

# Mogućnosti primjene LoRa/LoRaWAN tehnologije u IoT okruženju s naglaskom na sigurnosne aspekte

---

**Viljušić, Veronika**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:868259>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-11**

*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**

**MOGUĆNOSTI PRIMJENE LoRa/LoRaWAN  
TEHNOLOGIJE U IoT OKRUŽENJU S NAGLASKOM  
NA SIGURNOSNE ASPEKTE**

**Diplomski rad**

**Veronika Viljušić**

**Osijek, 2020.**

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	2
2. LoRa/LoRaWAN TEHNOLOGIJA I SIGURNOSNE ZNAČAJKE .....	3
2.1. LoRa.....	3
2.1.1. LoRa mrežne komponente.....	4
2.1.2. Chirp spread spectrum modulacija .....	5
2.2. LoRaWAN .....	6
2.2.1. LoRaWAN klase.....	8
2.3. Sigurnost kod LoRaWAN aplikacija .....	9
2.3.1. Over-the-air activation (OTAA) .....	11
2.3.2. Activation by personalization (ABP) metoda .....	13
2.3.3. Advanced encryption standard (AES) .....	13
2.4. Prednosti sigurnosnih značajki LoRaWAN tehnologije .....	14
2.5. Nedostaci sigurnosnih značajki LoRaWAN tehnologije.....	16
3. PRIMJENA LoRaWAN TEHNOLOGIJE U IOT OKRUŽENJU.....	17
3.1. Primjena u IoT-u .....	18
3.2. Primjena u poljoprivredi .....	21
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	25
4.1. LoRaSim .....	25
4.2. Analiza podataka .....	46
5. ZAKLJUČAK .....	47
LITERATURA.....	48
SAŽETAK .....	50
ABSTRACT.....	51
ŽIVOTOPIS .....	52

## 1. UVOD

Internet stvari (engl. *Internet Of Things*) opisuje sustav međusobno povezanih uređaja putem interneta, odnosno podrazumijeva mrežu fizičkih objekata čija je svrha upravo povezivanje i razmjena podataka s drugim uređajima i sustavima. IoT aplikacije zahtijevaju tehnologije koje mogu pružiti jeftine krajnje uređaje s niskom potrošnjom energije te imaju mogućnost komunikacije na velike udaljenosti. Takvi uređaji u većini slučajeva rade na baterije te je potrebno osmisliti sustav potrošnje koji će produžiti životni vijek baterije. Uzimajući u obzir navedene karakteristike, realizacija je moguća jedino koristeći tehnologije širokopojasne mreže male snage kao što je LoRaWAN.

LoRa je bežična tehnologija koja služi za komunikaciju na velikim udaljenostima te je kao takva jedna od najraširenijih LPWAN (engl. *Low Power Wide Area Network*) tehnologija u svijetu. S komunikacijskim dometom od preko deset kilometara i dugim životnim vijekom baterija, LoRa tehnologija omogućava aplikacije male snage, velike domete i nisku potrošnju. LoRaWAN je protokol široke mreže male snage, odnosno LPWAN-a koji podržava jeftinu, mobilnu i sigurnu dvosmjernu komunikaciju za IoT, stroj – stroj (*M2M – machine to machine*), pametni grad i industrijske aplikacije. LoRaWAN protokol je optimiziran za malu potrošnju energije i osmišljen je tako da podržava velike mreže s milijunima uređaja. Inovativne karakteristike LoRaWAN tehnologije uključuju podršku za aplikacije male snage, geolokacije i sl. Uređaji se mogu pokretati i na tehnologijama za prikupljanje energije što osigurava mobilnost i jednostavnost upotrebe. Budući da je sigurnost temeljna potreba svih aplikacija, ista je od samog početka i implementirana u LoRaWAN specifikaciji.

U ovom radu je opisana LoRa, odnosno LoRaWAN tehnologija te sigurnosne značajke iste. U drugom poglavlju su opisane osnovne karakteristike, mrežne komponente i modulacija LoRa tehnologije. Također, opisan je LoRaWAN protokol, klase krajnjih uređaja i sigurnosne značajke. U trećem poglavlju su analizirane neke od primjena LoRa tehnologije u IoT-u. Ukratko su opisani radovi koji su za rješenje problema koristili upravo LoRa tehnologiju. Četvrto poglavlje predstavlja eksperimentalni dio gdje je pomoću LoRaSim simulatora analizirana potrošnja energije u različitim uvjetima.

## **1.1. Zadatak diplomskog rada**

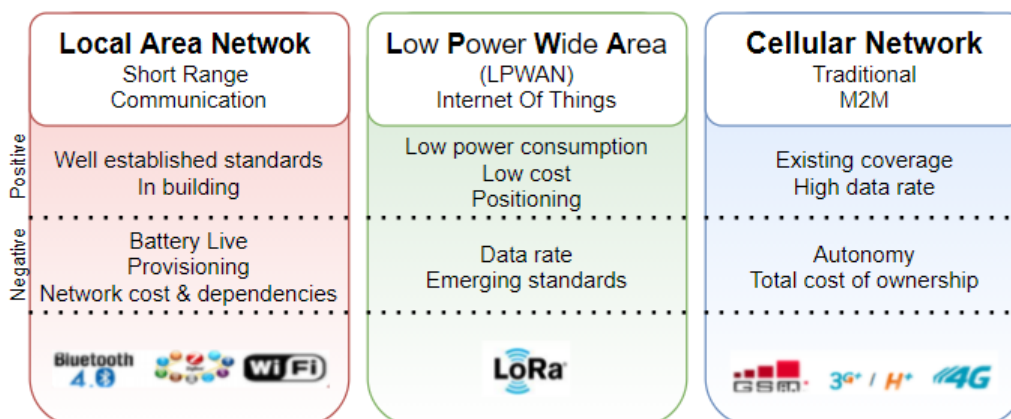
IoT podrazumijeva modernu komunikacijsku platformu koja primjenom različitih komunikacijskih tehnologija omogućava povezivanje i međusobnu interakciju različitih heterogenih uređaja i sustava. LoRa i LoRaWAN predstavljaju jednu od komunikacijskih tehnologija koja svoju primjenu pronalazi unutar IoT okruženja. Potrebno je sustavno analizirati mogućnosti i primjere primjene LoRa/LoRaWAN tehnologije u IoT okruženju, s posebnim naglaskom na aspekte sigurnosti i privatnosti. LoRa komunikaciju unutar IoT-a analizirati u testnom okruženju, te komentirati dobivene rezultate, te naglasiti smjernice za povećanje razine sigurnosti i privatnosti.

## 2. LoRa/LoRaWAN TEHNOLOGIJA I SIGURNOSNE ZNAČAJKE

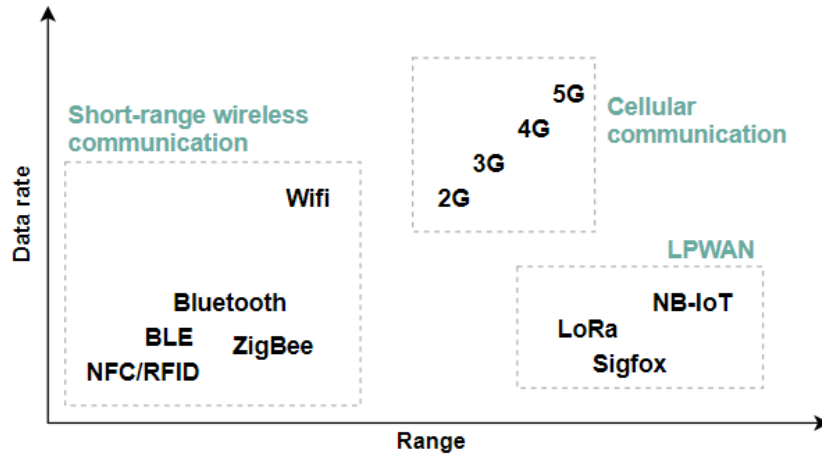
### 2.1. LoRa

LoRa je bežična tehnologija koja služi za komunikaciju na velikim udaljenostima te je kao takva jedna od najraširenijih LPWAN (engl. *Low Power Wide Area Network*) tehnologija u svijetu. Namijenjena je sustavima koji zahtijevaju mogućnost slanja i primanja malih količina podataka na velikim udaljenostima bez velike potrošnje energije. Koristi ISM opsege od 868MHz i 900MHz te može prenositi podatke na udaljenostima od nekoliko kilometara, ovisno o okruženju. LoRa je rješenje širokog spektra te koristi pojase velikih širina kako bi se ostvarila zaštita od smetnji ili okolnog šuma. Mrežni protokol kojeg LoRa koristi je LoRaWAN te isti može pružati brzine prijenosa podataka između 0,3 kbps i 50 kbps, ovisno o potrebnom rasponu te smetnjama. [5]

Prednost LoRa tehnologije je upravo veliki domet. Jedan *gateway* ili bazna stanica može pokriti cijeli grad ili stotine četvornih kilometara. Jedna tehnologija ne može pokriti sve zahtjeve koje aplikacije u IoT-u zahtijevaju. WiFi i BTLE (engl. *Bluetooth Low Energy*) su široko prihvaćeni standardi i prilično veoma dobro služe za aplikacije koje su povezane uz komunikaciju osobnih uređaja. Celularna tehnologija se uklapa u aplikacije koje trebaju veliku propusnost podataka te imaju izvor napajanja. LPWAN omogućava dugi vijek trajanja baterije te je dizajnirana za senzore i aplikacije koji šalju male količine podataka na velike udaljenosti nekoliko puta u satu iz različitih okruženja. [1] Na slici 2.1. je prikazana usporedba LAN, LPWAN i celularne tehnologije. Slika 2.2. prikazuje usporedbu navedenih tehnologija ovisno o dometu i brzini prijenosa podataka.



Slika 2.1. Usporedba tehnologija [1]



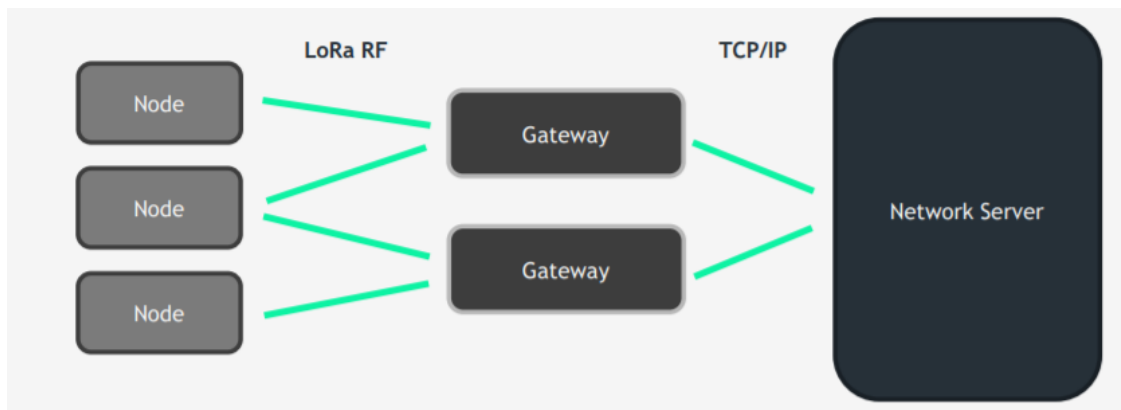
*Slika 2.2. Usporedba tehnologija ovisno o dometu i brzini prijenosa podataka*

### 2.1.1. LoRa mrežne komponente

Eksterni dio LoRaWAN rješenja se sastoji od čvorova i *gateway*-a koji komuniciraju s mrežnim poslužiteljem. Čvorovi se koriste za mjerenje, a ponekad i za daljinsko upravljanje vanjskim sustavima. Obično su male snage te komuniciraju bežično s jednim ili više *gateway*-a. Čvor se obično sastoji od LoRa primopredajnika kojim upravlja mikrokontroler. Mikrokontroler može primopredajniku slati upravljačke naredbe za konfiguriranje LoRa mrežnih postavki ili za slanje i primanje aplikacijskih podataka. Primopredajnik je odgovoran da te aplikacijske podatke isporuči mrežnom poslužitelju putem *gateway*-a. Iako čvorovi mogu „slušati“ cijelo vrijeme, uobičajeno je da isti radi u „pozovi pa poslušaj“ konfiguraciji (engl. *call then listen*). Prilikom takve konfiguracije, čvor šalje podatke mrežnom poslužitelju te zatim ima kratke stanke, odnosno prozore (engl. *windows*) gdje sluša podatke koji se vraćaju natrag od mrežnog poslužitelja. [5]

*Gateway*-a ima u manjem broju nego čvorova te isti prenose podatke od čvorova prema mrežnom poslužitelju koristeći standardne IP veze. Stoga, LoRa slijedi zvijezda topologiju gdje više čvorova komunicira s jednim ili više *gateway*-a koji zatim komuniciraju s jednim mrežnim poslužiteljem. *Gateway*-i ne vrše sigurnosne funkcije, već samo služe kao kanal za prijenos podataka između čvorova i mrežnog poslužitelja.

Mrežni poslužitelj predstavlja rub, odnosno krajnju točku sustava te služi za pohranjivanje i analiziranje podataka poslanih iz čvorova. U nekim već razvijenim sustavima, mrežni poslužitelj je internetska usluga na koju se *gateway*-i mogu povezati pomoću npr. celularnih mreža.



