicenciranom spektru. Inačice 802.11n i 802.11ac izmjene su standarda 802.11 koji dodaju složenije funkcionalnosti fizičkog sloja 802.11 mrežama, uključujući MIMO, oblikovanje snopa, združivanje okvira i šire kanale. To omogućava veću brzinu podataka, ali zahtijeva znatno više energije, a najčešće se pojavljuje u složenijoj linijskoj opremi, npr. bežičnim usmjerivačima, a obično ne u samim IoT uređajima, pa su stoga izvan fokusa ovog rada. [12]

### **2.2.3. NFC**

NFC označava skraćenicu od *Near Field Communication*, a odnosi se na bežičnu tehnologiju koja radi na malim udaljenostima. NFC čipovi komuniciraju na udaljenostima od nekoliko centimetara. Ovisno o tome kako je NFC čip dizajniran, on može raditi i na način da se komunikacija ostvaruje dodiranjem dva uređaja koji razmjenjuju podatke. NFC radi na frekvenciji 13.56 MHz, uz protok podataka od 424 kb/s. Količina informacija koja se šalje NFC tehnologijom je jako mala, svega nekoliko kilobita. Rad se zasniva na principu magnetske indukcije koja se stvara između dvije antene uređaja. Između te dvije antene stvara se inducirano polje kroz koje se mogu slati električni impulsi, tj. podatci. Postoje dva tipa čipa: prijemnik i predajnik. Prijemnik je pasivan, što znači da mu ne treba napajanje, dok predajnik mora imati napajanje. Veliku prednost koju NFC ima nad sličnim tehnologijama, npr. Bluetoothom, je u tome što ne zahtijeva uparivanje uređaja. Zbog toga ga je bolje upotrebljavati na mjestima gdje postoji puno uređaja, zato što ne može doći do miješanja signala, a i samim time što nema potrebe za uspostavom konekcije, rad s NFC uređajima je puno brži. [13]

### **2.2.4. RFID**

Identifikacija radiofrekvencije (RFID) je upotreba radiovalova za čitanje i hvatanje informacija pohranjenih na oznaci koja je pridružena objektu. Oznaka se može čitati na udaljenosti od nekoliko metara i ne mora biti u izravnom vidokrugu čitača koji treba pratiti. RFID sustav sastoji se od dva dijela: oznake ili naljepnice te čitača. RFID oznake ili naljepnice su ugrađene s odašiljačem i prijemnikom. RFID komponenta na oznakama ima dva dijela: mikročip koji

pohranjuje i obrađuje informacije te antenu za primanje i prijenos signala. Oznaka sadrži određeni serijski broj za određeni objekt. Da bi se pročitala informacija kodirana na oznaci, dvosmjerni radio-odašiljač, koji se naziva ispitivačem ili čitačem, emitira signal oznaci pomoću antene. Oznaka odgovara informacijama zapisanim u memoriji. Ispitivač će zatim prenijeti rezultate čitanja u RFID računalni program. [14]

Postoje dvije vrste transpondera: pasivni i aktivni. Pasivni transponderi nemaju svoje napajanje nego crpe energiju izravno iz energetske polja čitača. Doseg područja čitanja uvelike ovisi o veličini transpondera, njegovoj frekvenciji kao i anteni. Aktivni transponderi su složeniji od pasivnih i imaju vlastito napajanje koje im omogućuje puno veći doseg čitanja. Tagovi napajani baterijom ili akumulatorom imaju ograničeni životni vijek i uz to su i proizvodni troškovi nekoliko puta veći nego kod pasivnih transpondera. Postoje sustavi sa 125 kHz, 134.2 kHz, 13.56 MHz, 868 MHz, 915 MHz te 2.45 GHz koji su na raspolaganju i koji imaju različite karakteristike čitanja i dosega. [15]

### **2.2.5. ZigBee**

ZigBee je najpopularniji industrijski bežični mrežni standard za povezivanje senzora, instrumenata i sustava upravljanja. ZigBee i IEEE 802.15.4 imaju male brzine prijenosa podataka. Kod ZigBee-a, oprema za kontrolu protoka ili procesa može se postaviti bilo gdje i još uvijek komunicirati s ostatkom sustava. Također se može premjestiti jer mreža ne brine o fizičkoj lokaciji senzora. Standard ZigBee RF4CE poboljšava standard IEEE 802.15.4.

Prednosti ove tehnologije uključuju:

- automatizaciju u kući i uredu;
- industrijsku automatizaciju;
- medicinski nadzor;
- senzore male snage;
- HVAC kontrolu;
- nizak *duty cycle* koji omogućuje dulji vijek baterije;
- do 65.000 čvorova u mreži;
- DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*);
- malo kašnjenje. [17-18]

ZigBee koristi ISM nelicencirane radijske frekvencije, uključujući 2,4 GHz frekvencijski pojas. Ostali rasponi radiofrekvencija razlikuju se u različitim dijelovima svijeta, a ZigBee pojasi uključuju 915 MHz u SAD-u, 784 MHz u Kini i 868 MHz u Europi. ZigBee podržava zvjezdastu i stablastu topologiju tako da grupa uređaja može prenijeti podatke u kraćem vremenu na upravljačke čvorove. To je povoljno za mreže s niskom brzinom prijenosa koje se šire na većem području nego što bi to mogla postići jednostavna „*point to point*“ mreža u sličnim uvjetima. Cijena za to može biti kraći vijek trajanja baterije za uređaje koji služe kao repetitori za udaljenije ZigBee IoT uređaje, šaljući podatke i potvrde između čvorova, a ne samo vlastite podatke. Iako ZigBee Pro može preskakati frekvenciju kako bi izbjegao smetnje, cijela mreža se u slučaju smetnji mora prebaciti na drugi kanal. Brzine podataka također se razlikuju u različitim regijama i kreću se od oko 10 do 200 kb/s. Ove brzine mogu biti potpuno dovoljne za mnoge IoT uređaje, stoga je manja propusnost nego kod WiFi protokola. Niže brzine obično znače znatno nižu potrošnju baterije. [16]

Protokol je kreiran tako da može komunicirati kroz RF okruženja koja su izvorno namijenjena komercijalnim i industrijskim aplikacijama. Postoje tri različita tipa ZigBee uređaja. Prvi je ZigBee koordinator koji predstavlja korijen stabla mreže i uređaj je koji služi za spajanje s drugim mrežama. Svaka mreža ima samo jednog koordinatora. Drugi uređaj je ZigBee usmjerivač, a treći uređaj je ZigBee krajnji uređaj. Taj uređaj sadrži onoliko funkcija koliko mu je dovoljno kako bi komunicirao s matičnim čvorom (s koordinatorom ili usmjerivačem). Omogućava da čvor “spava” i na taj način štedi bateriju. Zahtjeva najmanju količinu energije i zbog toga je i jeftiniji od koordinatora i usmjerivača. [17]

ZigBee omogućava široku primjenu bežičnih mreža s niskom cijenom i malom potrošnjom energije. Omogućuje višegodišnji rad pomoću jeftinih baterija, za nadgledanje i upravljanje aplikacijama. Neki primjeri primjene ZigBee uključuju *Smart energy/Smart grid*, AMR (*Automatic Meter Reading*), upravljanje osvjetljenjem i sustave automatizacije u zgradama. [17]

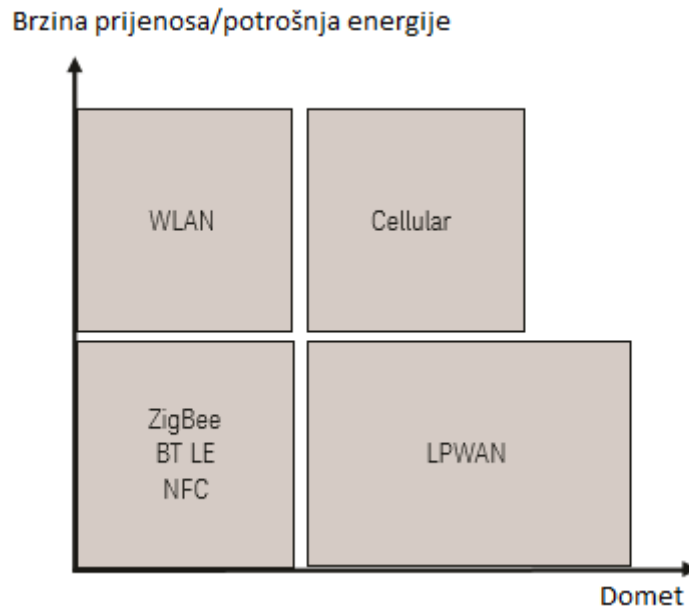
### 3. LPWAN

Mreža širokog područja pokrivanja niske snage (LPWAN) predstavlja vrstu bežične mreže dizajniranu tako da omogućuje komunikaciju dugog dometa pri maloj brzini prijenosa podataka između stvari, odnosno povezanih objekata, kao što su npr. senzori koji rade na bateriju. [19] Mala snaga, niska brzina prijenosa i predviđena namjena razlikuju ovu vrstu mreže od bežičnog WAN-a, koji je dizajniran za povezivanje korisnika ili poslovnih subjekata i prenošenje veće količine podataka uz višu potrošnju energije. LPWAN brzina prijenosa podataka kreće se od 0,3 kbit/s do 50 kbit/s po kanalu. [20] LPWAN se može koristiti za stvaranje privatne bežične mreže senzora, ali može biti i usluga ili infrastruktura koju nudi treća strana, što vlasnicima senzora omogućuje da ih implementiraju na terenu bez ulaganja u tehnologiju pristupnika.

IoT omogućuje povezivanje iznimno velikog broja uređaja na internetu. Neki uobičajeni primjeri su pametni kućni uređaji. Za industrijski IoT korist je također značajna. Može se koristiti za poboljšanje učinkovitosti poslovanja, smanjenje troškova, smanjenje potrošnje energije i primjenu strojnog učenja kada su dostupne velike količine podataka. Analiza dobivenih podataka može se koristiti za poboljšanje učinkovitosti komunikacijskih procesa ili pružanje puno boljih usluga korisnicima. Ako poslovni subjekt ima bolji uvid u to što krajnji korisnici žele, tada može ponuditi nove usluge i poboljšati svoje poslovanje. Međutim, većina bežičnih tehnologija koje su danas dostupne nisu u mogućnosti zadovoljiti sve postojeće zahtjeve, posebno u pogledu područja pokrivenosti signalom ili trajanja baterije. [20]

LPWAN može pokriti sve zahtjeve za dometom i vijekom trajanja baterije. Pruža najveći domet uz vrlo nisku potrošnju energije, pri nižoj brzini prijenosa podataka. Većina pametnih gradova i aplikacija vezanih za njih, kao što su pametno ulično osvjetljenje, senzori vlage, pametno mjerenje i pametno parkiranje zahtijevaju vrlo niske brzine prijenosa podataka, a iznimno veliku pokrivenost područja. Zbog toga se primjenjuje LPWAN.

Na slici 2. prikazan je WLAN i LTE standarda koji pružaju kraći i dulji domet pokrivanja s vrlo visokim brzinama prijenosa podataka i visokom potrošnjom energije. [19]



**Slika 2.** Usporedba brzine prijenosa podataka, potrošnje energije i dometa za LPWAN tehnologije u odnosu na druge IoT bežične standarde

### 3.1. Značajke LPWAN-a

Glavna značajka bežičnih tehnologija širokog područja pokrivanja male snage je široko područje pokrivanja signalom, posebno na teško dostupnim mjestima. Kako bi se to osiguralo, proizvođači moraju simulirati različita RF okruženja, uključujući okruženja na udaljenim lokacijama, podrumskim instalacijama, skrivenim instalacijama, iza betonskih zidova i industrijskim okruženjima. RF uvjeti mogu biti vrlo različiti. Za dugi vijek trajanja baterije proizvođači moraju znati trenutnu potrošnju uređaja kao aktivnu, neaktivnu, ili ona mora biti u stanju čekanja ili hibernacije. Također moraju ponovno ažurirati daljinski softver te ponavljati prijenose pri ekstremnim zahtjevima na pokrivenost i za uređaje koji se ne mogu povezati s poslužiteljem, kako bi se u svakom trenutku znalo koliko je struje potrošeno.