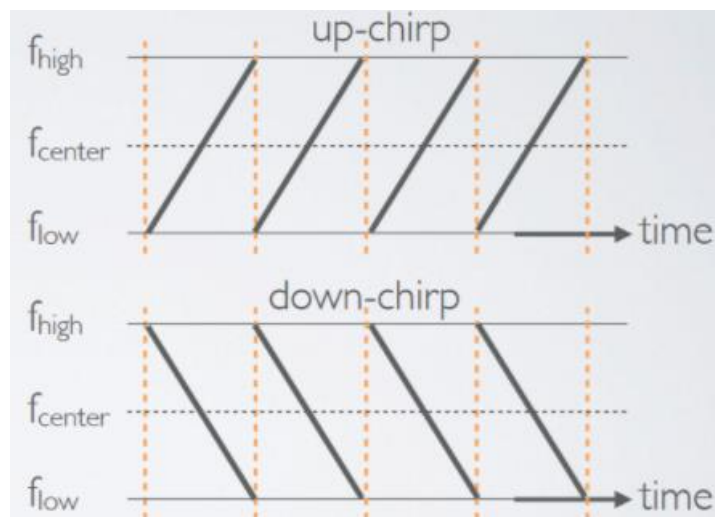
*Slika 2.3. LoRa zvijezda topologija mreže [5]*

### 2.1.2. Chirp spread spectrum modulacija

Mnogi bežični sustavi koriste digitalnu frekvencijsku modulaciju - FSK (engl. *Frequency shifting keying*) budući da je FSK vrlo učinkovita modulacija za postizanje niske potrošnje. LoRa se temelji na *chirp spread spectrum* modulaciji koja uz karakteristiku niske potrošnje (kao i FSK modulacija) znatno povećava i komunikacijski domet. *Chirp spread spectrum* se desetljećima koristi u vojnoj i svemirskoj komunikaciji zbog velikog komunikacijskog dometa i otpornosti na smetnje, ali LoRa je prva jeftina implementacija za komercijalnu upotrebu. [1]

*Chirp spread spectrum* je tehnika širokog spektra koja koristi širokopolasne linearne frekvencijski modulirane *chirp* impulse za kodiranje informacija. CSS modulacija koju LoRa tehnologija koristi pretvara svaki simbol podataka u *chirp*. *Chirp* (*Compressed High Intensity Radar Pulse*) je ton u kojem se frekvencija povećava (*up-chirp*) ili smanjuje (*down-chirp*) u vremenu. [2] Kod *up-chirpa* se frekvencija povećava u vremenu te, nakon što dosegne najvišu vrijednost, ponovno kreće od najmanje. Kod *down-chirpa* vrijedi obrnuto, frekvencija se smanjuje u vremenu te, nakon što dođe do najmanje vrijednosti, ponovno kreće od one najviše. Na slici 2.4. je prikazan *up-chirp* i *down-chirp*. [9]





**Slika 2.4.** Prikaz up-chirp i down-chirp [2]

Najvažniji parametar CSS sustava je faktor širenja. Redoslijed CSS modulacije je definiran kao  $M = 2^{SF}$  što znači da svaki CSS simbol nosi bitove faktora širenja. Svaki CSS simbol sadrži  $M$  složenih uzoraka koji se šalju brzinom jednakoj širini pojasa signala. Prema tome, trajanja CSS simbola je jednako  $T_{sym} = \frac{M}{BW}$  [s]. Tada se brzina kojom se frekvencija CSS signala mijenja tijekom vremena može definirati kao: [9]

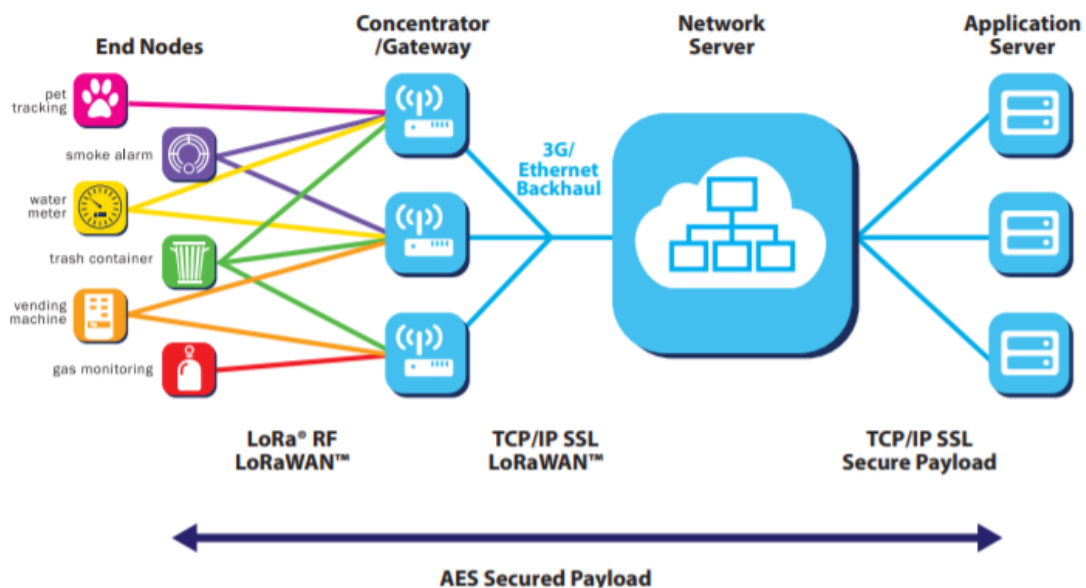
$$\mu = \frac{BW}{T_{sym}} = \frac{BW^2}{M} \text{ [Hz/s]}$$

Upotreba CSS modulacije značajno smanjuje potrebnu energiju za prijenos signala na određenoj udaljenosti. Budući da koristi širokopolasne *chirp* impulse, CSS modulacija je vrlo otporna na smetnje, uključujući i širokopolasne smetnje. Prednost CSS modulacije je i otpornost na višestruki *fading*. Izvorni signal se na putu od odašiljača do prijemnika reflektira o zgrade i druge prepreke zbog višestaznog prostiranja. Ti reflektirani signali dolaze do prijemnika u fazi ili izvan faze, te će ovisno o tome izvorni signal biti pojačan ili oslabljen. To dovodi do prekida komunikacije kod uskopojasnih sustava. Međutim, CSS se razlikuje budući da su pojačani i oslabljeni signali u ravnoteži jer se skupljaju svi udjeli energije (integrirana širokopolasna tehnika). [10]

## 2.2. LoRaWAN

LoRaWAN je protokol za kontrolu pristupa koji se primjenjuje u širokopolasnim mrežama. Dizajniran je kako bi uređajima male snage omogućio komunikaciju s aplikacijama koje su

povezane na internet putem bežičnih mreža velikog dometa. LoRaWAN se može preslikati na drugi i treći sloj OSI modela. [6]



*Slika 2.5. Arhitektura LoRaWAN mreže[6]*

- Krajnji uređaj, čvor (engl. *end device, node*) – objekt s ugrađenim komunikacijskim uređajem male snage
- Gateway – antene koje primaju prijenose od krajnjih uređaja i šalju podatke natrag do krajnjih uređaja
- Mrežni poslužitelj (engl. *network server*) – poslužitelji koji usmjeravaju poruke s krajnjih uređaja do odgovarajuće aplikacije i natrag
- Aplikacija – dio softvera, pokrenut na poslužitelju

Stog LoRaWAN protokola je prikazan na slici 2.6. Sastoji se od aplikacijskog sloja, sloja kontrole pristupa te fizičkog sloja. Podaci s aplikacijskog sloja su preslikani u skup korisnih informacija (engl. *payload*) sloja kontrole pristupa. Korisni teret sloja kontrole pristupa sadrži zaglavlje okvira (koji sadržava i izvorišnu i odredišnu adresu te brojač okvira), port okvira kao i korisni teret okvira (koji sadržava podatke aplikacije).

Port okvira se koristi da bi se odredilo sadrži li sam okvir naredbe sloja kontrole pristupa ili podatke koji su specifični za aplikaciju.

Fizički sloj koristi okvir sloja kontrole pristupa kao korisni teret te tako konstruira okvir fizičkog sloja nakon umetanja preambule, zaglavlja fizičkog sloja i CRC (*cyclic redundancy checking*).



*Slika 2.6. Stog LoRaWAN protokola [8]*

Radiofrekvencijski parametri uključuju frekvencije, razine snage, modulacije te osnovne radiofrekvencijske protokole. Navedeno je sadržano u LoRaWAN RF ili parametrima fizičkog sloja.

Vezano uz sigurnost, LoRaWAN specifikacija definira dva sloja kriptografije:

- Jedinstveni 128-bitni mrežni ključ sesije koji se dijeli između krajnjeg uređaja i mrežnog poslužitelja
- Jedinstveni 128-bitni aplikacijski ključ sesije koji se dijeli s kraja na kraj na razini aplikacije

AES algoritmi se koriste za osiguravanje autentičnosti i integriteta paketa mrežnom poslužitelju te za osiguravanje enkripcije s kraja na kraj aplikacijskom poslužitelju.

Ključevi se mogu aktivirati pomoću dvije metode, a to su OTAA i ABP.

### 2.2.1. LoRaWAN klase

LoRaWAN ima tri različite klase krajnjih uređaja za ispunjavanje različitih potreba širokog spektra aplikacija, a to su: [6]

#### 1. A klasa – najmanja snaga, dvosmjerni krajnji uređaji

To je osnovna, tj. zadana (engl. *default*) klasa koju moraju podržavati svi LoRaWAN krajnji uređaji. Komunikaciju klase A uvijek pokreće krajnji uređaj te je u potpunosti asinkrona. Svaki prijenos uzlaznom vezom se može poslati u bilo kojem trenutku te nakon istog slijede dva kratka okvira, prozora silazne veze (engl. *window*) što daje mogućnost dvosmjerne komunikacije ili kontrolne naredbe mreže ukoliko je potrebno. To je ALOHA tip protokola. Krajnji uređaj može ući u stanje mirovanja male snage onoliko dugo koliko

je to definirano njegovom vlastitom aplikacijom; ne postoje mrežni zahtjevi za periodična „buđenja“ iz stanja mirovanja. To čini A klasu načinom rada s najmanjom snagom, dok ista istovremeno omogućava komunikaciju uzlaznom vezom u bilo kojem trenutku. Budući da komunikacija silazne veze mora uvijek slijediti prijenos uzlaznom vezom po rasporedu koji je definiran aplikacijom krajnjeg uređaja, komunikacija silazne veze mora biti pohranjena u međuspremnik mrežnog poslužitelja do sljedećeg prijensa uzlaznom vezom.

## **2. B klasa – dvosmjerni krajnji uređaji s determinističkim kašnjenjem u silaznoj vezi**

Pored okvira za prijam koji je pokrenut kod A klase, uređaji B klase su sinkronizirani s mrežom koristeći periodične signale (engl. *beacons*) te „ping otvore“ (engl. *ping slots*) silazne veze u zakazanim vremenima. To mreži pruža mogućnost da šalje komunikaciju silazne veze s determinističkim kašnjenjem, ali s dodatnom potrošnjom energije na krajnjem uređaju. Kašnjenje se može programirati do 128 sekundi kako bi odgovaralo različitim aplikacijama, a dodatna potrošnja energije je i dalje dovoljno niska da vrijedi za aplikacije na baterije.

## **3. C klasa – najniže kašnjenje, dvosmjerni krajnji uređaji**

Pored strukture A klase gdje nakon uzlazne veze slijede dva okvira silazne veze, C klasa dodatno smanjuje kašnjenja silazne veze tako što drži prijemnik krajnjeg uređaja otvorenim, tj. slobodnim u svakom trenutku u kojem uređaj ne emitira (polu-dupleks). Na temelju toga, mrežni poslužitelj može u bilo kojem trenutku pokrenuti prijenos silaznom vezom s pretpostavkom da je prijemnik krajnjeg uređaja slobodan, tako da nema kašnjenja. Kompromis je povećana potrošnja, odnosno odvod snage prijemnika (do  $\approx 50\text{mW}$ ) pa je C klasu prikladno primijeniti tamo gdje je dostupna stalna snaga. Za uređaje koji rade na bateriju je moguće privremeno izmjenjivanje A i C klase te je korisno za izmjenične zadatke kao što je ažuriranje *firmware*-a zračnim putem (engl. *firmware over-the-air update*).

### **2.3. Sigurnost kod LoRaWAN aplikacija**

Sigurnost nije uvijek uzeta u obzir prilikom dizajniranja proizvoda te to predstavlja veliki problem prema kojemu se treba postupati kao što se pristupa problemu povezanosti. Neki IoT proizvodi su imaju naslijeđene ugrađene operativne sustave. Instaliranje sustavnih ili sigurnosnih ažuriranja na IoT uređajima je zahtjevna procedura. Čvorovi su obično postavljeni izvan ili unutar imanja potrošača kako bi se prekrila željena geografska područja. Zbog toga ponekad postoji veliki broj devastiranih čvorova koje je teško nadzirati te upravljati istima. [7]

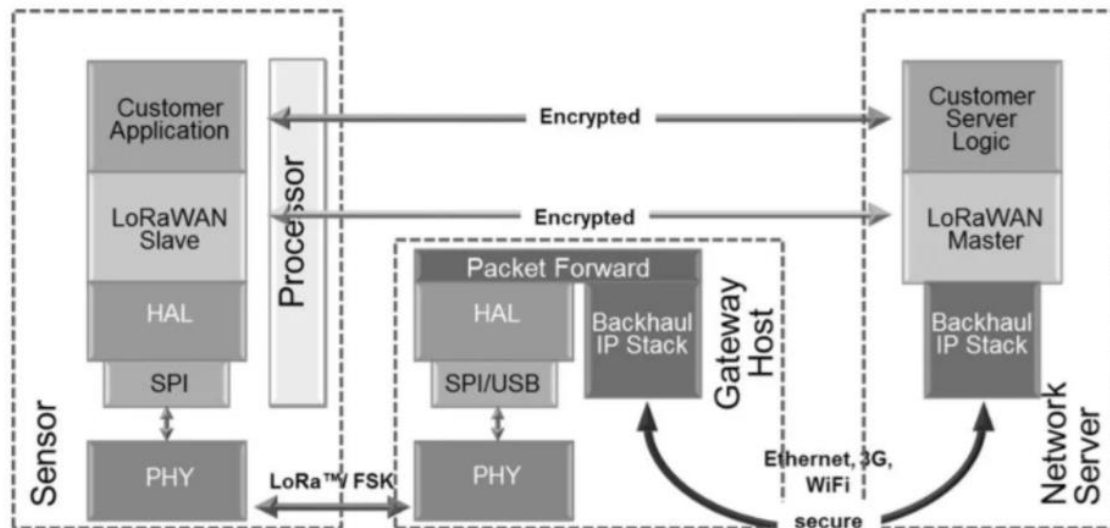
Uvid svakog čvora radi individualne promjene njegovih postavki ili konfiguracija, uključujući i sigurnosne konfiguracije, nije reprezentativno tehničko rješenje. Također, značajnu razinu pouzdanosti ne pruža niti slučaj da proizvođači automatski pokreću čvorove. Kako bi se spriječilo da ažuriranja sama po sebi postanu sigurnosne rupe, moraju se primjenjivati ispravni i provjereni postupci ažuriranja. Neki od sigurnosnih rješenja koja se primjenjuju su šifriranje cijelog diska ili implementacija komponenti koje su otporne na neovlašteno korištenje (engl. *tamper – resistant*). Ova rješenja omogućavaju naprednu digitalnu sigurnost kao i upravljanje životnim ciklusom koristeći enkripciju i ograničenja kontrole pristupa osjetljivim podacima. Važnost sigurnosti se sve više uviđa pa se shodno tome prednosti novih tehnologija trebaju postići samo u sigurnom okruženju. [7]

Sigurnost LoRaWAN tehnologije je dizajnirana tako da odgovara svim općim kriterijima dizajna iste, odnosno, niska potrošnja električne energije, niska kompleksnost implementacije, niski troškovi te visoka skalabilnost. Sigurnosni dizajn LoRaWAN tehnologije se pridržava najsuverenijih načela, a to su upotreba standardnih, dobro provjerenih algoritama i *end-to-end* enkripcije. Osnovna svojstva koja su podržana u LoRaWAN sigurnosti su međusobna provjera autentičnosti, zaštita integriteta i povjerljivost. Međusobna provjera autentičnosti je uspostavljena između krajnjeg LoRaWAN uređaja i LoRaWAN mreže kao dio postupka pridruživanja mreži. Ovakav način osigurava da samo originalni i ovlašteni uređaji budu pridruženi izvornim i autentičnim mrežama. [8]

LoRaWAN MAC i razmjena poruka su autentificirani, zaštićeni integritetom i šifrirani. Ovakva zaštita u kombinaciji s međusobnom provjerom autentičnosti osigurava da mrežni promet ne bude izmijenjen, da dolazi s legitimnih uređaja, te nije razumljiv za prislušivače. LoRaWAN tehnologija dalje provodi *end-to-end* enkripciju korisnog sadržaja aplikacije koji je razmijenjen između krajnjih uređaja i poslužitelja aplikacija. LoRaWAN je jedna od rijetkih IoT mreža koja provodi *end-to-end* enkripciju. U nekim tradicionalnim mobilnim mrežama promet se šifrira putem zračnog, radiokomunikacijskog sučelja, ali se prenosi kao običan tekst u jezgri mreže. Slijedom toga, krajnji korisnici su opterećeni odabirom, razvojem te upravljanjem dodatnog sigurnosnog sloja. Ovaj pristup nije prikladan za LPWAN gdje viši (engl. *over-the-top*) sigurnosni slojevi povećavaju dodatnu potrošnju energije, složenost i troškove.[8]

Budući da je za bilo koju bežičnu mrežu izuzetno važna sigurnost, LoRaWAN koristi dva sloja sigurnosti prikazanih na slici 2.7., jedan za mrežni i jedan za aplikacijski sloj. Sigurnost mrežnog

sloja osigurava autentičnost uređaja u mreži. Sigurnost aplikacijskog sloja osigurava da mrežni operator nema pristup podacima aplikacije krajnjeg korisnika.

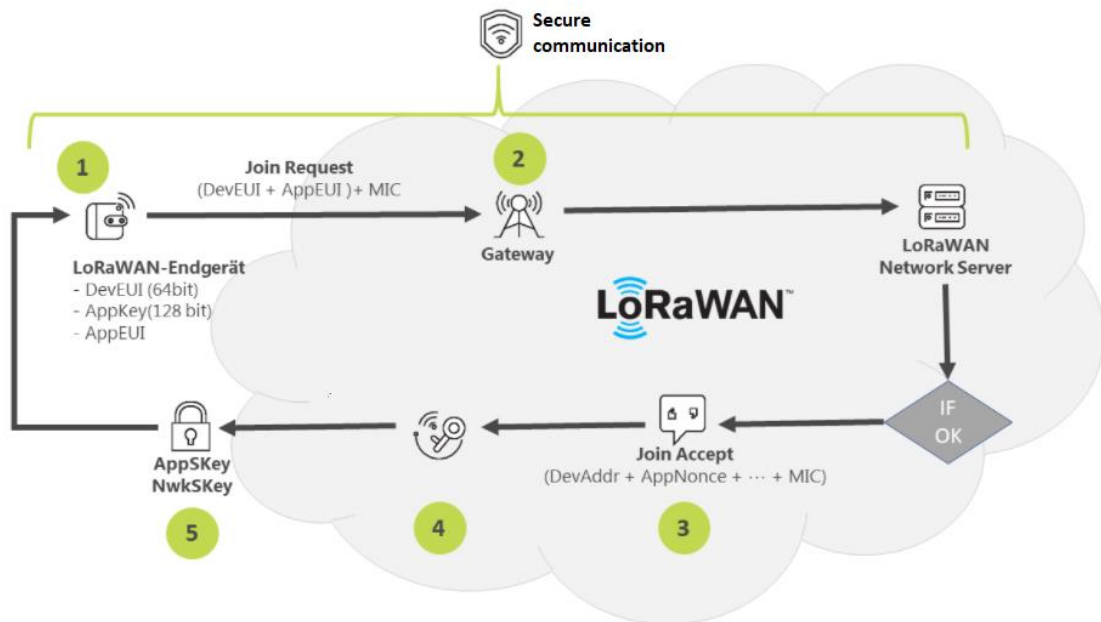


*Slika 2.7. LoRaWAN dvoslojna sigurnost [8]*

Krajnji uređaj (čvor) mora biti aktiviran kako bi mogao komunicirati na LoRaWAN mreži. U LoRaWAN mrežama su dostupne dvije metode aktivacije, a to su OTAA i ABP.

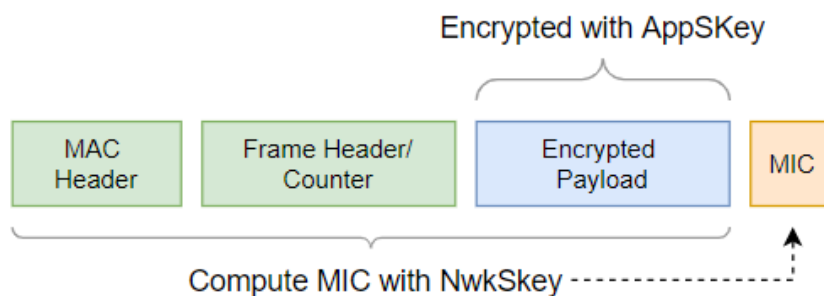
### 2.3.1. Over-the-air activation (OTAA)

Ova metoda se temelji na *over-the-air join requests* i *join accept* porukama koje rade zajedno. Svaki krajnji uređaj (čvor) je razvijen sa 64 bitnim DevEUI, 64 bitnim AppEUI i 128 bitnim AppKey-em. DevEUI je globalno jedinstveni identifikator za uređaj koji ima 64-bitnu adresu usporedivu s MAC adresom za TCP/IP uređaj. AppKey se koristi za kriptografsko potpisivanje zahtjeva za pridruživanje (engl. *join request*). Sve tri vrijednosti su onda dostupne aplikacijskom poslužitelju na koji se uređaj treba povezati. AppKey se koristi kada čvor šalje poruku zahtjeva za pridruživanje kao što je prikazano na slici 2.8. Poruka koju čvor šalje sastoji se od njegovih AppEUI te DevEUI. Dodatno šalje DevNonce, odnosno jedinstvenu, nasumično generiranu dvobajtnu vrijednost koja se koristi za sprječavanje ponovnih napada.



**Slika 2.8.** OTAA metoda u LoRaWAN-u [8]

Ove tri vrijednosti su potpisane s 4-bajtnim MIC kodom (engl. *Message Integrity Code*) pomoću AppKey-a uređaja. Poslužitelj prihvaća zahtjeve za pridruživanje samo s uređaja koji imaju poznate vrijednosti DevEUI i AppEUI provjeravajući MIC kod pomoću AppKey-a.



**Slika 2.9.** Elementi LoRaWAN poruke

Ako poslužitelj prihvati zahtjev za pridruživanje, odgovara uređaju *join accept* porukom. Aplikacijski i mrežni poslužitelji izračunavaju dva 128 bitna ključa čvora, a to su *Application Session Key (AppSKey)* i *Network Session Key (NwkSKey)*. Računaju se pomoći vrijednosti koje je čvor poslao u poruci zahtjeva za pridruživanje.

Osim toga, aplikacijski poslužitelj generira vlastitu trenutnu vrijednost AppNonce koja predstavlja jedinstvenu, nasumično generiranu vrijednost. *Join Accept* odgovor uključuje AppNonce, NetID i adresu krajnjeg uređaja (DevAddr) zajedno s konfiguracijskim podacima za RF kašnjenja. Adresa uređaja (DevAddr) u *join accept* odgovoru je 32-bitni identifikator koji je jedinstven unutar mreže.

Adresa uređaja se može koristiti za razlikovanje krajnjih uređaja koji su se već pridružili mreži. To omogućuje mrežnim i aplikacijskim poslužiteljima da koriste ispravne ključeve za šifriranje te da pravilno interpretiraju podatke.

Kod primanja podataka, isti se kriptiraju pomoću AppKey-a. Čvor zatim koristi AppKey za dešifriranje podataka te dobiva AppSKey i NwkSKey pomoću AppNonce vrijednosti primljene u *join accept* odgovoru.

### **2.3.2. Activation by personalization (ABP) metoda**

Ova metoda se razlikuje od OTAA metode po tome što se čvorovi isporučuju s DevAddr i oba ključa sesije (NwkSKey i AppSKey) koji trebaju biti jedinstveni za svaki čvor. Budući da čvorovi već imaju potrebne informacije i ključeve, mogu započeti komunikaciju s mrežnim poslužiteljem bez potrebe za razmjenom poruka o pridruživanju.

Nakon što se čvor pridruži LoRaWAN mreži, bilo putem OTAA ili ABP metode, sve će buduće poruke biti šifrirane te se potpisuju kombinacijom određenih ključeva: [7]

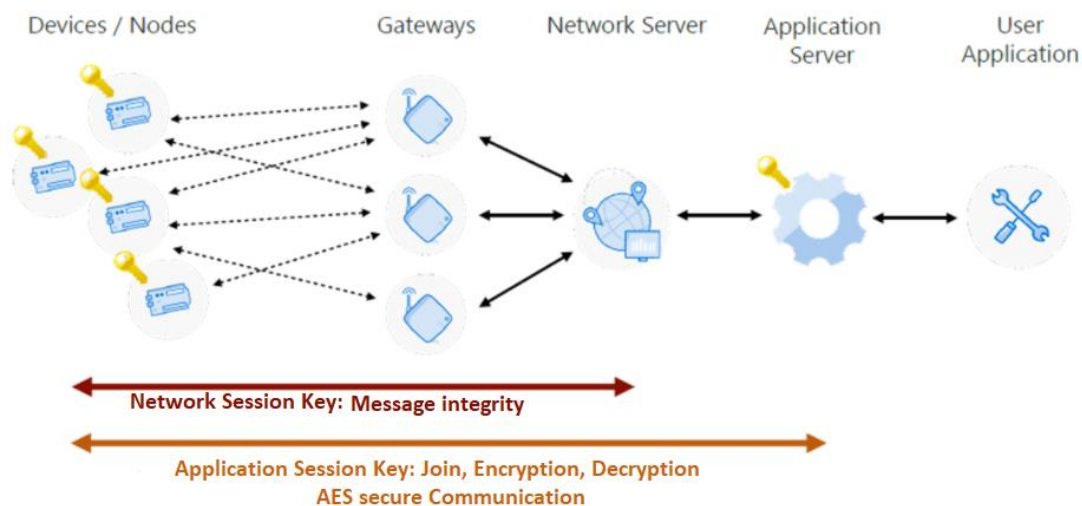
- Mrežni ključ sesije (engl. *Network Session Key, NwkSKey*) – ovo je sigurnosni mehanizam mrežnog sloja. Ovaj ključ je jedinstven za svaki krajnji uređaj te se dijeli između krajnjeg uređaja i mrežnog poslužitelja. Mrežni ključ sesije osigurava integritet poruke prilikom komunikacije te sigurnost krajnjeg uređaja tijekom komunikacije s mrežnim poslužiteljem.
- Aplikacijski ključ sesije (engl. *Application Session Key, AppSKey*) – ovaj ključ je odgovoran za *end-to-end* šifriranje korisnog tereta. Isti je i AES-ov 128 bitni ključ koji je jedinstven za svaki krajnji uređaj. Dijeli se između krajnjeg uređaja i aplikacijskog poslužitelja. Aplikacijski ključ sesije šifrira i dešifrira aplikacijske poruke i osigurava sigurnost za korisni teret aplikacije.

Ova dva ključa sesije (NwkSKey i AppSKey) su jedinstvena za svaki uređaj i svaku sesiju. Ako se uređaj aktivira dinamički (OTAA metoda), ti ključevi su obnavljaju pri svakoj aktivaciji. Ako se uređaj aktivira statički (ABP metoda), ključevi ostaju isti sve dok se ručno ne promijene.

### **2.3.3. Advanced encryption standard (AES)**

AES šifriranje pomoću razmjene ključeva koje je implementirano u LoRaWAN-u, temeljeno na sigurnosti za IEEE 802.15.4. bežične standarde je prikazano na slici 2.10.





*Slika 2.10. LoRaWAN sigurni prijenos podataka [8]*

LoRaWAN omogućava jednostavan postupak za povjerljivost i integritet podataka s kraja na kraj koji trebaju biti interoperativni među proizvođačima i pružateljima mrežnih usluga. Implementirani mehanizam šifriranja osigurava da LoRaWAN mreža ostane sigurna.

## 2.4. Prednosti sigurnosnih značajki LoRaWAN tehnologije

Sigurnost sustava u LoRaWAN mrežama se osigurava kombinacijom tehničkih i operativnih mjera. Važno je napomenuti da je LoRaWAN u početku dizajnirana za uređaje s ograničenim hardverom te većina aplikacija u LoRaWAN mreži prima podatke s distribuiranih senzora. LoRaWAN je za tipične aplikacije jednostavna za korištenje te je isplativo i sigurno rješenje.

Prednosti sigurnosnih značajki LoRaWAN-a se sastoji od brojnih dobrih praksi. Reprezentativni primjeri istog uključuju: [8]

1. OTAA opskrba – događa se kada se ključevi i potvrde dinamički prenose za svaku sesiju između uređaja, mreže i poslužitelja. To je vrlo korisna praksa. Pokretanje mrežnih postupaka ponovnog pridruživanja povremeno mijenja ključeve sesije. Ove mogućnosti su važne za sprječavanje mogućih rizika kao što su prevare, lažiranje itd.
2. Dinamički aktivirani uređaji (OTAA) tijekom postupka aktivacije koriste aplikacijski ključ (AppKey) za dobivanje dva ključa sesije. U mreži je njihova vrijednost postavljena na zadanu vrijednost AppKey-a koja se koristi za aktiviranje svih uređaja. Preporučljivo je implementirati prilagođenu vrijednost AppKey-a za svaki uređaj. Važno je naglasiti da se niti u jednom trenutku sigurnosnog postupka ključevi ne šalju putem zraka. Izmjenjuju se

samo oni podaci koji nedostaju za izračun. Zbog toga je izuzetno teško generirati bilo koji ključ presretanjem prometa u zraku.