Kako bi se postigli niži troškovi, mnogi proizvođači uređaja koriste jeftinije komponente i pojednostavljaju dizajn hardvera. Pažljiv odabir prave testne opreme također može smanjiti trošak uređaja. Integrirano rješenje koje može pokriti cijeli životni ciklus proizvoda od dizajna do proizvodnje do usklađenosti testa može pomoći minimalizirati troškove opreme. [21]

## 3.2. LPWAN tehnologije i usporedbe

Budući da mobilne mreže često troše puno energije i uključuju skupi hardver i usluge, mnogi mrežni pružatelji usluga razvijaju vlastite bežične mreže koristeći nelicencirani spektar. Primjeri toga su LoRa, SIGFOX i Telensa. Ovi pružatelji usluga razvijaju vlastite niske cijene baznih stanica. Počinju s malim područjem pokrivenosti i polako proširuju svoju infrastrukturu na nacionalnu razinu pokrivenosti. Na kraju koriste mobilnu *backhaul* vezu za povezivanje. S druge strane, licencirane LPWAN tehnologije kao što su 3GPP NB-IoT ili LTE Cat-M1 dopuštaju ažuriranje softvera postojećoj staničnoj infrastrukturi, kao što je nadogradnja postojećih LTE i GSM baznih stanica. Ponovna upotreba postojećih 3G ili 4G spektara omogućuje im da vrlo brzo ponude nacionalnu i međunarodnu pokrivenost i implementaciju. Te tehnologije podržavaju aplikacije koje se oslanjaju na vrlo široko područje pokrivenosti, kao što su praćenje automobila, praćenje kućnih ljubimaca i logistika. Oni također nude snažniju standardizaciju tehnologija i omogućuju širenje usluga na druga područja kao što su mobilnost, roaming, sigurnost i autentifikacija. Licencirane i nelicencirane LPWAN tehnologije dijele neke zajedničke značajke. Proračuni veza su visoki, a životni vijek baterija duži. [27]

NB-IoT, LTE Cat-M1 i EC-GPRS su mobilni IoT standardi. Uz samonadogradnju softvera za postojeću mobilnu infrastrukturu, mogu podržati nove tehnologije. LTE Cat-M1 je modificiran iz postojećih LTE tehnologija koje je definirao 3GPP. To je pojednostavljena verzija postojeće tehnologije i koristi jednostavniji i jeftiniji skup čipova. Nudi brži prijenos podataka od ostalih LPWAN tehnologija. Može se podržati ažuriranjem softvera namijenjenog za postojeću LTE infrastrukturu. NB-IoT je tehnologija koju je definirao 3GPP. Podržava se ažuriranjem softvera za LTE ili uređivanjem postojeće RAN infrastrukture. Njegove prednosti uključuju relativno niske troškove uređaja i vrlo dobre proračune veza u usporedbi s drugim tehnologijama. Razvija se uglavnom u Aziji ili Europi. EC-GPRS je verzija GPRS-a s većom pokrivenošću. Ostvaruje se ažuriranjem softvera za GSM infrastrukturu. Ponovnim prijenosom signala ili ponavljanjem može se postići puno bolji proračun veze od GPRS-a. Ostali LPWAN formati uključuju Telensa, Ingenu i Weightless. [21]

U Tablici 1. prikazana je usporedba LPWAN tehnologija.

**Tablica 1.** Usporedba LPWAN tehnologija [19]

Parametri	<b>SIGFOX</b>	<b>LoRaWAN</b>	<b>NB-IoT</b>	<b>LTECat-M1</b>	<b>EC-GPRS</b>
<b>Proračunski link</b>	~ 146 - 162 dB	~ 150 - 157 dB	~ 164 dB	~ 156 dB	~ 164 dB
<b>Vijek trajanja baterije</b>	> 10 godina	> 10 godina	> 10 godina	> 10 godina	> 10 godina
<b>Frekvencijski spektar</b>	868, 915 MHz	169, 433, 470, 868, 915 MHz	GSM i LTE pojas	LTE licencirani pojas	GSM licencirani pojas
<b>Brzine prijenosa podataka i modulacije</b>	-za uplink: 100 b/s, BPSK 100 Hz BW, za downlink: 500 b/s GFSK 600 Hz BW	GFSK, CSS ~ 0,3 do 50 kb/s 125 kHz BW	~ 25 kb/s za downlink i 64 kb/s za uplink za downlink: QPSK za uplink: $\pi/4$ - QPSK, $\pi/2$ - BPSK, QPSK 180 kHz BW	1 Mb/s QPSK, 16 ili 64 QAM 1,4 MHz BW	~ 10 do 240 kb/s GMSK, 8PSK 200 kHz BW
<b>Protokol</b>	SIGFOX	Semtech	3GPP Multivendor	3GPP Multivendor	3GPP Multivendor
<b>Certifikat</b>	SIGFOX	LoRa Alliance	GCF/PTCRB	GCF/PTCRB	GCF/PTCRB

### 3.2.1. Sigfox

Sigfox je francuski globalni mrežni operater osnovan 2009. godine koji gradi bežične mreže za povezivanje objekata male snage, kao što su električna brojila i pametni satovi, koji moraju biti stalno aktivni i emitiraju male količine podataka.

Sigfox protokol usredotočuje se na:

- autonomiju. Izuzetno niska potrošnja energije, što omogućuje dugi vijek trajanja baterije.
- jednostavnost. Nema konfiguracije, zahtjeva za povezivanje ili signalizacije. Uređaj se može upotrijebiti nakon nekoliko minuta.
- cjenovnu dostupnost. Od hardvera koji se koristi u uređajima do mreže, optimiziran je svaki korak kako bi bio što isplativiji.
- male poruke. Na mreži nisu dopuštena velika sredstva ili mediji, samo male obavijesti, do 12 bajta.
- komplementarnost. Zahvaljujući niskoj cijeni i jednostavnosti konfiguracije, *Sigfox* se može koristiti i kao sekundarno rješenje za bilo koju drugu vrstu mreže, npr.: Wi-Fi, Bluetooth, GPRS, itd. [22]

### 3.2.2. LoRa

LoRa organizacija je najbrže rastuće tehnološko udruženje. To je neprofitna organizacija s više od 500 tvrtki članica, posvećena omogućavanju široke implementacije mreža niskog napajanja širokog područja pokrivanja signalom (LPWAN). Kroz standardizaciju i akreditiranu shemu certificiranja, LoRa Alliance pruža interoperabilnost potrebnu za mjerenje LPWA mreža, čineći LoRaWAN vodećim rješenjem za globalne implementacije LPWAN-a. LoRa je relativno nova tehnologija i ima malo drugačiji karakter od bežičnih protokola kratkog dometa opisanih ranije. LoRa koristi radio frekvencije u nelicenciranom spektru ispod jednog GHz, na VHF, UHF i 800-930 MHz području, ovisno o regiji. Budući da koristi niže radiofrekvencije, ima drugačije RF karakteristike od ostalih (2,4 ili 5 GHz) standarda i signali ove tehnologije mogu prodrijeti duboko u zgrade i dostići mjesta koja nisu dostupna višim frekvencijama. [23]



LoRaWAN mreža osigurava ključne zahtjeve koncepta Interneta stvari, kao što je sigurna dvosmjerna komunikacija, mobilnost i lokalizacije usluge. Mrežna arhitektura najčešće je postavljena u zvjezdastoj topologiji u kojoj je *gateway* transparentni most tijekom prosljeđivanja poruka između krajnjih uređaja i centralnog mrežnog poslužitelja. Većina standarda kratkog dometa koristi neki oblik FSK, OFDM ili FHSS ili DSSS raspršenog spektra. LoRa koristi skup modulacijskih tehnika koje je *Semtech* patentirao pomoću RF nosača *Chirped Spread Spectrum* (CSS). To čini signal otpornim na Dopplerov efekt (za mobilne korisnike) te stvara višestruko iščezavanje u reflektivnom RF okruženju i značajnu razinu otpornosti na smetnje. Što se tiče buke, LoRa može raditi ispod razine RF buke u okolini, pa čak i 20 dB ili više ispod uskopojasnih interferencijskih izvora. [29]

LoRa također omogućava različite kombinacije brzina i modulacija podataka, koje se mogu odabrati za povećanje osjetljivosti i postizanje dugog dometa s niskom RF snagom. Različiti prijenosnici mogu biti aktivni u istom kanalu bez zastoja. Budući da je CSS signal jednostavniji za dekodiranje nego drugi rašireni spektar, on može raditi s manje snage. To može značiti i duži vijek trajanja baterije za IoT uređaj, unatoč sofisticiranoj RF modulaciji. Osnovna definicija LoRa-e usredotočena je prije svega na fizički sloj mrežne arhitekture, a mrežnu strukturu prepušta *LoRa Alliance* konzorciju koji definira mrežne specifikacije više razine (koje se razlikuju u različitim regijama svijeta). Podatci se odvijaju preko LoRa RF veza do *gateway*-a, a koji se povezuju na Internet i Cloud/Application servere. Konzorcij također definira testiranje i certificiranje kako bi se osigurala interoperabilnost različitih LoRa uređaja u mreži. LoRa koristi sigurne komunikacijske ključeve i na mrežnom i na aplikacijskom sloju za povećanje sigurnosti mreže i podataka, koji postaju važniji kada se radio signali mogu otkriti na većem području. LoRa je zastupljena u Europi, ali se koristi i u mnogim drugim dijelovima svijeta. Osim *Semtech*-a, čipove proizvode i *ST Micro* i *Microchip*, što dizajnerima daje dodatnu fleksibilnost pri dizajniranju LoRa hardvera. I dalje je potrebno testirati uređaje, čak i ako se koristi nelicencirani spektar. Ispitivanja snage odašiljača, odstupanja vrijednosti, zauzeća širine frekvencijskog pojasa, harmonika i spektralne gustoće snage obično su potrebni pri certificiranju. Iako je LoRa noviji standard, dizajnerima su dostupni i čipovi i moduli, a različiti ispitni instrumenti i pojedini laboratoriji za testiranje već podržavaju LoRa certifikaciju i testiranje prije certificiranja. [23]

### 3.2.3. Telensa

Tehnološka arhitektura koju je razvila tvrtka Telensa rezultat je dugogodišnjeg rada u partnerstvu s gradovima i komunalnim tvrtkama diljem svijeta. Telensa se najviše primjenjuje pri konceptu pametnih gradova i ulične rasvjete. Svaki grad ima drugačiju strategiju pametnog grada i ima svoj vlastiti pametni sustav. Zbog toga Telensa nudi otvorena sučelja za senzore, mreže, aplikacije i podatkovne platforme. [24]

### 3.2.4. Ingenu

Ingenu, nekad poznat kao *On-Ramp Wireless*, je davatelj usluga bežičnih mreža. Tvrtka se usredotočuje na komunikaciju između strojeva, omogućujući primjenu uređaja unutar koncepta interneta stvari. Koristeći slobodne 2,4 GHz ISM opsege, Ingenu-ov hardver testiran je u slobodnom ISM pojasu od 2,4 GHz. Optimiziran je za robusnost, veći domet i kapacitet. Ingenu omogućuje višestruki pristup s nasumičnom fazom (RPMA), i koristi ga za različite mrežne primjene, poput automatizacije polja nafte i plina te za digitalno naftno polje. Tehnologija uključuje mrežne uređaje, radio-modul *microNode* te referentni aplikacijski komunikacijski modul. [25]