3. Korisno je imati siguran hardverski element u uređaju za pohranjivanje sigurnosnih potvrda. Zbog toga je veoma teško doznati ključeve reverznim postupkom ili skeniranjem memorije uređaja. Također, sigurna upotreba sustava za podizanje sustava (engl. *boot*) treba osigurati integritet ugrađenog softvera (engl. *firmware*) uređaja.
4. Preporučljivo je, ukoliko je to moguće, na aplikacijskom sloju imati dodatni sloj šifriranja i provjeru autentičnosti. Neka rješenja asimetričnih ključeva mogu biti vrlo učinkovita.
5. Da bi se spriječili ponovni napadi, važno je mrežnim poslužiteljima omogućiti *uplink/downlink* provjeru brojača poruka odnosno okvira. Zbog povezanosti bežičnom mrežom, još uvijek postoji mogućnost zlonamjernog hvatanja i pohranjivanja poruka. Međutim, obzirom da su poruke šifrirane, nije ih moguće pročitati bez AppSKey-a. Također, nije moguće razmjenjivati poruke na mrežnom sloju bez NwkSKey-a jer će tada MIC provjera biti neuspješna. Moguće je ponovno slanje poruka. Ovi takozvani „ponavljajući napadi“ (engl. *replay attack*) se mogu detektirati i blokirati koristeći brojač okvira. Kada je uređaj aktiviran, brojači okvira su postavljeni na vrijednost 0 (FCntUp i FCntDown). Svaki puta kada uređaj šalje poruku uzlaznom vezom, FCntUp vrijednost se povećava. Sukladno tome, svaki puta kada uređaj šalje poruku silaznom vezom, povećava se FCntDown vrijednost. Ako uređaj ili mreža primi poruku koja ima vrijednost brojača okvira manju od one posljednje zabilježene, poruka se zanemaruje.
6. Za razliku od TCP-a, potvrda LoRaWAN podatkovnih okvira nije obavezna. Samo ako se potvrda neophodna, koristi se tip poruke s potvrđenim podacima. Primateelj onda potvrđuje taj okvir tako što odgovara slanjem podatkovnog okvira koji ima ACK biti postavljen na vrijednost 1. Ovo neobavezno potvrđivanje okvira je idealno za LoRaWAN jer je vrijeme emitiranja uređaja ograničeno. Stoga, određena količina izgubljenih paketa nije značajna. MIC se dodaje na svaki okvir kako bi se provjerila valjanost. To je zapravo potpis koji se izračunava pomoću okvira koristeći mrežni ključ sesije. To znači čak i ako se isti korisni teret prenosi više puta, svaki puta će okvir imati jedinstveni potpis jer se brojač okvira povećava za svaki prijenos.

## 2.5. Nedostaci sigurnosnih značajki LoRaWAN tehnologije

Upotreba LoRaWAN-a ne osigurava stopostotnu zaštitu u bilo kojoj sigurnosnoj domeni te je ta činjenica primjenjiva i na sve ostale sustave bežične tehnologije. LoRaWAN rješenja se trebaju osmisliti sa sviješću o mogućim sigurnosnim prijetnjama.

S obzirom da se LoRaWAN rješenja koriste u širokom rasponu sustava, napadi i neovlaštena korištenja su sasvim mogući. Neki od najvažnijih nedostataka sigurnosnih značajki LoRaWAN-a su: [8]

1. Šifrirane poruke imaju jednaku duljinu kao i ključ.
2. Kada su ključevi sesije ugroženi odnosno razotkriveni, sigurnost će postati neučinkovita jer je previše složeno mijenjati AES ključeve na svim čvorovima i uređajima.
3. Pohrana LoRaWAN ključeva (AppKey, NwkSKey i AppSKey) je bitno područje interesa. Rješenja trebaju biti razvijena uzimajući u obzir cyber sigurnost u svakoj fazi razvoja i korištenja. Postoji nekoliko točaka podložnih napadu u vezi s upravljanjem životnim ciklusom ključa, generiranjem ključeva sesije, pohranom i prijenosom koje zahtijevaju pažljiv dizajn i implementaciju. Za marketing nije dobro da korisnici imaju pristup ključevima uređaja. Poznati napadi bočnih kanala (engl. *side channel*) se mogu koristiti za oporavak ključeva iz memorije uređaja. Svi ključevi uređaja trebaju biti zaštićeni na odgovarajući način, kao što je enkripcija pod glavnim ključem, kako bi se ublažile prijetnje uslijed izlaganja. Pohrana LoRaWAN mrežnog ključa poslužitelja je nedostatak koji zahtjeva sustavno rješenje. Kada je poslužitelj ili skup poslužitelja ugrožen, to će utjecati na cjelokupnu sigurnost LoRaWAN-a, dajući napadačima slobodu da presretne ili krivotvori bilo koju poruku.
4. Još jedna slaba točka se veže uz postupke identifikacije i povezivanja. Svaki *gateway* povremeno šalje signale serveru (engl. *beacons*), odnosno svoj id. Taj id predstavlja podatak koji napadačima nije teško dobiti. Ukoliko je id poznat, *gateway* može biti „nadglasana“ (engl. *overruled*). Primjer za to je maliciozni *gateway* koji šalje svoj id većom brzinom nego stvarni.

Neki proizvođači imaju drugačiji pristup, a to su retrogradni sigurnosni elementi (engl. *retro-fitting security elements*). Ovaj postupak nije optimalan kada sustav ima puno raspršenih komponenti. Taj postupak je osjetljiv, složen, zahtjevan te često nije pogodan za realizaciju na siguran, pravodoban i isplativ način.

### 3. PRIMJENA LoRaWAN TEHNOLOGIJE U IOT OKRUŽENJU

Internet stvari podrazumijeva sustav međusobno povezanih uređaja putem interneta. IOT aplikacije trebaju sve više tehnologija koje mogu pružiti jeftine krajnje uređaje male snage i niske kompleksnosti koji će moći bežično komunicirati na velikim udaljenostima. Kako su u većini slučajeva IOT krajnji uređaji senzorski čvorovi koji rade na baterije, sustav potrošnje baterije treba biti pažljivo osmišljen kako bi životni vijek baterije produžio. Budući da su krajnji uređaji raspoređeni na velikom području, komunikacijski domet treba biti od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara. Uzimajući u obzir navedene karakteristike, realizacija je moguća jedino koristeći tehnologije širokopolasne mreže male snage (LPWAN) kao što je LoRaWAN. LoRaWAN nudi mogućnost razvoja privatnih mreža i jednostavnu integraciju s brojnim mrežnim platformama rasprostranjenim širom svijeta.

S komunikacijskim dometom od preko deset kilometara i dugim životnim vijekom baterija, LoRa tehnologija omogućava aplikacije male snage za velike domete i niske potrošnje. Međutim, kako bi se postigle navedene karakteristike, LoRa tehnologija ima malu brzinu prijenosa podataka.

Neki od tipičnih primjera primjene LoRa tehnologije su:

- **Pametni grad (engl. Smart City)**

LoRa tehnologija pruža pouzdana i izvediva rješenja za razne aplikacije koje bi bile primjenjive u pametnom gradu kao što su pametno mjerenje te upravljanje otpadom. LoRa čvorovi mogu automatski prijaviti podatke sa senzora kojim se zatim može daljinski upravljati putem LoRa mreže. Povezivanjem usluga pametnog grada aplikacije nude mogućnosti za poboljšanje učinkovitosti gradskih djelatnosti te smanjenje troškova održavanja.

- **Nadgledanje okoliša (engl. Environmental Monitoring)**

Praćenje stanja okoliša je vrlo važno kako bi se mogli pružiti okolišni indikatori u stvarnom vremenu, kao što su kvaliteta zraka, temperatura i vlaga te upozorenja na kritične situacije, npr. prirodne katastrofe i onečišćenje okoliša. Uzimajući u obzir financijske i energetske potrebe, pogodno je primijeniti mrežu s LoRa tehnologijom na velikim geografskim područjima. LoRa čvorovi male snage s raznim sensorima mogu komunicirati s okolinom te pravovremeno izvještavati o podacima kako bi se na vrijeme otkrili mogući problemi.

- **Pametno zdravstvo (engl. Smart Healthcare)**

Korištenje informacijske i komunikacijske tehnologije u zdravstvu može rezultirati boljim liječenjem kao i boljim praćenjem bolesti za pacijente. Međutim, veliki troškovi su izazov

za zdravstvenu industriju. Niski troškovi i pouzdane performanse LoRa mreže čine je pogodnom za karakteristične pametne zdravstvene aplikacije. Različiti biološki podaci se prikupljaju posebnim sensorima koji se nalaze na tijelu te se ti podaci mogu provjeriti na vrijeme. Svi neobični pokazatelji se prenose pružateljima zdravstvenih usluga ili zdravstvenim radnicima putem LoRa mreže te se tako omogućava rano otkrivanje i prevencija bolesti.

- **Pametna uzgoj (engl. Smart Farming)**

Pametna uzgoj je primjena suvremene tehnologije u poljoprivredi te je cilj poboljšanje količine i kvalitete poljoprivrednih proizvoda, istovremeno smanjujući utjecaj na okoliš i čuvajući resurse. Primjer pametnog uzgoja temeljenog na LoRa tehnologiji, kao što je npr. nadzor vlage u tlu i autonomno navodnjavanje, ima veliki potencijal za postizanje održivije poljoprivredne proizvodnje. Značajke LoRa tehnologije kao što su dugi doomet, niski troškovi i mala snage omogućuju upotrebu senzora za prijenos podataka s farme u oblak gdje se mogu napraviti učinkovitije operacije i upravljanje podacima.

### 3.1. Primjena u IoT-u

Cilj interneta stvari je dati bilo kojem objektu, odnosno bilo kojoj stvari, mogućnost povezivanja na internet kao i komunikaciju s drugim objektima. Provedeno je nekoliko različitih istraživanja koja su dovela do razvijanja različitih kategorija interneta stvari, kao što su pametne kuće, pametni gradovi, pametni prijevoz i sl. Ne postoji određeni model razvoja za internet objekata, nego sve ovisi o slučajevima korištenja. Rješenje jedne kategorije može poslužiti i kao rješenje u nekoj drugoj kategoriji. [11]

Komunikacija je ključan dio koji povezuje sve objekte čineći tako mrežu interneta objekata. Bežična komunikacija pruža brojne prednosti kao što su mobilnost, jednostavno dodavanje više uređaja na mrežu te mogućnosti povezivanja na internet bilo kojeg objekta. Štoviše, bežična senzorska mreža (BSM) je jedna od najuspješnijih tehnologija koja je korištena za razvoj interneta objekata. BSM predstavlja ključni dio interneta stvari jer omogućava međupovezanost i integraciju fizičkih objekata sa cyber-prostorom (engl. *cyberspace*). Također, BSM čini razvoj i implementaciju interneta stvari jeftinijim zbog napretka i inovacija koje se odvijaju u istoj. Sastoji se od bežičnih senzora male snage te su kao takvi valjani infrastruktura za razvoj koja će se koristiti dulje vrijeme. Međutim, BSM se susreće s brojnim izazovima zbog različitih ograničenja senzornih čvorova kao što su energetska kapacitet, računski mogućnosti i širina pojasa. Također,

više pažnje zahtijevaju upravljanje mrežom i sigurnost. Različiti scenariji zahtijevaju drugačije modele implementacije kao i različite parametre mreže. Na primjer, za pametni prijevoz je potrebna mreža koja će moći upravljati mobilnošću, za pametne gradove je potrebna mreža s velikim komunikacijskim dometom i sl. Širokopojasne mreže male snage poboljšavaju postojeće i buduće aplikacije interneta objekata. Međutim, jedna tehnologija ne može riješiti sve izazove. LPWAN mreže posebno ciljaju na situacije u kojima je najpotrebnija prostorna pokrivenost s niskim troškovima implementacije, uključujući uređaje koji su tolerantni na kašnjenje, ne trebaju veliku brzinu prijenosa podataka te zahtijevaju mrežu s malom potrošnjom energije. Nadzor sustava ili određenih parametara sustava je savršen slučaj gdje odgovaraju LPWAN mreže. U nastavku slijede primjeri primjene LoRa uređaja te njihovo ponašanje u različitim aplikacijama. [11]

### **Mobile LoRaWAN**

Istraživanje o pokrivenosti LoRa mreže povećanjem udaljenosti između odašiljača i prijemnika je provedeno u radu [13]. Cilj istraživanja je bio pronalazak maksimalnog dometa komunikacije koji mreža može postići na temelju mjesta postavljanja. Otkrića iz navedenog istraživanja se mogu koristiti na mjestima koja su slična onima u radu budući da se LoRaWAN parametri razlikuju ovisno o lokacijama. Korišten je maksimalni faktor proširenja koji je poboljšao osjetljivost bazne stanice. LoRaMote je odašiljač koji je bio montiran u automobilu ili brodu. Praćen je broj paketa koji su uspješno preneseni i izgubljeni kako se udaljenost povećava između automobila koji se kreće i prijemnika koji je bio na vrhu zgrade na visini od 24m. Eksperiment je usredotočen na postotak izgubljenih i prenesenih paketa. Rezultati pokazuju 80% uspješnog prijenosa na udaljenosti od 5km, 60% za udaljenost od 5 do 10 km te prihvatljiv gubitak za udaljenost veću od 10 km kada se čvor nalazi pričvršćen na automobilu. Na brodu je postignuto 70% uspješnog prijenosa paketa za udaljenost do 15 km, a doseg komunikacije je bio i do 30 km.

### **Maksimalna propusnost čvora**

U radu [14] je proveden eksperiment kako bi se procijenila maksimalna propusnost koju može steći jedan čvor. Korišteno je šest kanala od 125kHz, a faktor širenja je varirao od 7 do 12. Provedeno je nekoliko testova te je u svakom preneseno 100 paketa s maksimalnim korisnim teretom od 51 bajta. Rezultati su pokazali da za male veličine paketa nije radni ciklus (engl. *duty cycle*) onaj koji ograničava propusnost, nego razdoblje u kojemu su otvoreni prozori primanja odašiljača, jer predajnik ne može prenositi pakete kada su prozori prijemnika i dalje otvoreni. Zaključeno je da maksimalna veličina okvira ovisi o korištenoj brzini podataka. Nadalje,

LoRaWAN nema mogućnost razdvajanja velikih korisnih tereta na više okvira te korisni teret nikada ne bi trebao biti veći od 36 bajtova. To rezultira gubitkom kapaciteta ako je poslana velika količina podataka.

### **LoRa Wi-Fi**

U radu [16] je dizajniran model s više sučelja koji ujedinjuje Wi-Fi i LoRa tehnologiju za postizanje sustava male snage, velikog dometa i prijenosa velike količine podataka. Cilj je bio omogućiti prijenos velike količine podataka koristeći LoRa tehnologiju te razvoj servisa s raznim sensorima. Wi-Fi *handler* i LoRa *handler* pojedinačno šalju podatke putem Wifi i LoRa modula. Sistem je integriran s napajanjem i planerom podataka koji odabire između Wi-Fi-ja i LoRa-e u skladu s prioritetom osjetljivih podataka za regulaciju potrošnje energije.

### **Praćenje emisije stakleničkih plinova**

Automatizirani sustav niske cijene za praćenje emisija stakleničkih plinova u gradu predstavljen u radu [17] koristi LoRaWAN. Sustav se bavi problemom nepostojanja sustava koji daje statistiku o emisijama plinova u Norveškoj i koji podatke čini dostupnima svakom građaninu. Korišten je LoRaWAN komunikacijski protokol za pokrivanje njihovih minimalnih prolaza u gradu. Kako bi se održao životni vijek trajanja baterije čvorova, postavljen je solarni panel pored svakog čvora u svrhu napajanja. Čvorovi su sadržavali različite senzore kako bi mogli mjeriti različite parametre plinova. Mjerena je razina ugljikovog dioksida u razdoblju od 6 mjeseci, a baterija je trajala tijekom cijelog tog perioda.

### **Sustav za praćenje nivoa vode**

U radu [18] je dizajniran sustav za praćenje nivoa vode koristeći bežičnu senzorsku mrežu koja koristi LoRa-u i LoRaWAN kao fizički sloj i komunikacijski protokol. Korišten je Raspberry Pi za slanje osjetljivih podataka prema poslužitelju. Mjerena je širina pojasa kako se udaljenost između *gateway*-a i čvorova prilagođavala ovisno o tome koliko nisko se nalaze čvorovi. *Gateway* se nalazio na vrhu kuće koja može biti visoka 8m.

Bit LoRa uređaja je domet. LoRa daje prioritet onim čvorovima koji su bliži kako bi se smanjilo zagušenje u mreži te bliži uređaji mogu prenositi s malim *time-on-air*. Istraživanja LoRa tehnologije su usmjerena na testiranje sposobnosti i osiguravanja komunikacije na daljinu s malom potrošnjom energije.

## 3.2. Primjena u poljoprivredi

Primjena bežične komunikacijske tehnologije u preciznim poljoprivrednim sustavima pomaže u ispunjavanju zahtjeva u stvarnom vremenu, pouzdanosti i održivosti u praćenju i kontroli okolišnih čimbenika za rast usjeva. U nastavku je opisano nekoliko primjena LoRa tehnologije u poljoprivredi.

### Pametni sustav za praćenje okoliša

S obzirom na trenutne pametne sustave za prikupljanje i obradu podataka u poljoprivredi, uobičajena bežična tehnologija ima kratki domet kao i smetnje prilikom prijenosa signala u sustavima za praćenje okolišnih parametara (kao npr. velike farme). U radu [19] je prikazan sustav male snage za praćenje okoliša koji je temeljen na LoRa tehnologiji. Najprije je model sustava izgrađen u laboratorijskom okruženju. Za prikupljanje informacija o različitim parametrima u okolišu se koriste različiti senzori kao što je temperaturni senzor, senzor vlažnosti tla, senzor intenziteta svjetlosti, senzor za detekciju koncentracije ugljikovog dioksida. LoRa kao bežična komunikacijska tehnologija širokog spektra omogućuje uštedu energije, transparentan prijenos te nadzor. Preneseni podaci se obrađuju i spremaju. Predloženi sustav na temelju senzora detektira određene parametre te je na osnovi toga ostvarena kontrola osvjetljenja, navodnjavanje, kontrola hlađenja te kontrola čovjek-stroj. Nakon uspostave eksperimentalnog modela, izvedivost sustava je verificirana te je isti primijenjen na staklenik zmajevog voća.

Sustav se sastoji od aplikacijskog sloja, mrežnog sloja i raznih senzora. Postoje četiri vrste senzora koje se koriste, a to su senzor za detekciju koncentracije ugljikovog dioksida, detekcija vlage u tlu, vlažnosti zraka, temperature te intenziteta svjetlosti. Komunikacijski modul koji se koristi u mrežnom sloju je zasnovan na LoRa protokolu. Podaci koji se prikupljaju mogu pomoći rukovodiocima farmi da bolje prate okolišne uvjete usjeva u stvarnom vremenu.

### Uređaj za prikupljanje energije

U radu [20] napravljen je prototip uređaja za prikupljanje energije koji je posebno dizajniran za pametne aplikacije u poljoprivredi. Stoga je prototip, između ostalih komponenti, opremljen s nekoliko senzora za praćenje okoliša i energetske uvjete koristeći komunikacijski modul LoRa. Fizička mreža se sastoji od nekoliko uređaja koji predstavljaju krajnje čvorove te bespilotne letjelice s ograničenim vremenom letenja koja služi kao mobilni *gateway*. Izgrađen je prototip krajnjeg uređaja koji uključuje solarnu ploču za skupljanje energije te LoRa komunikacijski modul kako bi se omogućio prijenos podataka prema bespilotnoj letjelici putem LoRaWAN-a. Krajnji

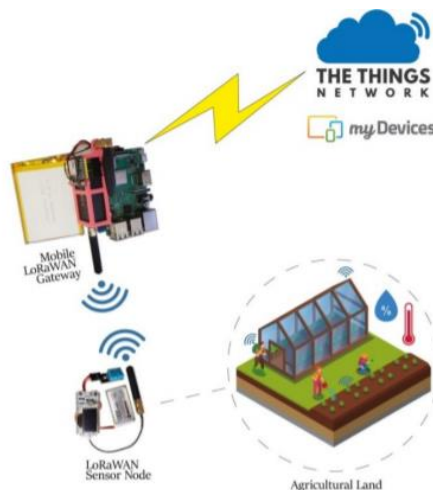


uređaji šalju prikupljene podatke bespilotnoj letjelici te je ista dostupna samo u određenim trenucima u danu na kratko vrijeme, odnosno onda kada će se odvijati komunikacija između uređaja i bespilotne letjelice. Nakon leta, bespilotna letjelica se vraća na prvobitno mjesto te se podaci trajno pohranjuju na poslužitelju za daljnju obradu i analizu kako bi se generirale relevantne informacije za farmere.

### **Pametni mobilni sustav za poljoprivredu**

Primjenom modernih tehnologija je moguće smanjiti troškove i održavanje te povećati učinkovitost procesa u poljoprivredi. Jedna od takvih tehnologija je upravo LoRa koja je izuzetno korisna u poljoprivredi gdje su područja na kojima se treba odvijati komunikacija veoma prostrana polja i staklenici. U radu [21] je predložen i predstavljen razvoj mobilnog LoRaWAN gateway-a koji se može primijeniti u svrhu povećanja produktivnosti i preciznosti staklenika. Napajanje se vrši vanjskom Li-On baterijom te se koristi određeni broj LoRa čvorova sa sensorima. Sensori mjere vlažnost i temperaturu, podaci se šalju te ih prikuplja LoRaWAN gateway. Podaci se obrađuju pomoću besplatne internetske usluge *The Things Network*. *The Things Network* je besplatna mreža za IoT koja koristi LoRaWAN tehnologiju kako bi se omogućila komunikacija između uređaja bez 3G-a ili WiFi-a. Omogućuje povezivanje bilo kojeg LoRaWAN gatewaya ili čvora. Nakon konfiguracije, mreži je moguće slati informacije koje prima gateway te ih zatim šalje na Internet.

Glavna prednost ovog sustava je mobilnost. Ideja je imati mrežu senzora koji se nalaze na velikom području te mogućnost očitavanja podataka svih senzora koji se nalaze u krugu od jednog kilometra oko LoRa gateway-a. Korištenjem ove tehnologije je moguće imati gateway u automobilu ili ruksaku te zatim jednostavno čitati podatke sa senzora. Prikaz sustava je na slici 3.1.



*Slika 3.1. Pametni mobilni sustav za poljoprivredu [21]*

## **Sustav za slanje slika pomoću LoRa tehnologije**

Internet stvari omogućuje poljoprivrednicima da putem interneta prate stanje na terenu pomoću senzora. Postoje razni sustavi za nadzor farmi, ali svaki se temelji na slanju male količine podataka kao što su temperatura i vlaga. Iako su takvi sustavi poljoprivrednicima korisni, isti ne mogu dati informaciju ako npr. usjeva nema zbog neočekivanih razloga, kao što su prirodni faktori ili uljezi. Stoga je nadzorni sustav važan čimbenik u poljoprivredi kako bi se smanjio gubitak u usjevima. Pružanje vizualnog nadzora može spriječiti uljeze da oštete usjeve. Primjenjivanje sustava za promatranje cijele farme u stvarnom vremenu je izazov jer je povezivanje farme žičnim putem nepraktično. IEEE 802.15.4 tehnologija ima nedostatak kratkog dometa za prijenos podataka te nije prikladna za poljoprivredu. LoRa tehnologija osigurava pokrivenost na velikom području, međutim, zbog male brzine prijenosa podataka i ograničene propusnosti, provedeno je samo nekoliko istraživanja koja se bave prijenosom multimedijских podataka poput slika ili videa pomoću iste. U radu [22] je predstavljen sustav za prijenos kontinuiranih slika snimljenih fotoaparatom u statičnom okruženju putem LoRa tehnologije. Ključni izazov je smanjenje količine prenesenih podataka uz očuvanje kvalitete slike te kvalitete usluge koja se pruža. Zapaženo je kako je većina poljoprivrednih površina u statičnom okruženju gdje su značajne promjene zapravo rijetke. Iz navedenog se može zaključiti da se ne moraju prenositi cijele slike. Shodno tome, razvijena je tehnika koja sliku razdvaja na dijelove u obliku rešetke te se prenosi samo promijenjeno područje slike na temelju mjere različitosti. Stoga krajnji korisnik može kontinuirano nadzirati promatranu sliku. Shema je implementirana na pravom LoRa uređaju kako bi se pokazale performanse i kvaliteta slike.

Slanjem samo dijelova slike, odnosno promijenjenog dijela slike je uspješno smanjeno korištenje širine pojasa (engl. *bandwidth*) te je postignuto značajno poboljšanje performansi. Pokazana je izvedivost aplikacija za vizualni nadzor u stvarnom vremenu koristeći LoRa tehnologiju.

## **Sustav za automatsko navodnjavanje**

U radu [23] je predstavljen dizajn automatskog sustava navodnjavanja za staklenike u poljoprivredi koji se temelji na LoRa tehnologiji. Automatski sustav navodnjavanja obavlja funkcije prikupljanja podataka o okolišu u stakleniku te iste koristi za navodnjavanje usjeva pri čemu automatski osigurava maksimalne uštede vode i energije. Arhitektura sustava uključuje koncentrador, krajnje uređaje (čvorove), lokalnu bazu podataka, korisničko sučelje i web poslužitelj. Koncentrador koordinira rad mreže, prima podatke o parametrima iz okoliša koje šalju senzorni čvorovi te prosljeđuje te podatke nadzornom računalu i web poslužitelju. Također,

funkcija ovog uređaja je kontrola postupka navodnjavanja u skladu s načinom koji je korisnik instalirao. Krajnji uređaju, odnosno čvorovi, podrazumijevaju senzorne čvorove i upravljačke čvorove. Senzorni čvorovi vrše mjerenje temperature i vlage zraka te vlage u tlu, dok upravljački čvorovi izravno kontroliraju pokretače kao što su pumpe i ventili. U lokalnoj bazi podataka se nalazi svi pohranjeni podaci, a putem korisničkog sučelja korisnik ima mogućnost nadzora, instaliranja i upravljanja sustavom. Web poslužitelj je mrežni poslužitelj za pohranu podataka s mjernih točaka. Pruža i analizu podataka na temelju korisničkih zahtjeva. Senzorni čvorovi prikupljaju podatke o vlažnosti tla, temperaturi te vlažnosti zraka. Ti se podaci prenose na glavnu stanicu „koncentrator“, a isti će te podatke koristiti za kontrolu postupka navodnjavanja putem upravljačkih čvorova koji se nalaze na razini polja. Podaci se također šalju nadzornom računalu i web poslužitelju kako bi se pohranili za buduću analizu. Korisnici mogu nadzirati, postavljati način navodnjavanja, konfigurirati sustav, pristupiti podacima i upravljati usjevima putem računalnog sučelja i web sučelja.

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

LoRa podržava različite načine transmisije koji se postižu podešavanjem i kombinacijom tri parametra, a to su: [24]

- **Pojasna širina** (engl. *bandwidth, BW*) – može se odabrati između tri opcije, odnosno 125 kHz, 250 kHz ili 500 kHz. Ako je potreban brz prijenos podataka, najbolje je odabrati vrijednost od 500kHz. Ako je potreban veliki komunikacijski domet, vrijednost pojasne širine je potrebno postaviti na 125kHz. Što je pojasna širina manja, to je veća *time-on-air* vrijednost, ali je osjetljivost bolja. Veći *time-on-air* znači i veću potrošnju baterije.
- **Kodna brzina** (engl. *coding rate, CR*) – vrijednost kodne brzine se može odabrati između četiri opcije, a to su 4/5, 4/6, 4/7 i 4/8. Označava da će se svaka 4 korisna bita kodirati s 5, 6, 7 ili 8 prijenosnih bitova, ovisno o odabranoj kodnoj brzini. Što je kodna brzina manja (najmanja je 4/8), to je veći *time-on-air* pa je potrebno više vremena za prijenos paketa. Budući da je svaki simbol „širi“ u vremenu, prijemnik može demodulirati pakete s manjom snagom prijema, što znači da prijemnik ima bolju osjetljivost. Spor prijenos podataka utječe na potrošnju baterije jer što je duže vrijeme za prijenos podataka to je i veća potrošnja baterije.
- **Faktor proširenja** (engl. *spreading factor, SF*) – podrazumijeva broj *chip*-ova koji se koristi za obradu podataka prije prijenosa. Vrijednost je cijeli broj između 6 i 12. Što je veća vrijednost faktora proširenja, to je veća mogućnost da prijemnik „odvoji“ šum od signala. Dakle, što je veći faktor proširenja, to je potrebno više vremena za slanje paketa, ali se postiže i bolji domet jer je bolja osjetljivost prijemnika.

### 4.1. LoRaSim

Za analiziranje LoRa komunikacije je korišten LoRaSim simulator. LoRaSim je simulator diskretnih događaja koji je zasnovan na SimPy-u<sup>1</sup>. Služi za simulaciju kolizija u LoRa mrežama te analizu skalabilnosti. LoRaSim se sastoji od četiri Python skripte: `loraDir.py`, `loraDirMulBS.py`, `directionalLoraIntf.py` i `oneDirectionalLoraIntf.py`. Za potrebe ovog rada je korištena skripta `loraDir.py` koja simulira komunikaciju s jednom baznom stanicom te čvorove s omnidirekcionalnim antenama.