### 3.2.5. LTE

U telekomunikacijama, *Long Term Evolution* (LTE) je standard za bežičnu širokopoljasnu komunikaciju za mobilne uređaje i podatkovne terminale, a temelji se na tehnologijama GSM/EDGE i UMTS/HSPA. Standard je razvijen u 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). LTE karakterizira podrška mobilne širokopoljasne komunikacije, multimedijских usluga, unaprjeđenja prijenosne brzine (u silaznoj vezi najmanje od 100 Mbit/s, a u uzlaznoj 50 Mbit/s), mala kašnjenja u radijskoj pristupnoj mreži (do 10 ms), kapacitet te adaptivnost. Različite LTE frekvencije i pojasevi koji se koriste u različitim zemljama znače da su samo *multi-band* telefoni u mogućnosti koristiti LTE u svim zemljama u kojima je podržan. LTE ne zadovoljava u potpunosti tehničke kriterije 4G bežične usluge, kako je određeno u dokumentu serije 3GPP za *LTE Advanced*. LTE je također poznat kao 3.95G. Zahtjeve je izvorno postavila organizacija ITU-R u IMT Advanced specifikaciji. LTE Advanced standard formalno zadovoljava ITU-R zahtjeve koji se smatraju IMT-Advancedom. Da bi razlikovao LTE

Advanced i WiMAX-Advanced od trenutnih 4G tehnologija, ITU ih je definirao kao "True 4G". [26]

**LTE Cat-M1** jedna je od dvije kategorije korisničke opreme (eng. *User Equipment*, UE) unutar LTE IoT skupa standarda. Obje kategorije LTE IoT UE dizajnirane su za podatkovni promet namijenjen za IoT, uključujući:

- uređaje niske cijene
- čvorove male snage kojima je potreban dug vijek trajanja baterije
- veliki broj uređaja.

Oprema koja podržava LTE Cat-M1 standard isporučuje brzinu podataka do 1 Mbit/s u postojećem LTE FDD / TDD spektru. LTE Cat-M1 također podržava *Voice over LTE* (VoLTE) i uključuje poboljšani način pokrivanja koji dodaje 15 dB proračuna veze za daljnji prodor signala u zgrade. LTE Cat-M1 koristi 1,4 MHz propusnog opsega i koristi naslijeđene LTE signale za sinkronizaciju poput PSS7 i SSS8. [29]

**LTE Cat-NB1**, također poznat kao *NarrowBand* IoT (NB-IoT), još je jedna UE kategorija u LTE IoT obitelji. Puno je sporiji od LTE Cat-M1, s brzinama za preuzimanje i prijenos od otprilike 200 kbps, ali zahtijeva manje od 200 kHz propusnog opsega. IoT može podržati do 200.000 uređaja po ćeliji bazne stanice zato što koristi mrežni spektar s licencom 3GPP. Za razliku od LTE Cat-M1, Cat-NB1 ne podržava aktivno predavanje stanice na stanicu, pa je manje pogodan za održavanje kontinuiteta podataka u nekim mobilnim aplikacijama. Međutim, LTE Cat-NB1 podržava ponovno biranje stanica koje je pokrenula UE. [29]

Proračun za vezu NB-IoT je nekoliko dB bolji od LTE Cat-M1. NB-IoT se također može primijeniti u GSM spektru ili multipleksirati s LTE nosačima u LTE opsezima. I LTE Cat-M1 i NB-IoT bit će raspoređeni širom svijeta s ažuriranjima softvera na postojeću infrastrukturu. Korištenje licenciranog spektra i postojeće guste infrastrukture znači da će kapacitet, pokrivenost i unutarnji prodor NB-IoT-a biti izvrsni, što je povoljno u usporedbi s drugim LPWAN tehnologijama. [26]

## 4. Praktični dio

Ovo poglavlje opisuje *CupCarbon* simulator i tri praktična scenarija izvedena u njemu, s naglaskom na potrošnju energije korištenjem triju različitih tehnologija: ZigBee, WiFi i LoRa tehnologije.

### 4.1. *CupCarbon*

*CupCarbon* je simulator koji omogućuje analizu umrežavanja pri konceptu pametnih gradova i bežičnih senzorskih mreža. Njegov je cilj osmišljavanje, vizualiziranje, uklanjanje pogrešaka i vrednovanje distribuiranih algoritama za praćenje, prikupljanje podataka o okolišu, itd., te stvaranje odgovarajućih scenarija. Pomaže u vizualnom objašnjavanju osnovnih pojmova senzorskih mreža i njihovog rada te podržava testiranje njihovih bežičnih topologija, protokola, itd.

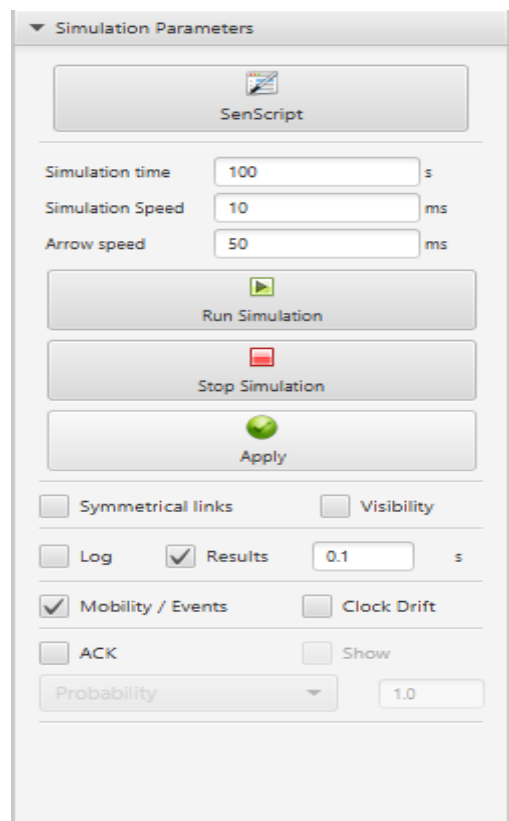
*CupCarbon* nudi dva simulacijska okruženja. Prvo simulacijsko okruženje omogućuje dizajniranje pokretnih scenarija i analizu pojava i mjerljivih parametara iz okruženja, kao i simulaciju mobilnih objekata kao što su vozila i leteći objekti. Drugo simulacijsko okruženje predstavlja diskretnu simulaciju bežičnih senzorskih mreža koja uzima u obzir scenarij dizajniran na temelju prvog okruženja. Mreže mogu biti dizajnirane i prototipirane ergonomskim i jednostavnim sučeljem korištenjem *OpenStreetMap* (OSM) okvira za raspoređivanje senzora izravno na karti. Sadrži skriptu koja se zove *SenScript*, a koja omogućuje programiranje i konfiguriranje svakog senzorskog čvora pojedinačno. Iz ove skripte moguće je generirati i kodove za hardverske platforme poput Arduino/XBee. Ovaj dio nije u potpunosti implementiran u *CupCarbonu* nego omogućava generiranje kodova za jednostavne mreže i algoritme.

*CupCarbon* simulacija temelji se na aplikacijskom sloju čvorova. Ne simulira sve protokolarne slojeve zbog složene prirode urbanih mreža koje trebaju ugraditi druge složene informacije koje troše resurse kao što su podatci o zgradama, cestama, mobilnost, signali, itd.

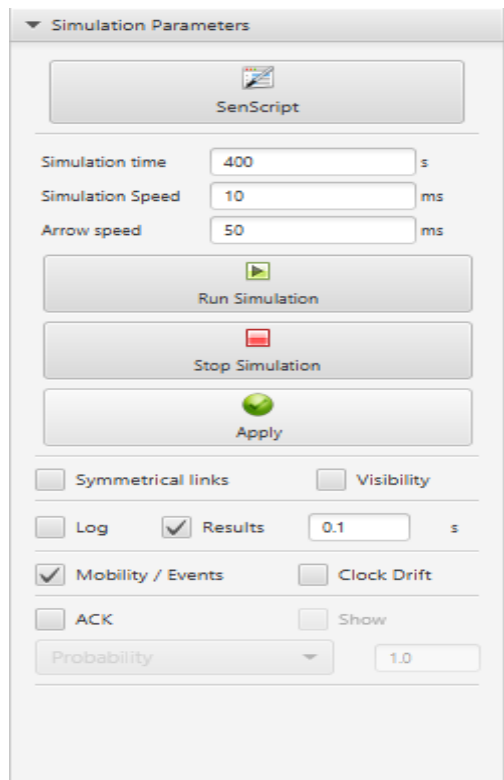
Omogućava dinamičko konfiguriranje čvorova kako bi se mogli razdijeliti čvorovi u zasebne mreže ili se pridružiti različitim mrežama, što je zadatak koji se temelji na mrežnim adresama i kanalu. Potrošnja energije može se izračunati i prikazati kao funkcija simuliranog vremena. To omogućava da se razjasni struktura, izvedivost i realna implementacija mreže prije stvarnog razvoja. [28]

## 4.2. Praktični scenariji

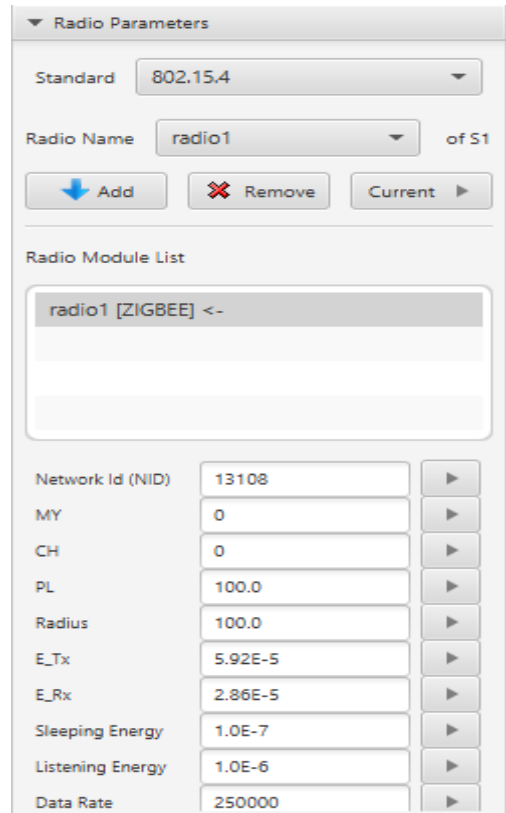
U *CupCarbon* simulatoru izvedena su tri praktična scenarija u kojima su korištene tri različite tehnologije: ZigBee, WiFi i LoRa. Načinjena je usporedba LoRa rješenja s rješenjima u kojima se za prijenos koriste tehnologije kratkog dometa zbog usporedbe u potrošnji energije. Svi simulacijski i radijski parametri prikazani su na slikama ispod. U prva dva scenarija korišteno je isto vrijeme simulacije (slika 3.), odnosno 100 sekundi, dok je u trećem scenariju vrijeme simulacije 400 sekundi (slika 4.), zbog veće količine podataka koja se treba prenijeti. ZigBee tehnologija ima najmanji radijus pokrivenosti, odnosno 100 metara (slika 5.). WiFi tehnologija ima radijus pokrivenosti od 400 metara (slika 6.), dok LoRa tehnologija ima najveći radijus pokrivenosti, odnosno 1000 metara (slika 7.). ZigBee i WiFi tehnologija nemaju faktor raspršenja, dok ga LoRa tehnologija ima i taj faktor iznosi 7.