---

<sup>1</sup> SimPy je framework za simulaciju diskretnih događaja zasnovan na Pythonu

Prilikom pokretanja simulacije, potrebno je definirati ulazne parametre:

- *nodes* – predstavlja broj čvorova u mreži
- *avgsend* – predstavlja interval slanja podataka u milisekundama
- *experiment* – cijeli broj koji označava tip eksperimenta, odnosno postavke simulacije. Moguće je odabrati između šest različitih tipova eksperimenata te brojevi označavaju sljedeće postavke:
  - 0** – postavke simulacije podrazumijevaju najmanju brzinu prijenosa podataka (SF12, BW125, CR4/8)
  - 1** – slično kao i eksperiment s oznakom „0“, ali se koristi slučajni odabir od tri frekvencije odašiljanja
  - 2** – postavke simulacije podrazumijevaju najveću brzinu prijenosa podataka (SF6, BW500, CR4/5)
  - 3** – poboljšane postavke čvora ovisno o odaljenosti do *gatewaya*
  - 4** – postavke simulacije su one koje su definirane za LoRaWAN (SF12, BW125, CR4/5)
  - 5** – slično kao i eksperiment „3“, ali poboljšava prijenosnu snagu
- *simtime* – ukupno trajanje simulacije u milisekundama

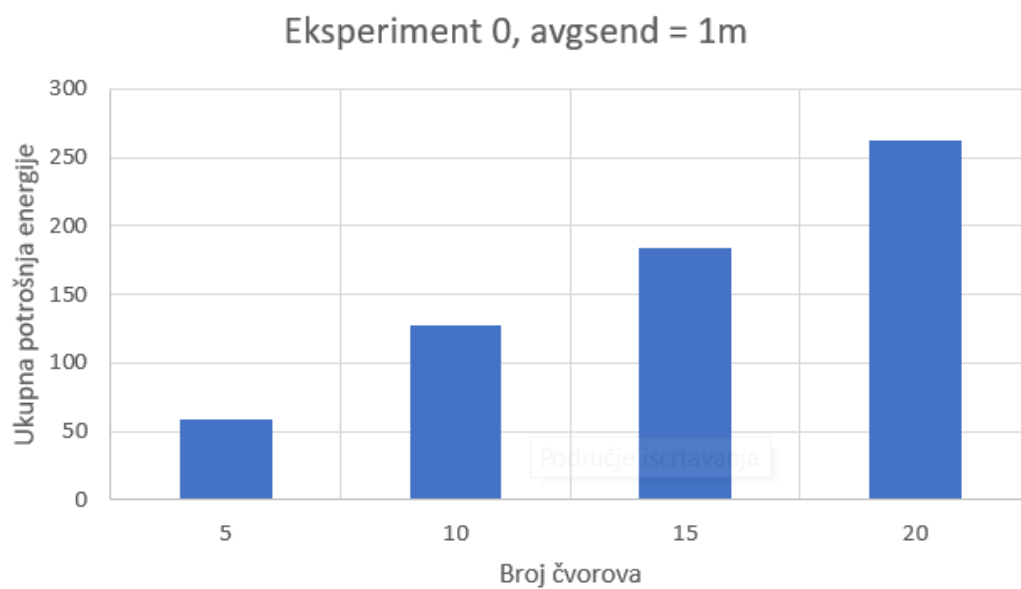
Rezultat svake simulacije se sprema u .dat datoteku te se u istoj nalazi broj čvorova, broj kolizija, broj transmisija i ukupna potrošnja energije određenog eksperimenta. Rezultati su prikazani tablično, te je potrošnja energije u ovisnosti o broju čvorova prikazana i grafički.

### Primjer 1.

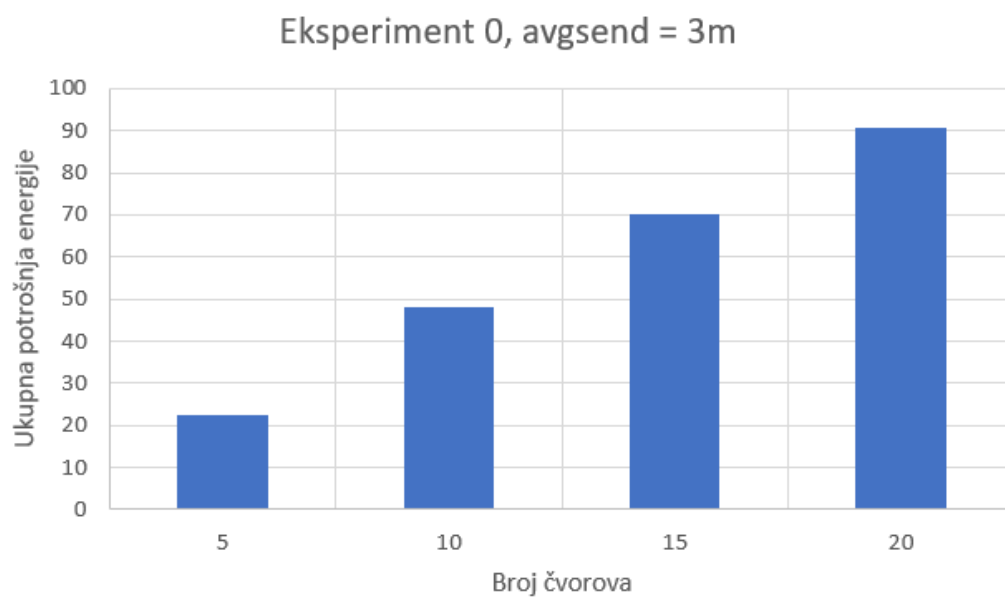
U tablici 4.1. su prikazani izlazni podaci kada je za tip eksperimenta odabran „0“, odnosno postavke s najmanjom brzinom prijenosa podataka. Primjer korištene naredbe za pokretanje simulacije je `python loraDir.py 5 60000 0 360000`, gdje broj „5“ predstavlja broj čvorova, broj „60000“ interval slanja, „0“ označava tip eksperimenta, „360000“ vrijeme trajanja simulacije (1h). Grafički prikazi potrošnje energije ovisno o broju čvorova te intervalu slanja se nalaze na slikama 4.1., 4.2. i 4.3. Na slici 4.4. je prikazan usporedba potrošnje energije za različite intervale slanja podatka.

Interval slanja podataka	Broj čvorova	Broj kolizija	Broj transmisija	Ukupna potrošnja energije [J]
1m	5	41	261	58.986233856
	10	222	562	127.012503552
	15	458	812	183.512727552
	20	760	1161	262.387040256
3m	5	6	99	22.374088704
	10	31	213	48.138190848
	15	65	310	70.06027776
	20	141	402	90.852360192
6m	5	0	47	10.622042112
	10	6	83	18.758074368
	15	23	147	33.222131712
	20	41	210	47.46018816

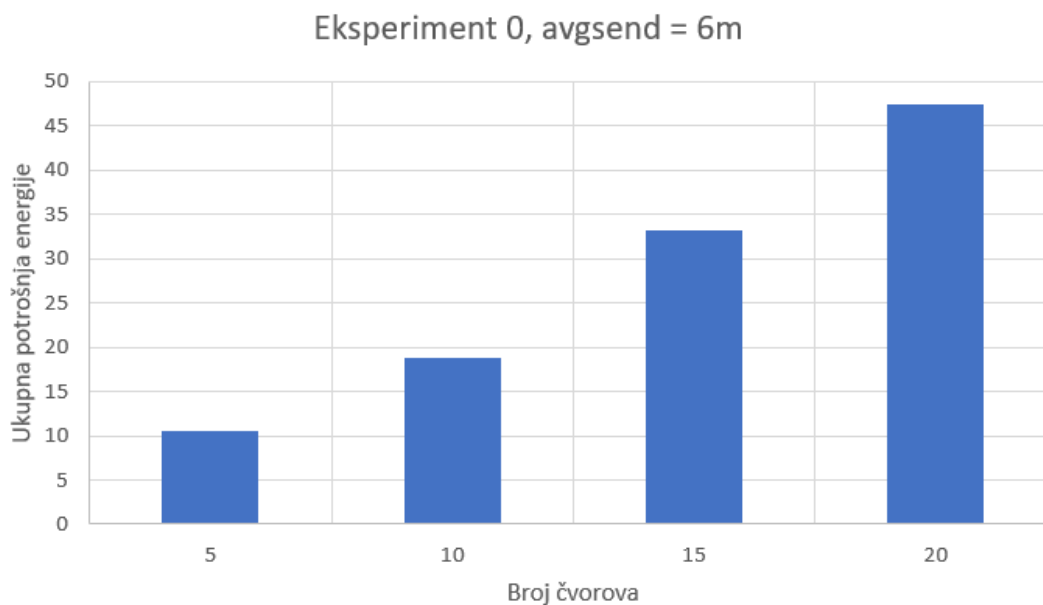
*Tablica 4.1. Prikaz podataka za eksperiment tipa „0“*



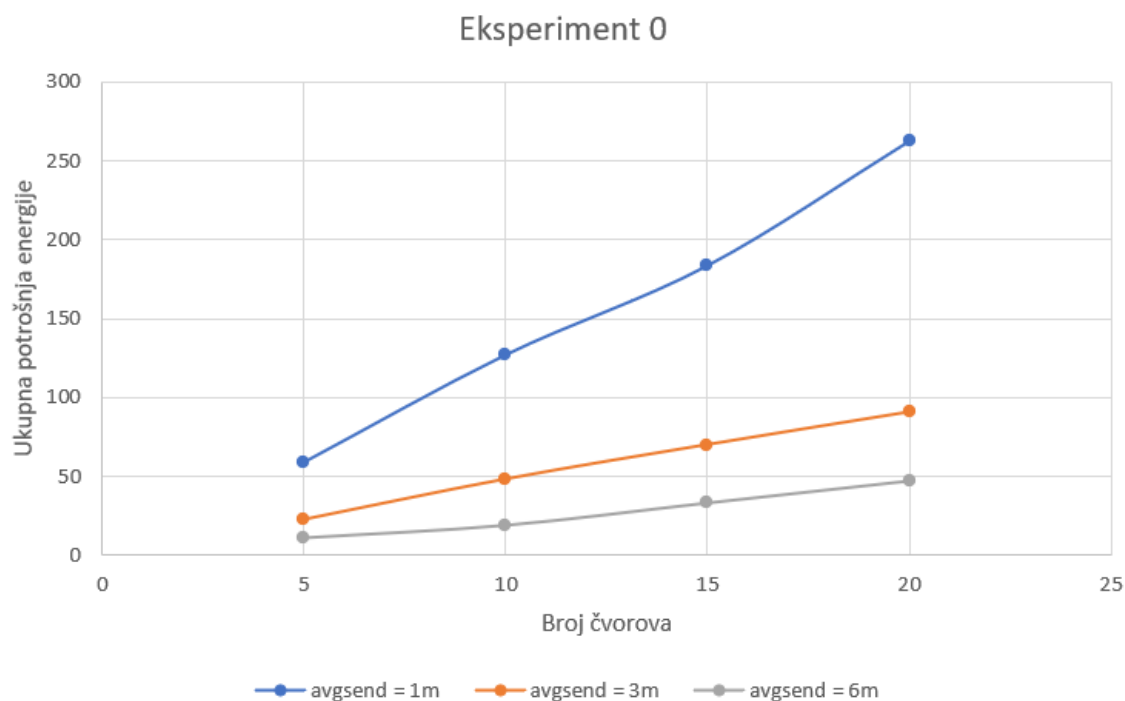
*Slika 4.1. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „0“, avgsend = 1m*



*Slika 4.2. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „0“, avgsend = 3m*



**Slika 4.3.** Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „0“, avgsend = 6m



**Slika 4.4.** Grafički prikaz podataka za eksperiment „0“

Iz izlaznih podataka je vidljivo da s povećavanjem broja čvorova raste i potrošnja energije. Također, što je interval slanja manji, odnosno što se podaci češće šalju, potrošnja energije se povećava. U tablici 4.1. su prikazane vrijednosti broja kolizija i broja transmisija te se može primijetiti da s porastom broja transmisija raste i broj kolizija.

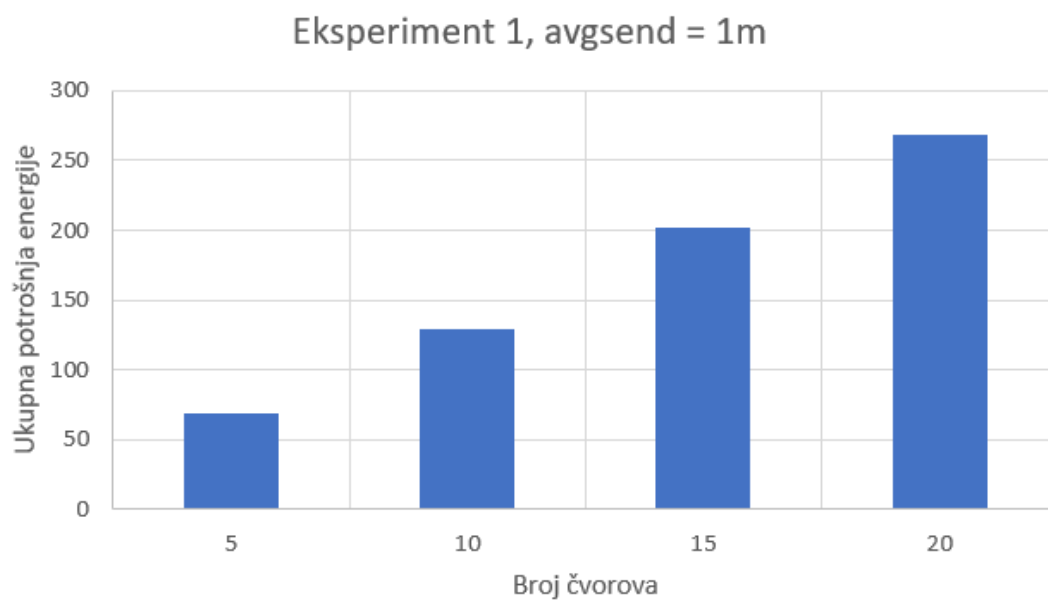


## Primjer 2.

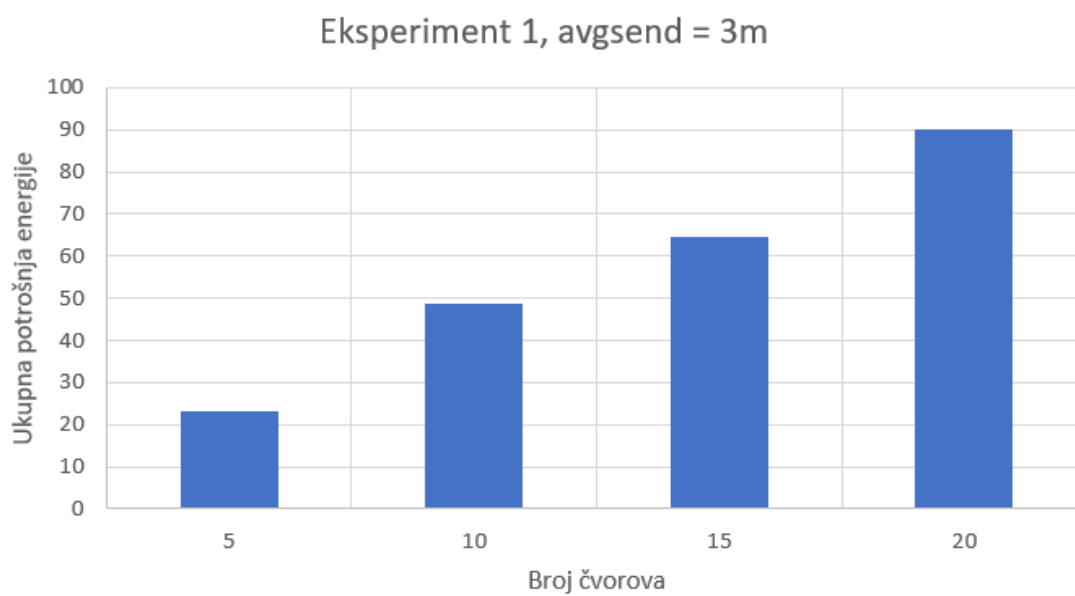
U tablici 4.2. su prikazani izlazni kada je za tip eksperimenta odabran „1“. Postavke su slične kao i za eksperiment tipa „0“, ali se koristi slučajni odabir od tri frekvencije odašiljanja. Primjer naredbe za pokretanje simulacije je `python loraDir.py 10 180000 1 3600000`, gdje broj „10“ predstavlja broj čvorova, broj „180000“ interval slanja, broj „1“ tip eksperimenta te broj „3600000“ vrijeme trajanja simulacije (1h). Na slikama 4.5., 4.6. i 4.7. je prikazan potrošnja energije ovisno o broju čvorova. Grafički prikaz na kojem se nalazi usporedba potrošnje energije za različite intervale slanja je prikazan na slici 4.8.

Interval slanja podataka	Broj čvorova	Broj kolizija	Broj transmisija	Ukupna potrošnja energije [J]
<b>1m</b>	5	26	304	68.704272384
	10	120	570	128.82051072
	15	199	894	202.044801024
	20	340	1188	268.489064448
<b>3m</b>	5	0	102	23.052091392
	10	18	215	48.59019264
	15	23	285	64.41025536
	20	41	399	90.174357504
<b>6m</b>	5	0	28	6.328025088
	10	4	117	26.442104832
	15	4	142	32.092127232
	20	14	198	44.748177408

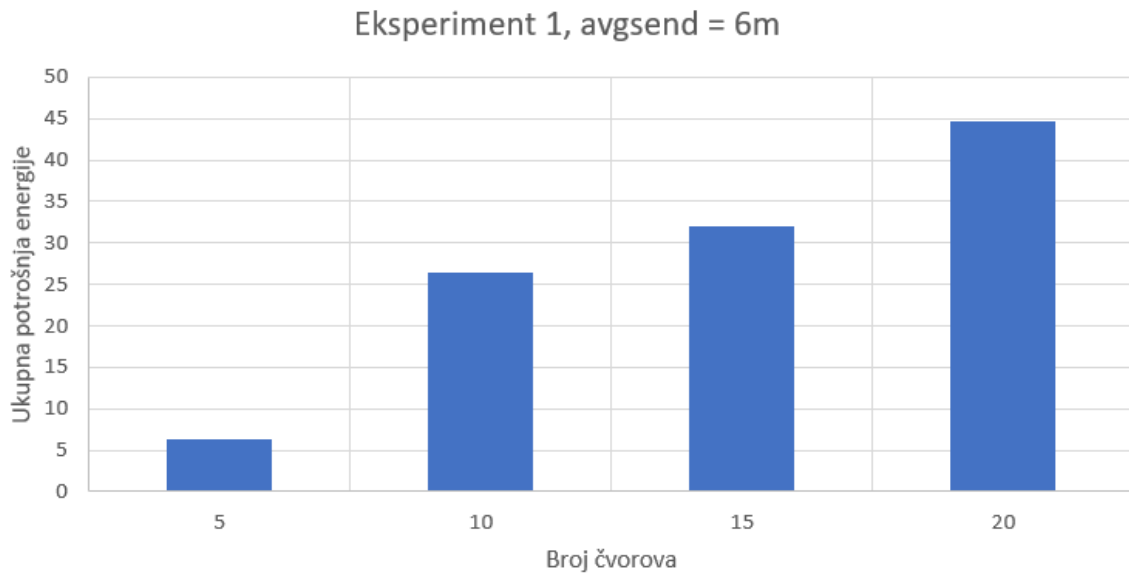
*Tablica 4.2. Prikaz podataka za eksperiment tipa „1“*



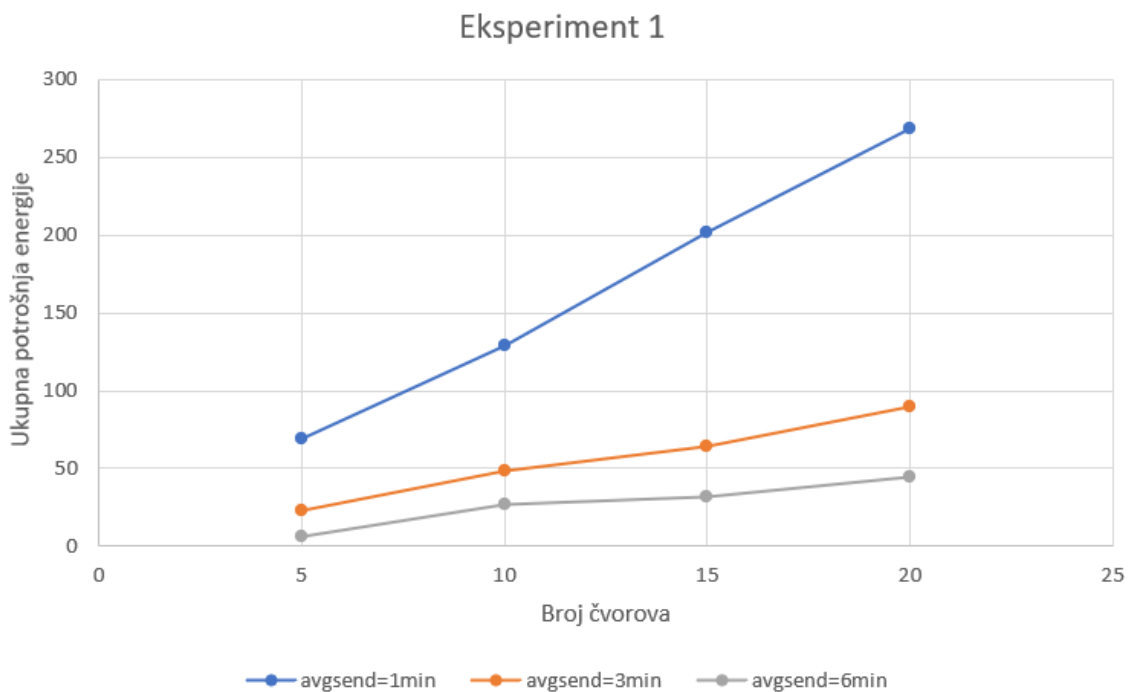
*Slika 4.5. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „1“, avgsend = 1m*



*Slika 4.6. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „1“, avgsend = 3m*



*Slika 4.7. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „1“, avgsend = 6m*



*Slika 4.8. Grafički prikaz podataka za eksperiment „1“*

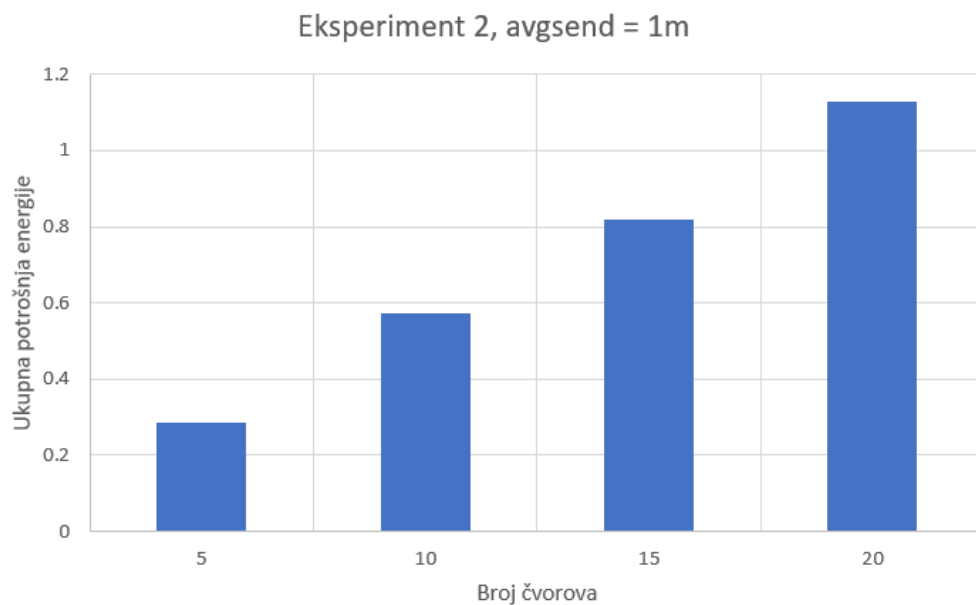
Iz grafičkih prikaza se može primijetiti da potrošnja energije raste s povećanjem broja čvorova. Također, potrošnja energije se povećava s povećanjem intervala slanja poruka. Na primjer, za broj čvorova jednak 20 i vrijeme slanja 1m, potrošnja energije je 268J, dok za isti broj čvorova i vrijeme slanja 6m potrošnja iznosi 44J.

### Primjer 3.

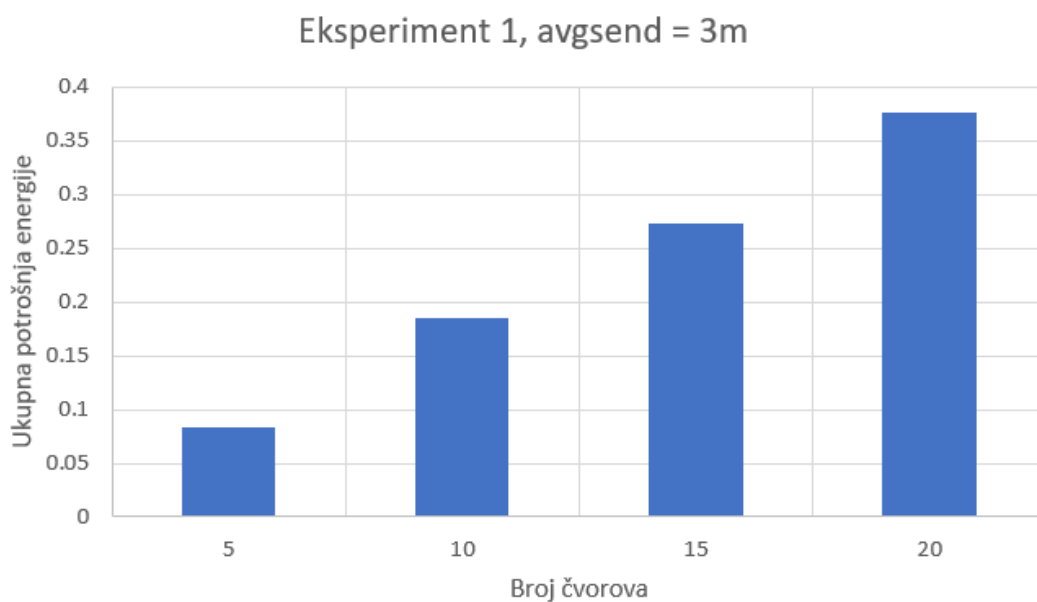
U tablici 4.3. su prikazani izlazni podaci kada je za tip eksperimenta odabran „2“. Postavke podrazumijevaju najveću brzinu prijenosa podataka. Primjer naredbe korišten za pokretanja simulacije je `python loraDir.py 15 360000 2 360000` gdje brojevi redom označavaju: broj čvorova, intervala slanja, tip eksperimenta, ukupno vrijeme trajanja simulacije. Prikazi potrošnje energije za svako vrijeme slanja se nalaze na slikama 4.9., 4.10. i 4.11. Također, na slici 4.12. se nalazi usporedba potrošnje energije za različita vremena slanja.

Interval slanja podataka	Broj čvorova	Broj kolizija	Broj transmisija	Ukupna potrošnja energije [J]
<b>1m</b>	5	2	307	0.286585728
	10	0	615	0.57410496
	15	0	877	0.818683008
	20	0	1210	1.12953984
<b>3m</b>	5	0	89	0.083081856
	10	0	198	0.184833792
	15	0	293	0.273516672
	20	0	403	0.376202112
<b>6m</b>	5	0	46	0.042941184
	10	0	104	0.097084416
	15	0	138	0.128823552
	20	2	206	0.192301824

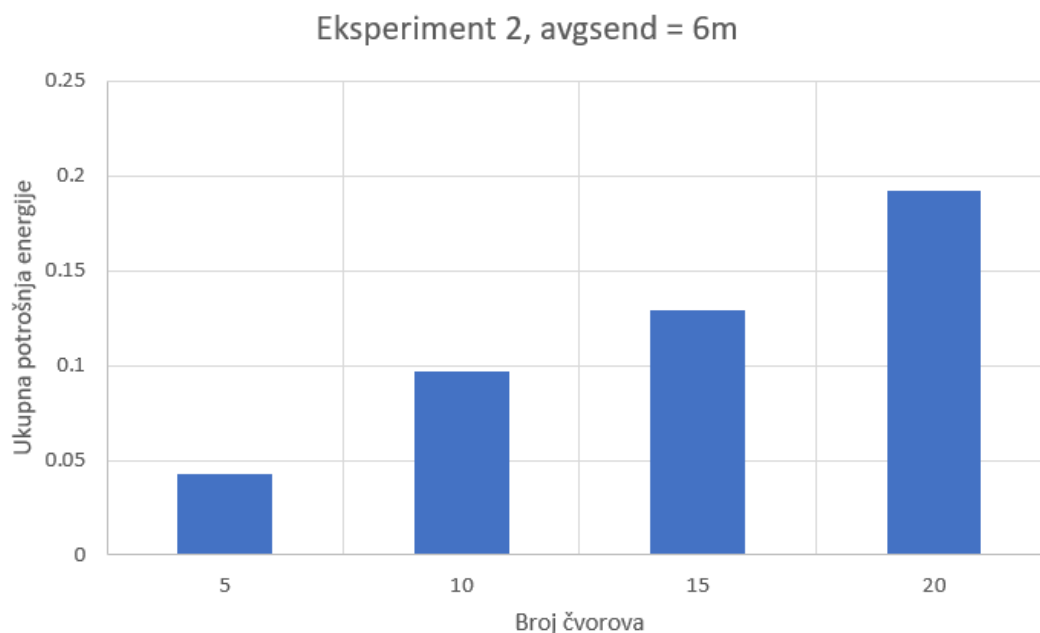
*Tablica 4.3. Prikaz podataka za eksperiment tipa „2“*