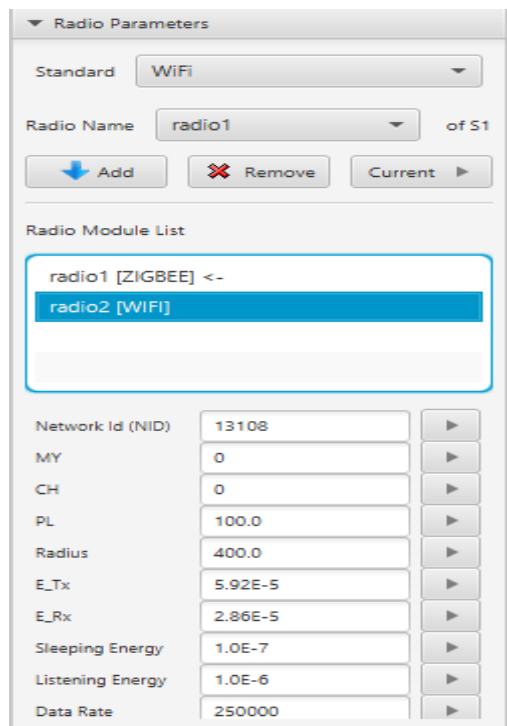
**Slika 3.** Parametri simulacije za prvi i drugi praktični scenarij



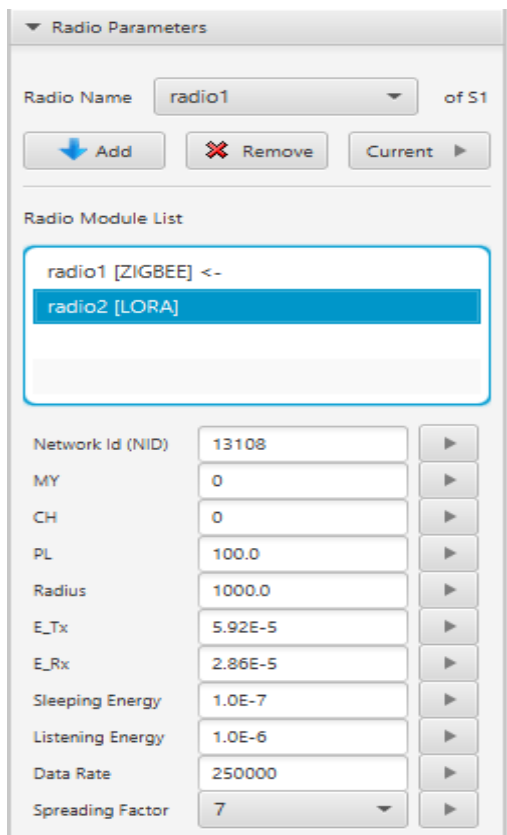
**Slika 4.** Parametri simulacije za treći praktični scenarij



**Slika 5.** Radio parametri ZigBee tehnologije



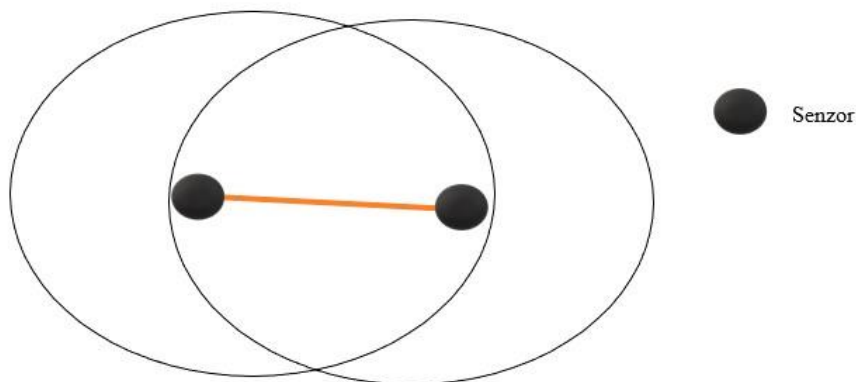
Slika 6. Radio parametri WiFi tehnologije



Slika 7. Radio parametri LoRa tehnologije

### 4.3. Prvi praktični scenarij

Prvi praktični scenarij prikazuje dva senzorska čvora koji međusobno izmjenjuju podatke. Oba čvora šalju vrijednosti od '000' do '111' (odnosno redom: 000, 001, 010, 011, 100, 101 i 111). Jedan čvor šalje podatke od '000' do '111', a drugi šalje podatke od '111' do '000'. Prvi senzor prvo šalje podatak drugom senzoru i čeka da drugi senzor primi podatak, pa tek kad drugi senzor primi podatak, onda ponovno drugi senzor šalje podatak prvom senzoru. Kašnjenje (eng. *delay*) je 1000 ms, trajanje simulacije iznosi 100 sekundi, a podatci su slani putem triju različitih tehnologija: ZigBee, WiFi i LoRe. Slika 8. prikazuje kako izgledaju senzori postavljeni u *CupCarbon* simulatoru.



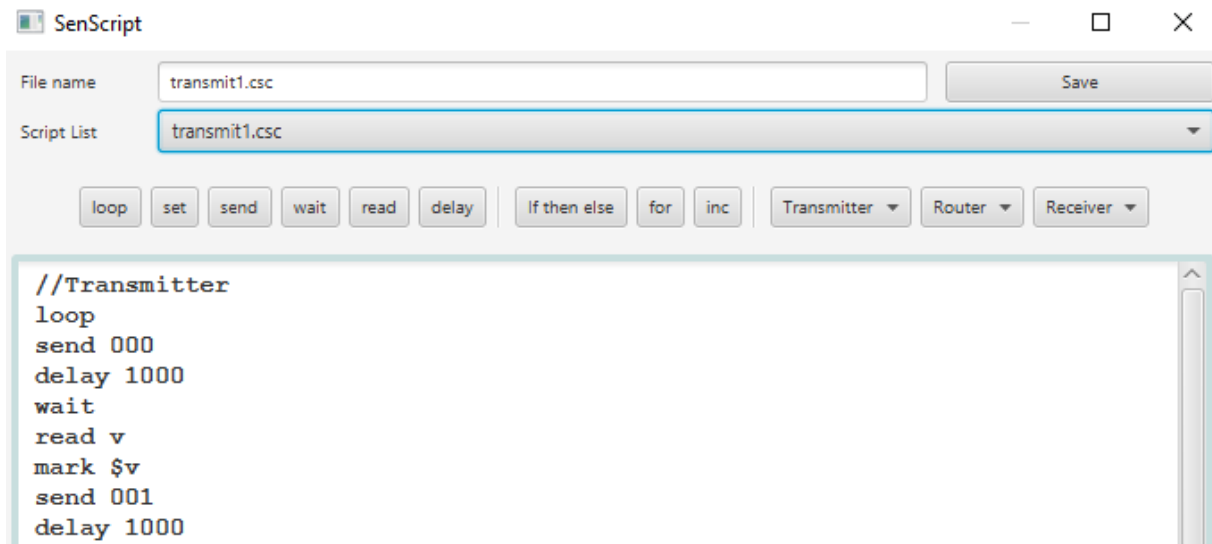
**Slika 8.** Senzori postavljeni u *CupCarbon* simulatoru

#### 4.3.1. Kod korišten u prvom scenariju

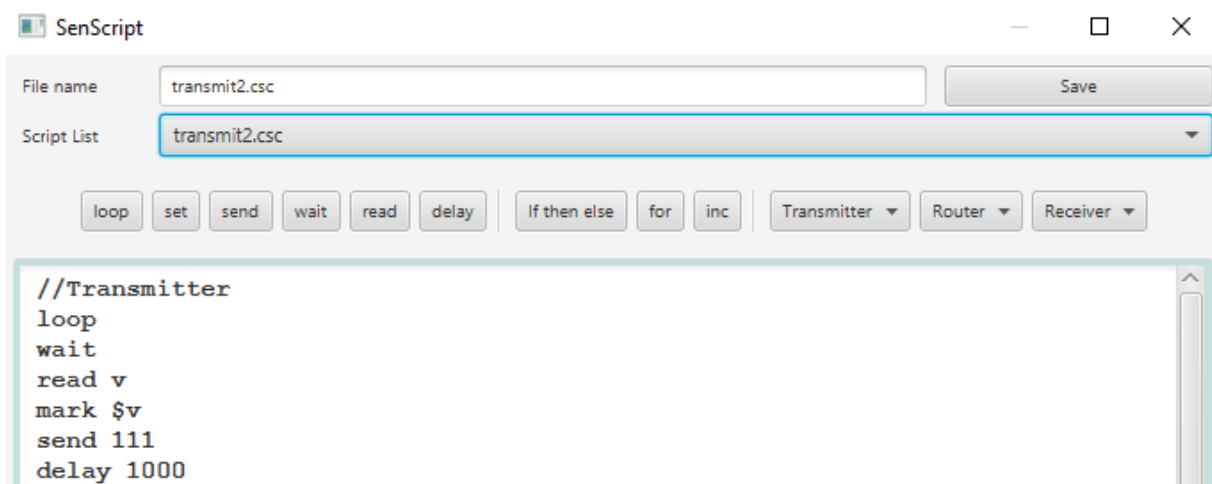
Slika 9. prikazuje kod pomoću kojeg prvi senzor drugom senzoru šalje podatke. Kod započinje narednom *loop* čija je zadaća beskonačno ponavljati petlju. Nakon toga podatci se šalju naredbom *send* te se potom postavlja *delay* od 1000 ms. Kašnjenje od 1000 ms (jedne sekunde) označava vrijeme čekanja prije nego što se izvrši sljedeća naredba. Potom se izvršava naredba *wait* koja označava čekanje dok se podatci ne spremu u međuspremnik. Pomoću naredbe *read* u nekoj se varijabli *v* dodaje vrijednost koja je očitana u međuspremniku. *Mark \$v* naredbom



markira se svaka primljena vrijednost. Na slici 10. prikazan je kod kojim drugi senzor šalje prvom senzoru podatke, na način da prvo primi podatke od prvog senzora, pa tek onda šalje natrag podatke prvom senzoru. Petlja se ponavlja sve dok se ne pošalju svi podatci.



**Slika 9.** Kod korišten prilikom slanja podataka drugom senzoru



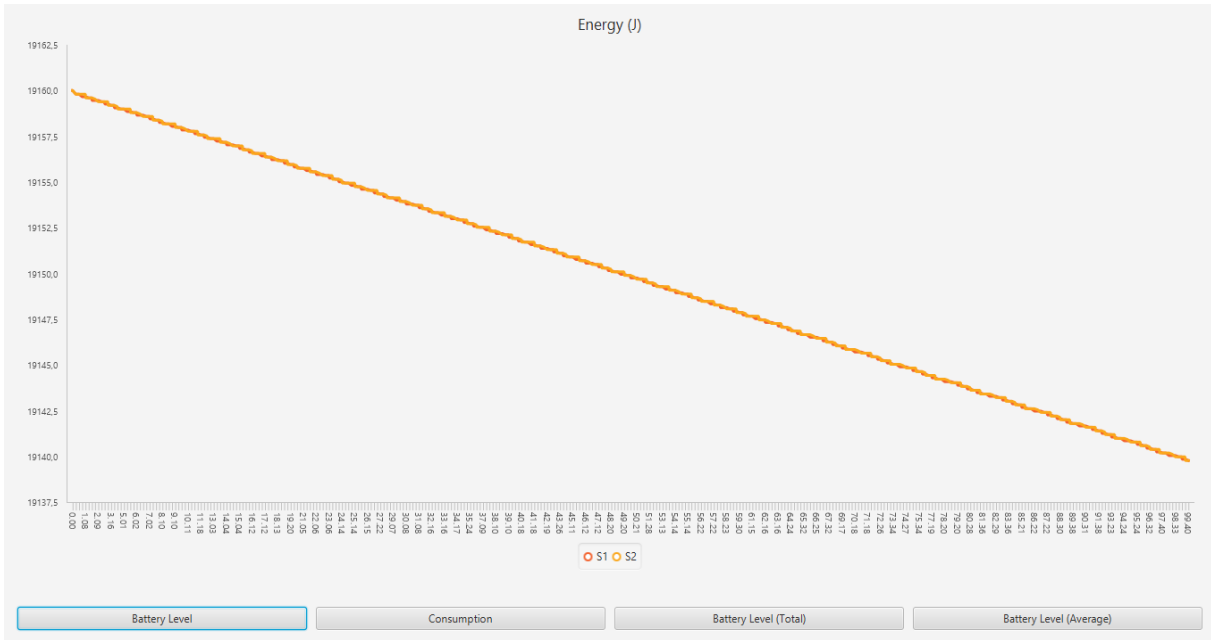
**Slika 10.** Kod korišten prilikom slanja podataka prvom senzoru

### 4.3.2. Rezultati prvog praktičnog scenarija

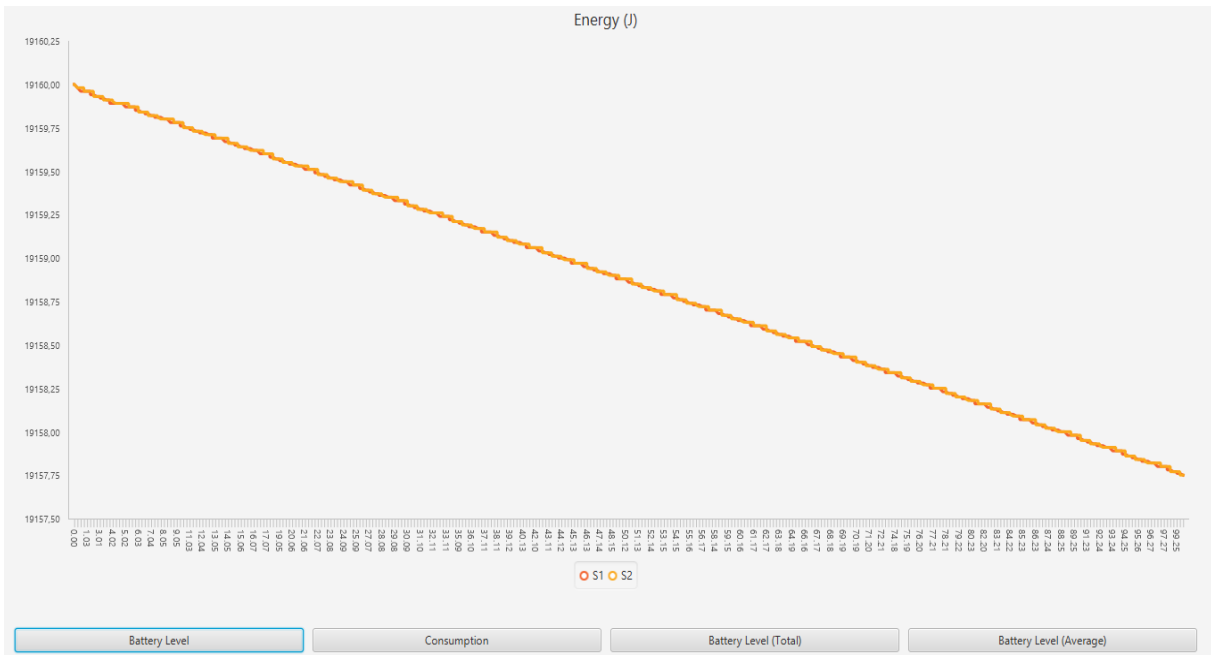
Na slikama 11., 12. i 13. prikazani su rezultati potrošnje energije prilikom slanja podataka između senzora označenih sa S1 i S2. Korištenjem svake od tehnologija senzori S1 i S2 trošili su gotovo jednaku energiju. Na slikama 11. i 13. prikazani su grafovi potrošnje energije ZigBee i LoRa tehnologije. Koristeći obje navedene tehnologije potrošnja energije u zadanom vremenu od 100 sekundi bila je slična, odnosno iznosila je 1,1 J za ZigBee tehnologiju i 2,25 J za LoRa tehnologiju prijenosa. Na slici 12. prikazan je graf potrošnje energije oba senzora korištena u prvom scenariju za WiFi tehnologiju prijenosa. Na grafu se može vidjeti kako je potrošnja energije WiFi tehnologije znatno veća u odnosu na LoRa i ZigBee tehnologiju, odnosno iznosila je 20 J u zadanom vremenu od 100 sekundi.



Slika 11. Potrošnja energije korištenjem ZigBee tehnologije



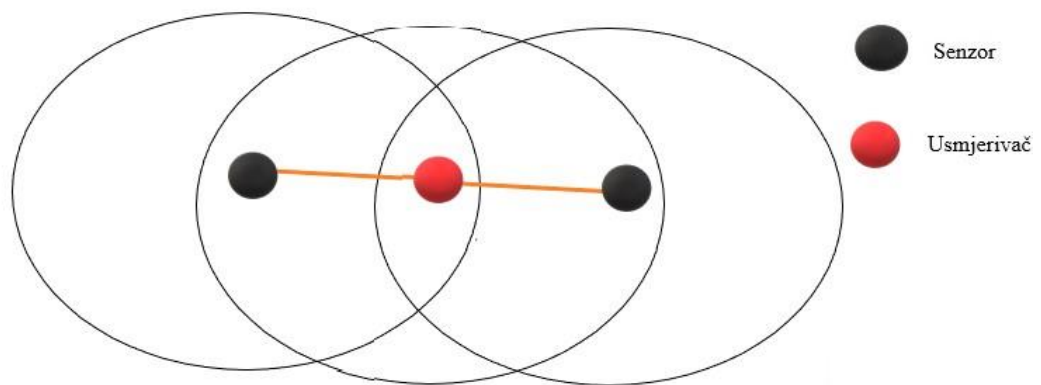
Slika 12. Potrošnja energije korištenjem WiFi tehnologije



Slika 13. Potrošnja energije korištenjem LoRa tehnologije

#### 4.4. Drugi praktični scenarij

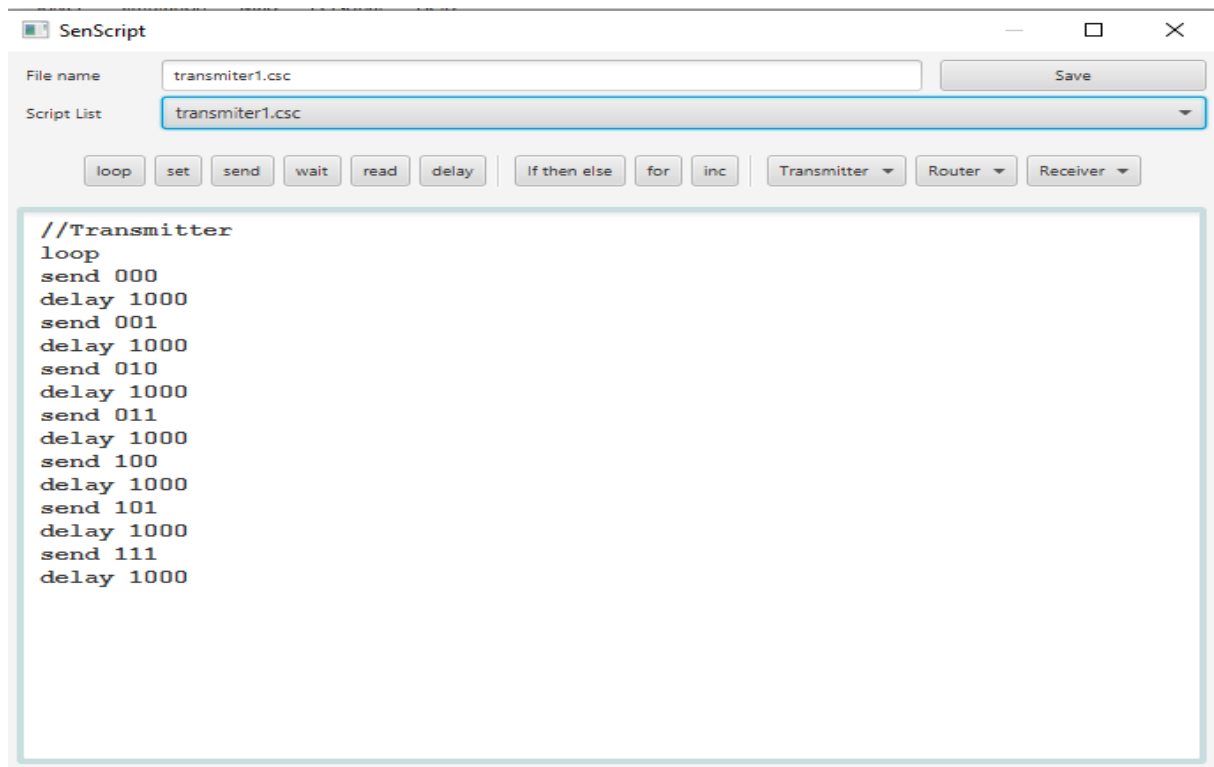
Drugi praktični scenarij prikazuje senzor koji šalje podatke od '000' do '111' na usmjerivač. Usmjerivač čita taj podatak i prosljeđuje ga primatelju – drugom senzoru. Podatci se šalju jednosmjerno. Korištena tehnologije su ZigBee, LoRa i WiFi. Na Slici 14. prikazani su senzori i usmjerivač postavljeni u *CupCarbon* simulatoru.



**Slika 14.** Senzori i usmjerivač postavljeni u *CupCarbon* simulatoru

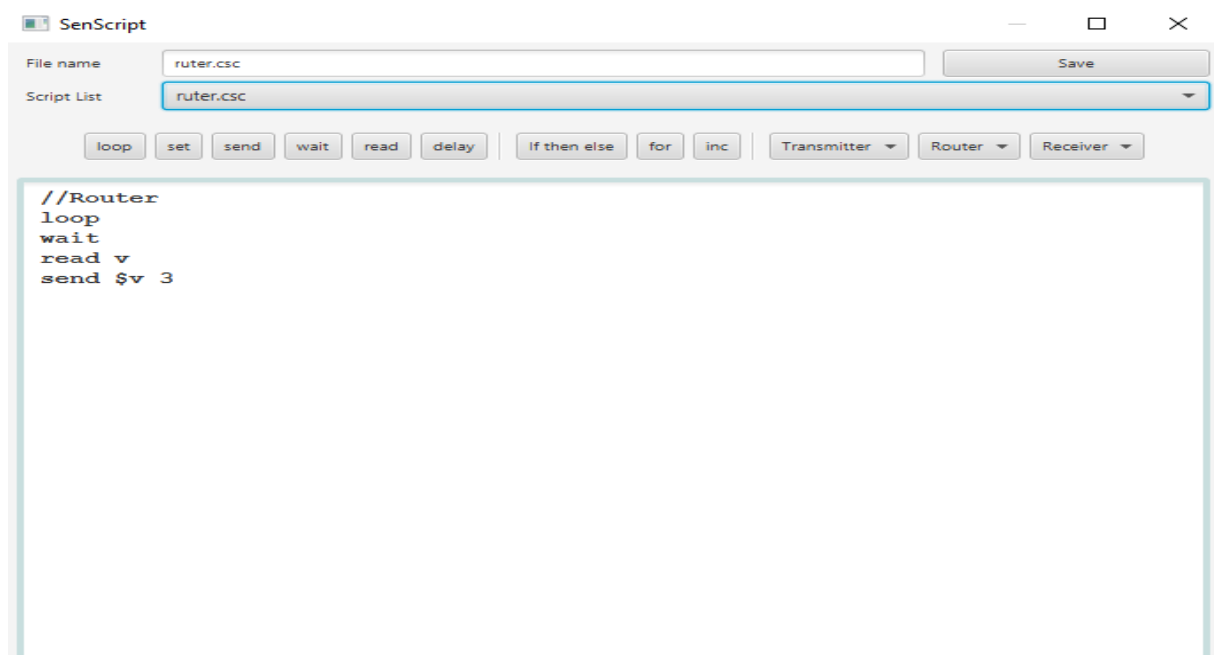
##### 4.4.1. Kod korišten u drugom praktičnom scenariju

Na slici 15. prikazan je kod kojim odašiljač šalje podatke usmjerivaču. Kod započinje beskonačnom petljom *loop*, potom slijedi naredba *send* koja šalje podatke. Zatim se postavlja naredba *delay* koja označava vrijeme čekanja prije nego što se izvrši sljedeća naredba. Ovaj kod se ponavlja sve dok se ne pošalju svi podatci.



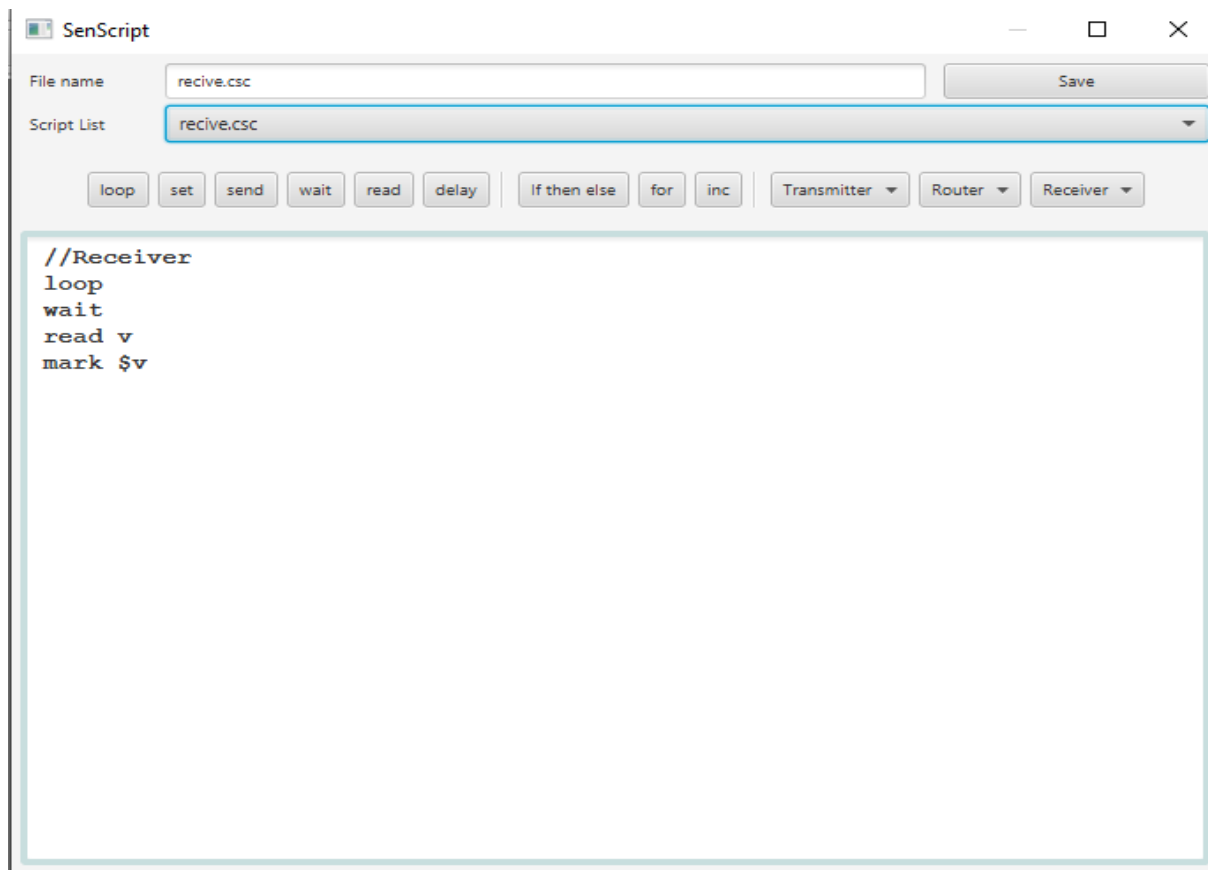
**Slika 15.** Kod odašiljača

Slika 16. prikazuje kod kojim usmjerivač čita primljene podatke te ih prosljeđuje dalje, odnosno primatelju – drugom senzoru.



**Slika 16.** Kod usmjerivača

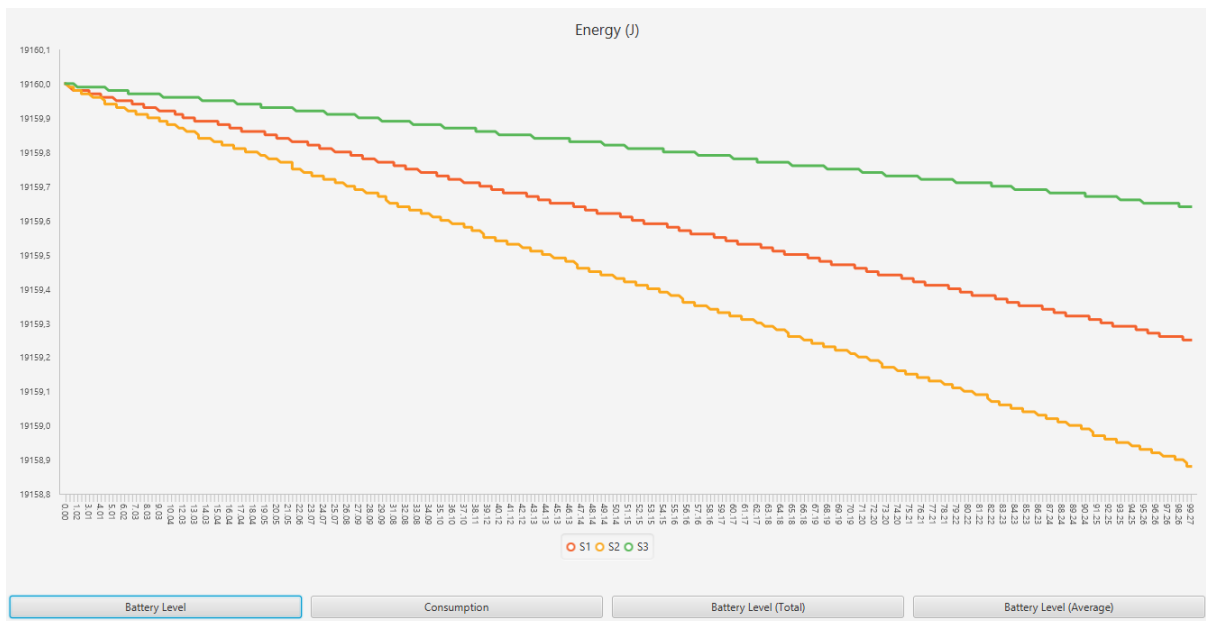
Slika 17. prikazuje kod koji pomoću naredbe *wait* čeka da se pojave podatci u međuspremniku te ih nakon što se pojave čita pomoću naredbe *read v* i označava pomoću naredbe *mark \$v*.



**Slika 17.** Kod primatelja

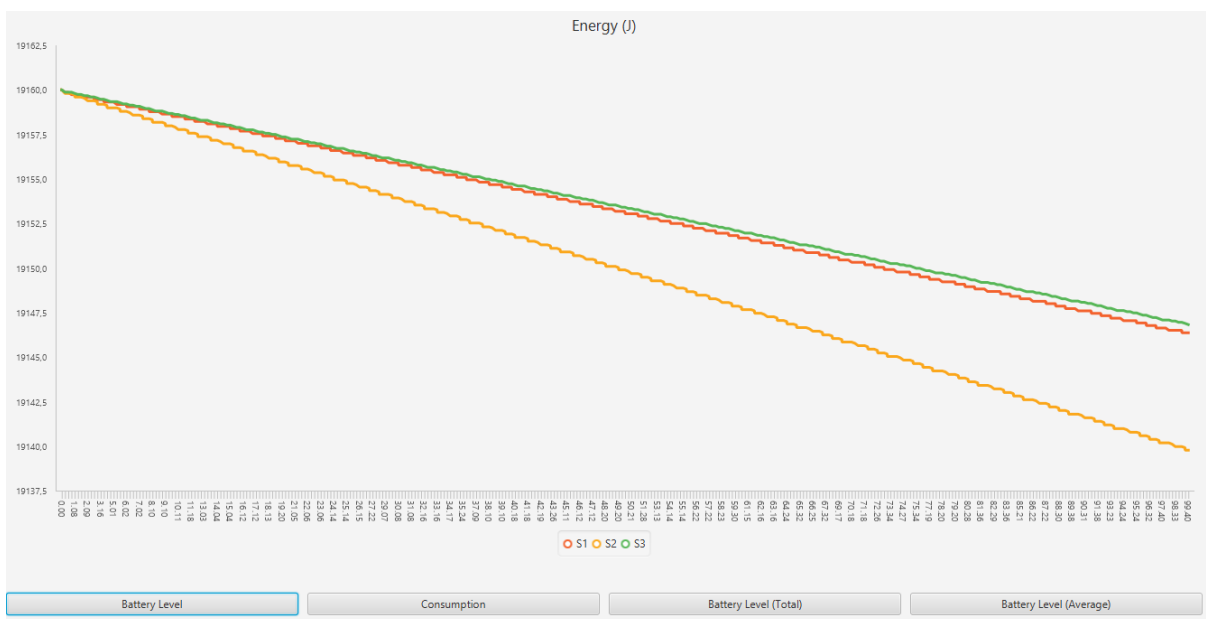
#### 4.4.2. Rezultati drugog praktičnog scenarija

Na slici 18. prikazana je potrošnja energije korištenjem ZigBee tehnologije. Na grafu je sa S1 označen odašiljač, sa S2 usmjerivač, a sa S3 primatelj. Graf prikazuje kako najviše energije troši usmjerivač (S2), a najmanje energije troši primatelj (S3). Usmjerivač u zadanom vremenu troši 1,1 J energije, odašiljač troši 0,7 J energije, a primatelj troši 0,3 J energije.



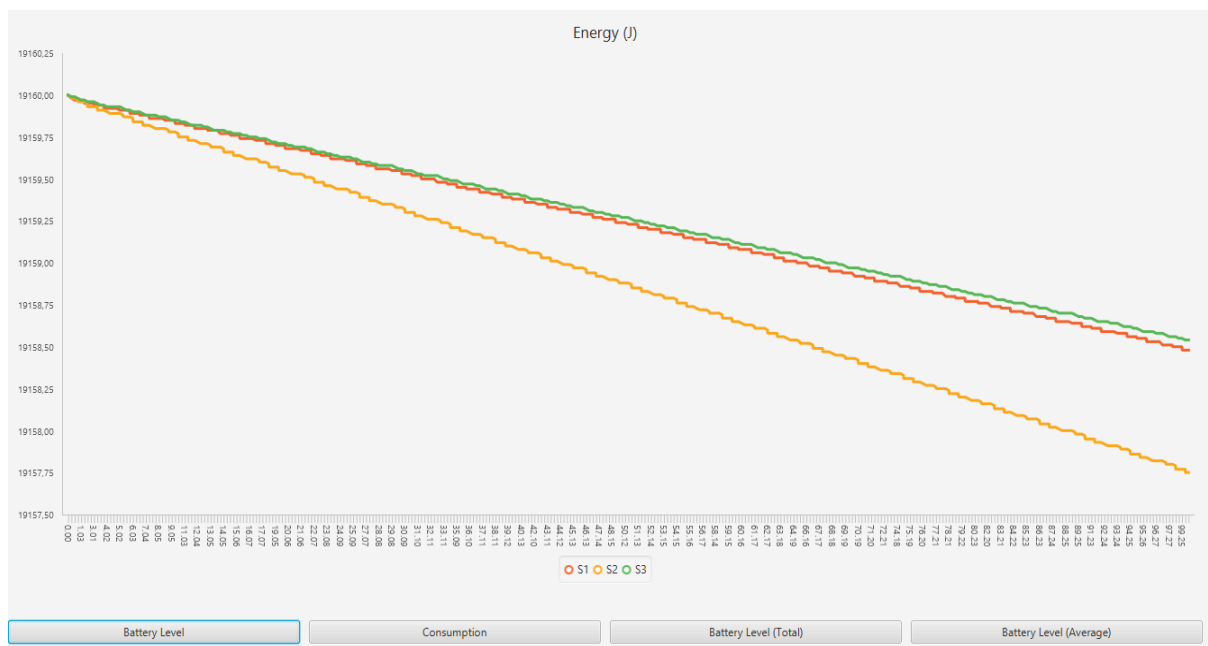
**Slika 18.** Potrošnja energije korištenjem ZigBee tehnologije

Na slici 19. prikazana je potrošnja energije korištenjem WiFi tehnologije. U ovom slučaju najviše energije troši usmjerivač, odnosno troši ukupno 20 J energije u zadanom vremenu. Odašiljač i primatelj troše približno jednaku energiju, odnosno odašiljač troši 12,5 J energije u zadanom vremenu, a primatelj troši 12 J energije u zadanom vremenu.



**Slika 19.** Potrošnja energije korištenjem WiFi tehnologije

Na slici 20. prikazana je potrošnja energije korištenjem LoRa tehnologije prijenosa. U ovom slučaju najviše energije troši usmjerivač, odnosno troši ukupno 2,25 J u zadanom vremenu. Odašiljač i primatelj troše približno jednaku energiju, odnosno odašiljač troši 1,5 J u zadanom vremenu, a primatelj troši 1,4 J energije u zadanom vremenu.

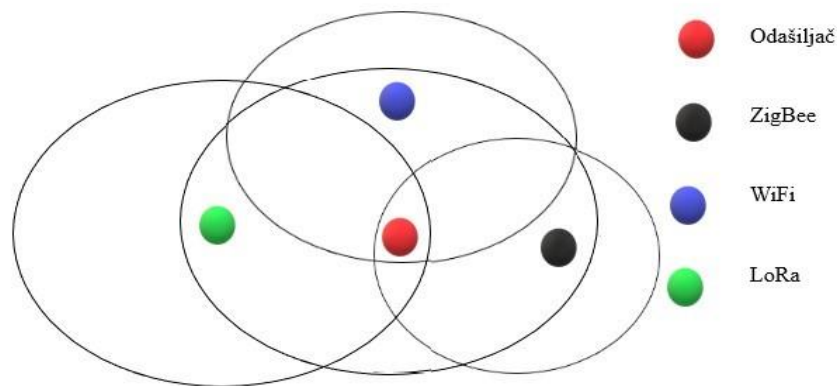


Slika 20. Potrošnja energije korištenjem LoRa tehnologije



## 4.5. Treći praktični scenarij

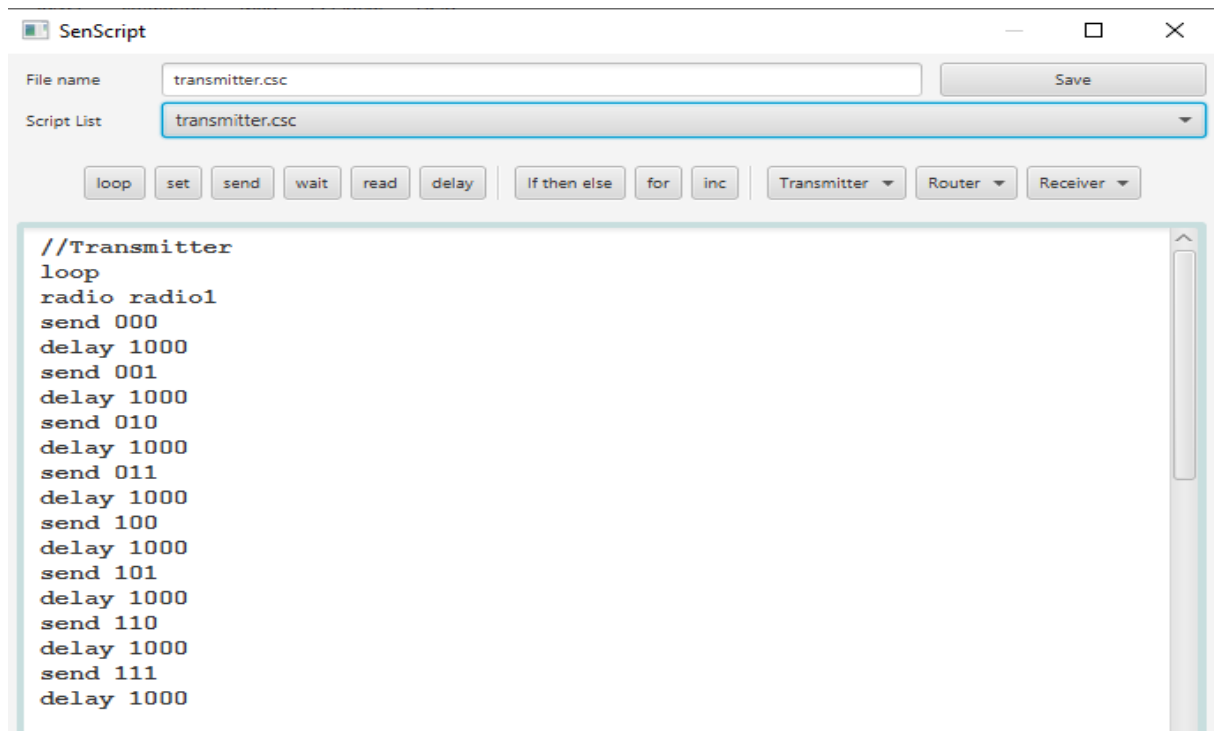
U trećem praktičnom scenariju prikazanom na slici 21. postavljena su tri primatelja i jedan odašiljač. Odašiljač svakom primatelju odašilje podatke različitim tehnologijama, odnosno, jednom primatelju šalje podatke ZigBee tehnologijom, drugom primatelju šalje podatke WiFi tehnologijom, a trećem primatelju šalje podatke LoRa tehnologijom prijenosa. Šalju se podatci od '000' do '111' s odgodom od 1000 ms.



**Slika 21.** Senzori i usmjerivač postavljeni u *CupCarbon* simulatoru

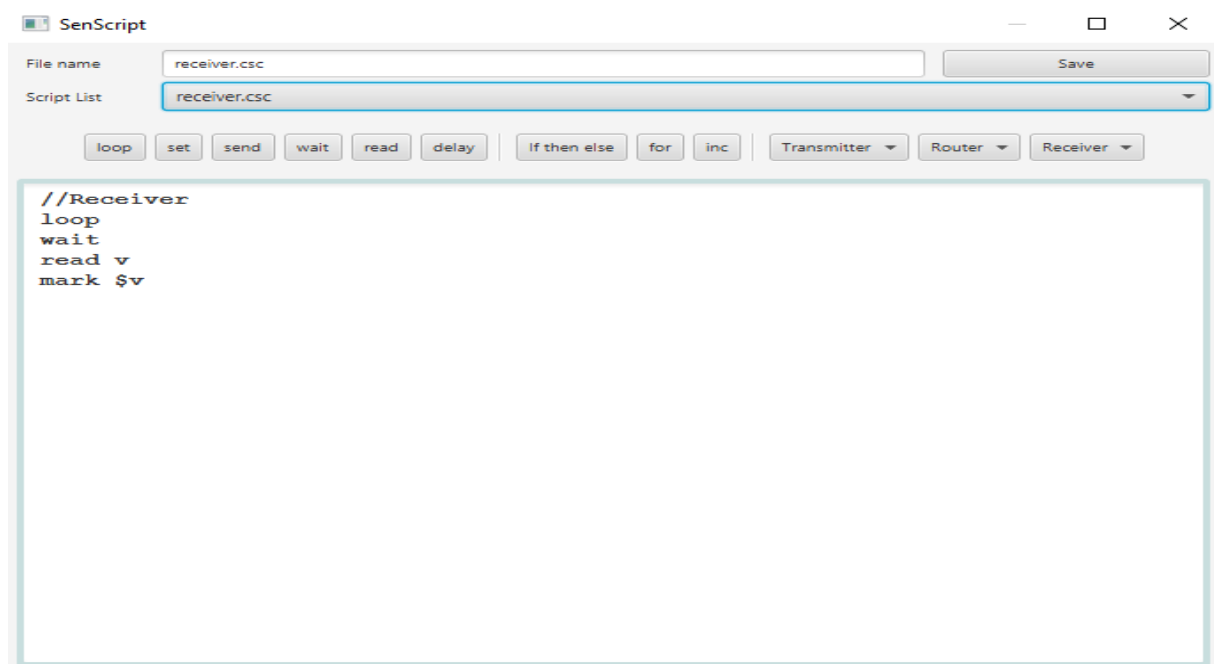
### 4.5.1. Kod korišten u trećem praktičnom scenariju

Slika 22. prikazuje kod odašiljača koji se koristi prilikom slanja podataka primateljima. Kod započinje naredbom *loop* koja označava beskonačnu petlju koja očitava pojedinu radio tehnologiju kojom se trebaju slati podatci kako bi se odašiljač mogao prebaciti na tu tehnologiju i njome slati podatke do primatelja. Naredba *radio radio1* služi za mijenjanje pojedine radio tehnologije prilikom slanja podataka. Opcija *radio* označava promjenu radio tehnologije, a *radio 1* označava koja se točno radio tehnologija poziva. Naredba *send* služi za slanje podataka, a naredba *delay* označava odgodu.



Slika 22. Kod odašiljača

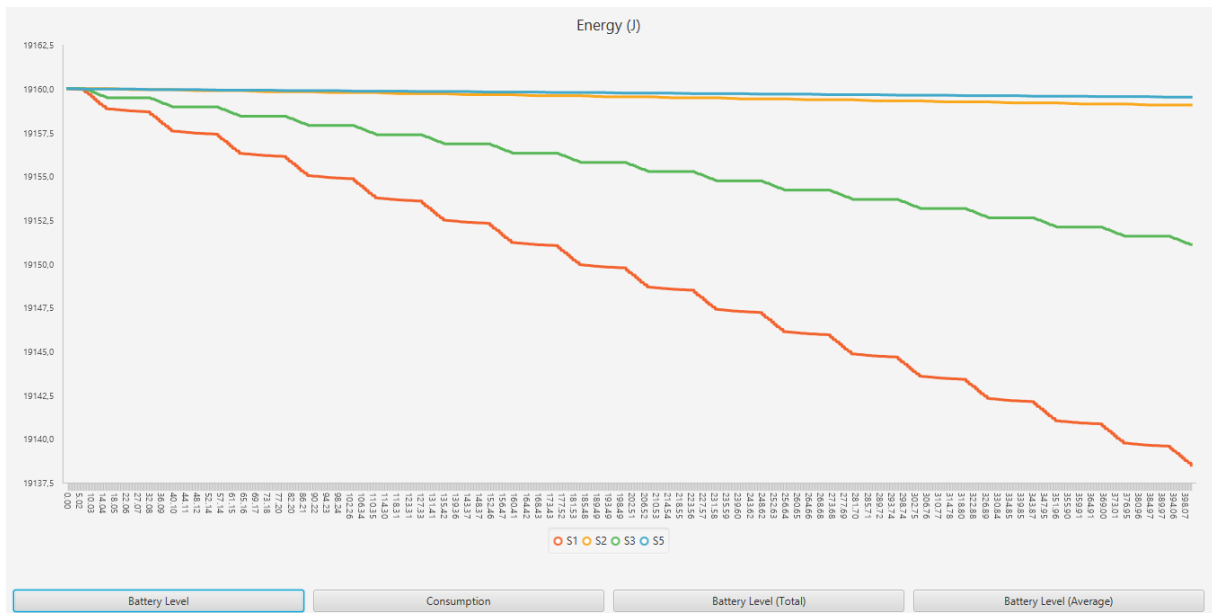
Na slici 23. prikazan je kod primatelja koji naredbom *loop* označava beskonačnu petlju, naredbom *wait* označava čekanje dok se ne dohvati podatak, naredbom *read v* dodjeljuje neku očitane vrijednost varijabli *x* i naredbom *mark \$v* označava svaku primljenu vrijednost.



Slika 23. Kod primatelja

## 4.5.2. Rezultati trećeg praktičnog scenarija

Slika 24. prikazuje graf potrošnje energije prilikom slanja podataka trima različitim tehnologijama: ZigBee, WiFi i LoRa tehnologijom. S1 predstavlja odašiljač koji šalje na sve tri tehnologije i budući da radi cijelo vrijeme, troši i najviše energije, odnosno, u ovom slučaju troši ukupno 21,2 J energije. Simulacija traje 400 sekundi, budući da se ne stigne sve simulirati u 100 sekundi, kao u prethodna dva scenarija. S2 označava potrošnju energije korištenjem LoRa tehnologije prijenosa, a S5 označava ZigBee tehnologiju prijenosa. Potrošnja energije te dvije tehnologije je jako slična. S3 označava WiFi tehnologiju prijenosa i tom se tehnologijom prijenosa troši najviše energije, odnosno ukupno 7,5 J.



Slika 24. Potrošnja energije korištenjem ZigBee, WiFi i LoRa tehnologije

## 5. Zaključak

U ovom diplomskom radu opisane su komunikacijske tehnologije širokog područja pokrivanja male snage pri IoT umrežavanju u pametnim gradovima. Najviše pozornosti posvećeno je potrošnji energije pojedine tehnologije. Pametan grad opisan je kao grad koji koristi različite tipove bežičnih senzora za skupljanje podataka koji su potrebni za efikasnije upravljanje imovinom i resursima. Ideja pametnog grada je povezati informacijske i komunikacijske tehnologije te razne fizičke uređaje povezane s mrežom kako bi se povećala učinkovitost gradskih usluga.

Opisane su bežične mreže i njihova primjena te sve glavne tehnologije za bežičan prijenos kratkog dometa, a to su: Bluetooth, WiFi, NFC, RFID i ZigBee.

Tehnologija koja se danas najviše primjenjuje je WiFi tehnologija. ZigBee je najpopularniji standard za povezivanje senzora i raznih instrumenata. Ima male brzine prijenosa podataka. U radu su opisane i mreže širokog područja pokrivanja niske snage (LPWAN), a one predstavljaju vrstu bežične mreže koja je dizajnirana kako bi omogućila komunikaciju dugog dometa pri maloj brzini prijenosa između objekata. Karakteristika ovih tehnologija je mala snaga i niska brzina prijenosa podataka. Opisan je i način rada LoRa tehnologije. LoRa tehnologija je relativno nova i ima malo drugačiji karakter od nekih drugih bežičnih protokola.

Simulacija praktičnog dijela ovog rada izvedena je u *CupCarbon* simulatoru. *CupCarbon* je simulator pametnih gradova i mreža bežičnih senzora i u njemu su izvedena tri različita scenarija kojima je zadatak bio pratiti potrošnju energiju tijekom prijenosa podataka između uređaja koji međusobno komuniciraju. Svi rezultati dobiveni simulacijom podudaraju se sa teorijskom podlogom opisanom ranije.

## Literatura

1. „Connected Vehicles in Smart Cities: The Future of Transportation“. Dostupno na: [https://www.academia.edu/35341945/Smart\\_City.docx](https://www.academia.edu/35341945/Smart_City.docx) (30.4.2019.)
2. „Internet of Things – Smart City“. Dostupno na: <https://www.keysight.com/zz/en/solutions/internet-of-things-iot/smart-city.html> (20.9.2019.)
3. Morteza M. Zanjirch, Ali Shahrabi i Hadi Larijani, School of Engineering and Built Environment, Glasgow Caledonian University, UK, „ANCH: A New Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks“. Dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/257373717\\_ANCH\\_A\\_New\\_Clustering\\_Algorithm\\_for\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/257373717_ANCH_A_New_Clustering_Algorithm_for_Wireless_Sensor_Networks) (20.8.2019.)
4. Tagva Ahmed Bakri Gali, Amin Babiker A/Nabi Mustafa, „A Comparative Study Between WEP, WPA and WPA2 Security Algorithms“. Dostupno na: <https://pdfs.semanticscholar.org/295d/d4d52b641ace070da03643dcad770ad6b66f.pdf>[http://spvp.zesoi.fer.hr/predavanja%202008/WE\\_skripta.pdf](http://spvp.zesoi.fer.hr/predavanja%202008/WE_skripta.pdf) (20.8.2019.)
5. „The Internet of Things And Smart Cities“. Dostupno na: <https://www.iotevolutionworld.com/smart-home/articles/441882-internet-things-smart-cities.htm> (19.9.2019.)
6. „What is the Internet of Things? WIRED explains“. Dostupno na: <https://www.wired.co.uk/article/internet-of-things-what-is-explained-iot> (19.9.2019.)
7. „Bluetooth basics“. Dostupno na: <https://www.lifewire.com/what-is-bluetooth-2377412> (21.6.2019.)
8. „The Electromagnetic Spectrum“. Dostupno na: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html> (21.6.2019.)
9. Curt Franklin and Julia Layton: „How Bluetooth Works“. Dostupno na: <https://electronics.howstuffworks.com/bluetooth2.htm> (21.6.2019.)
10. „Bluetooth radio interface, modulation and channels“. Dostupno na: ["Bluetooth Radio Interface, Modulation & Channels". Radio-Electronics.com.](https://www.radio-electronics.com/bluetooth-radio-interface-modulation-channels) (20.5.2019.)

11. „What is WiFi? Here is everything you need to know“. Dostupno na: <https://www.digitaltrends.com/computing/what-is-wi-fi/> (15.5.2019.)
12. <http://www.diegm.uniud.it/tonello/MATERIAL/STANDARDS/802.11/802.11g-2003.pdf>
13. „Što je i kako radi NFC?“ Dostupno na: <https://mob.hr/sto-je-i-kako-radi-nfc/> (15.5.2019.)
14. „What is RFID?“ Dostupno na: <https://www.epc-rfid.info/rfid> (15.5.2019.)
15. „Što je RFID?“ Dostupno na: <http://www.tagnology.com/hr/rfid/sto-je-rfid.html> (15.5.2019.)
16. „Zigbee wireless standard“. Dostupno na: <https://www.automatika.rs/baza-znanja/obrada-signala/zigbee-wireless-standard.html> (20.8.2019.)
17. „What is Zigbee and why is it important for your smart home?“ Dostupno na: <https://www.pocket-lint.com/smart-home/news/129857-what-is-zigbee-and-why-is-it-important-for-your-smart-home> (20.8.2019.)
18. „Keysight Technologies Low Power Wide Area Network (LPWAN) Technologies – Benefits and Test Challenges“
19. Andrea Goldsmith, Stanford University: „Wireless Communications“. Dostupno na: <http://ee.sharif.edu/~pr.wireless.comm/references/Goldsmith.pdf> (14.8.2019.)
20. „LPWAN overview“. Dostupno na: <https://tools.ietf.org/id/draft-ietf-lpwan-overview-09.html> (21.5.2019.)
21. „IoT Connectivity – Comparing NB – IoT, LTE – M, LoRa, SigFox and other LPWAN technologies“. Dostupno na: <https://www.iotforall.com/iot-connectivity-comparison-lora-sigfox-rpma-lpwan-technologies/> (23.8.2019.)
22. „What is Sigfox?“ Dostupno na: <https://build.sigfox.com/sigfox> (15.5.2019.)
23. „What is the LORAWAN specification?“ Dostupno na: <https://loralliance.org/about-lorawan> (21.5.2019.)
24. <https://www.telensa.com/solutions/> (21.5.2019.)
25. <https://www.ingenu.com/get-started/resources/> (21.5.2019.)
26. „LTE“. Dostupno na: <https://web.archive.org/web/20081207052302/http://www.3gpp.org/article/lte> (15.6.2019.)
27. <http://cupcarbon.com/> (21.8.2019.)

28. „Securing your wireless network“. Dostupno na:  
<https://www.nibusinessinfo.co.uk/content/wlan-components> (15.9.2019.)
29. „Keysight Technologies A Little dB’ll Do Ya! A Survey of Low Power Wide Area Network (LPWAN) RF Technologies“
30. „Ad Hoc Wireless Network“. Dostupno na:  
<https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/ad-hoc-wireless-network> (15.9.2019.)

## Sažetak

U teorijskom dijelu ovog diplomskog rada opisane su sve glavne bežične tehnologije koje se koriste za bežični prijenos podataka u pametnim gradovima te su u *CupCarbon* simulatoru izvedena tri praktična scenarija. Rezultati praktičnih scenarija slažu se s teorijskom podlogom opisanom ranije. Također su opisane sve glavne tehnologije za bežični prijenos kratkog dometa, a to su: Bluetooth, WiFi, NFC, RFID i ZigBee. ZigBee tehnologiju karakterizira najmanji domet i najmanja potrošnja energije, što je i prikazano u prvom praktičnom scenariju. Nadalje, LoRa tehnologiju karakterizira najveći radijus pokrivanja, ali s manjom potrošnjom energije od WiFi tehnologije, što je također prikazano u prvom praktičnom scenariju. WiFi tehnologiju karakterizira srednji radijus pokrivenosti, ali i najveća potrošnja energije.

Ključne riječi: CupCarbon, LoRa, ZigBee, WiFi, NFC, RFID, Bluetooth

## Summary

The theoretical part of this graduate thesis describes all important wireless technologies used for wireless data transmission in smart cities, and also three scenarios that are performed in the *CupCarbon* simulator. The results of the practical scenarios match with the theoretical background described earlier. It also describes all the major technologies for short range wireless transmission, including: Bluetooth, WiFi, NFC, RFID and ZigBee. ZigBee technology is characterized by the smallest coverage area and the lowest power consumption, which is demonstrated in the first practical scenario. Furthermore, LoRa technology is characterized by the highest coverage area, but also by the lower energy of WiFi technology, which is also shown in the first practical scenario. WiFi technology is characterized by medium coverage area, but also by the highest power consumption.

Keywords: CupCarbon, LoRa, ZigBee, WiFi, NFC, RFID, Bluetooth



## Životopis

Marijana Brnada rođena je u 24.8.1994. u Livnu, BiH. Osnovnu školu završava u Dardi, a potom upisuje Prvu gimnaziju Osijek. Nakon završetka srednjoškolskog obrazovanja upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon prve godine studija opredjeljuje se za smjer „Komunikacije i informatika“. Nakon završetka preddiplomskog studija upisuje sveučilišni diplomski studij, izborni blok Komunikacijske tehnologije.

---