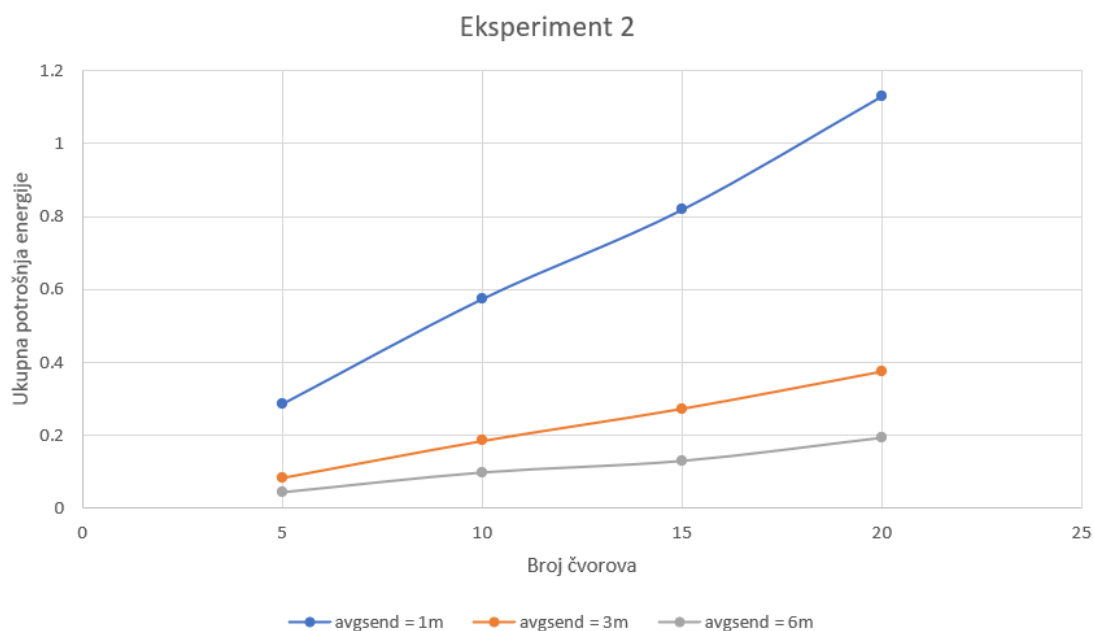
*Slika 4.9. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „2“, avgsend = 1m*



*Slika 4.10. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „2“, avgsend = 3m*



*Slika 4.11. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „2“, avgsend = 6m*



*Slika 4.12. Grafički prikaz podataka za eksperiment „2“*

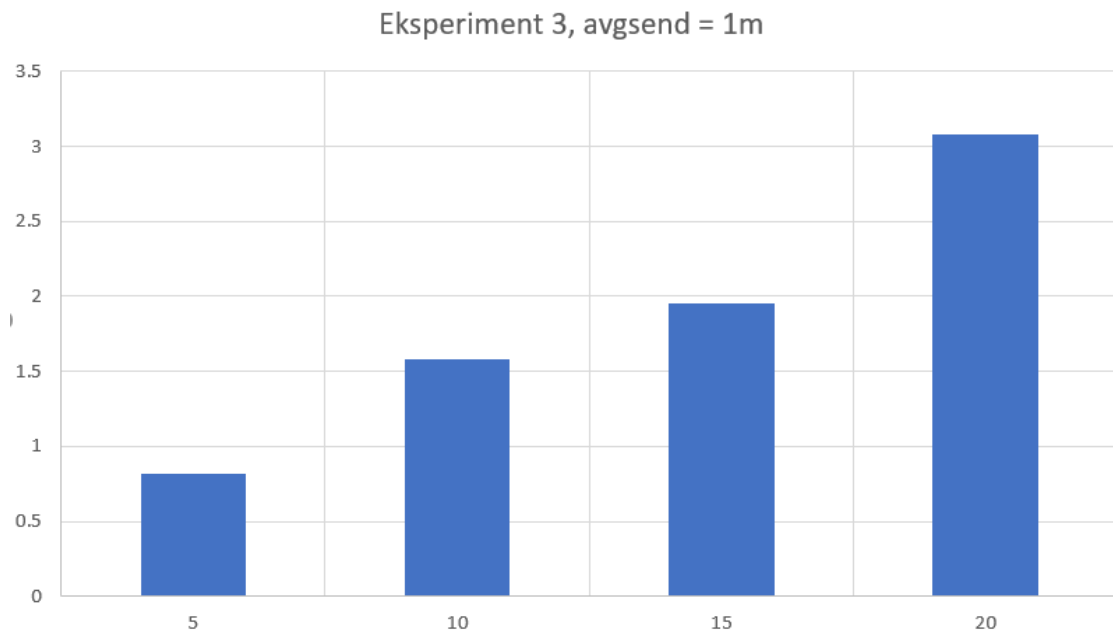
Iz grafičkih prikaza je vidljivo da potrošnja energije raste s porastom broja čvorova, kao i s porastom intervala slanja podataka. Potrošnja energije ima znatno manje vrijednosti nego u prethodnim eksperimentima budući da je SF = 6, što znači manju potrošnju energije.

#### Primjer 4.

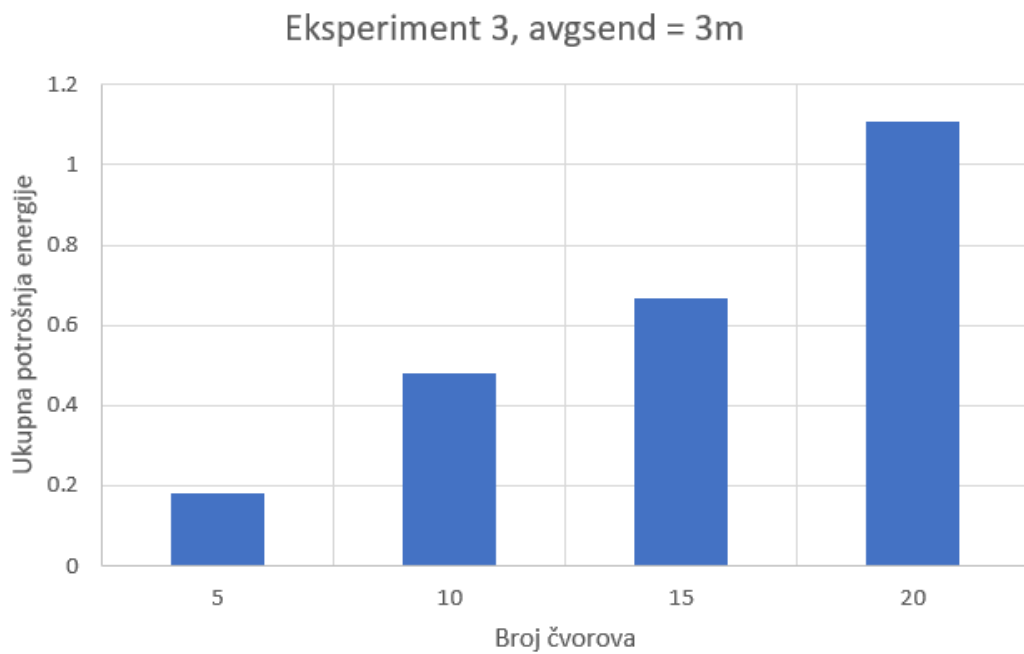
U tablici 4.4. su prikazani izlazni podaci kada je za tip eksperimenta odabran „3“. Postavke podrazumijevaju poboljšane postavke čvora ovisno o odaljenosti do *gatewaya*. Primjer korištene naredbe za pokretanje simulacije je *python loraDir.py 10 60000 3 3600000* gdje brojevi redom predstavljaju broj čvorova, vrijeme slanja, tip eksperimenta i ukupno vrijeme trajanja simulacije. Na slikama 4.13., 4.14., 4.15. i 4.16. se nalaze grafički prikazi potrošnje energije.

Interval slanja podataka	Broj čvorova	Broj kolizija	Broj transmisija	Ukupna potrošnja energije [J]
1m	5	0	299	0.818180352
	10	2	565	1.579336704
	15	4	867	1.950508032
	20	6	1232	3.079988736
3m	5	0	97	0.181099776
	10	0	215	0.480919296
	15	0	273	0.668718336
	20	0	418	1.107634176
6m	5	0	47	0.121389312
	10	0	96	0.226634496
	15	0	144	0.305547264
	20	0	184	0.389402112

*Tablica 4.4. Prikaz podataka za eksperiment tipa „3“*

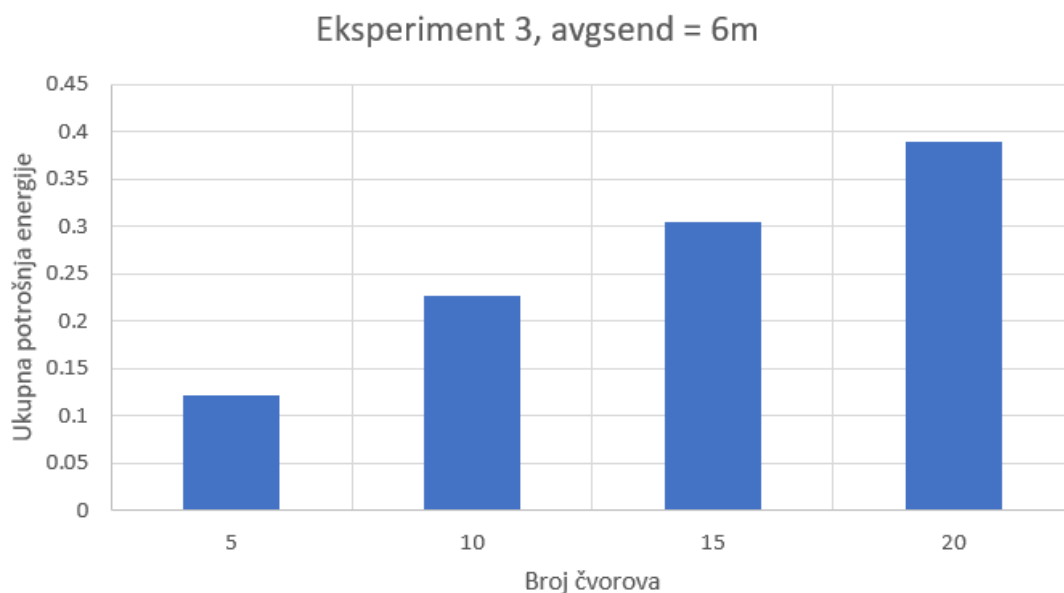


*Slika 4.13. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „3“, avgsend = 1m*

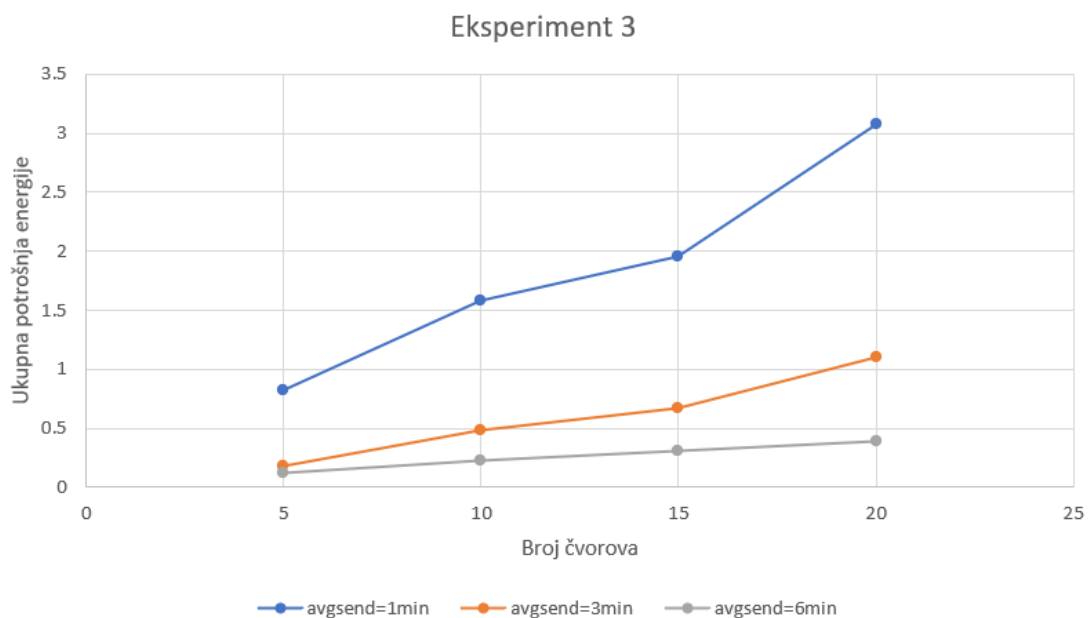


*Slika 4.14. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „3“, avgsend = 3m*





*Slika 4.15. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „3“, avgsend = 6m*



*Slika 4.16. Grafički prikaz podataka za eksperiment „3“*

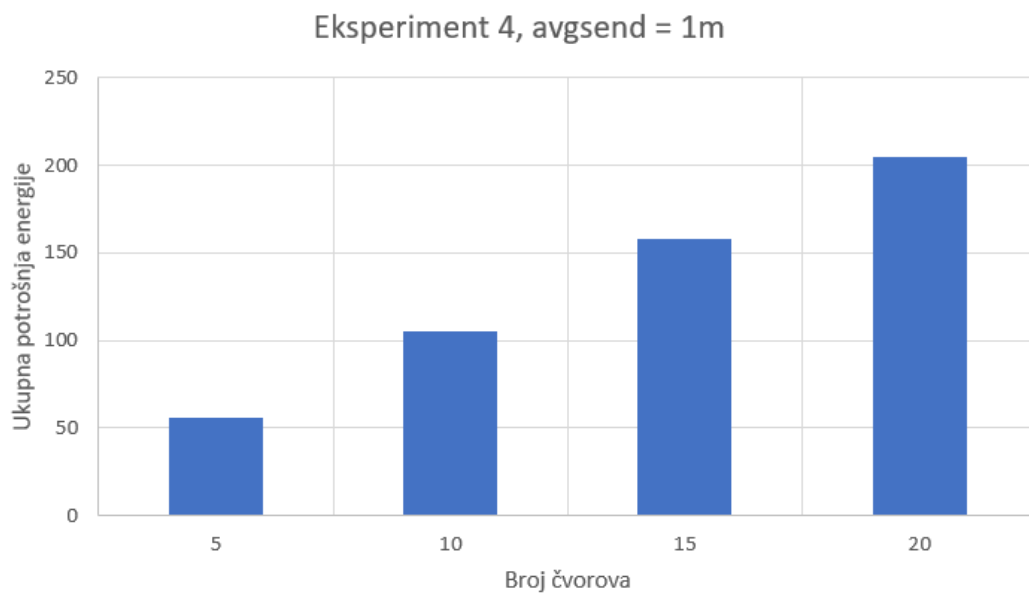
Iz grafičkih prikaza je vidljivo da potrošnja energije raste s porastom broja čvorova, kao i s porastom intervala slanja podataka. Kao i u prethodnom primjeru, ukupna potrošnja energije ima male vrijednosti s obzirom da je faktor proširenja postavljen na vrijednost 6.

### Primjer 5.

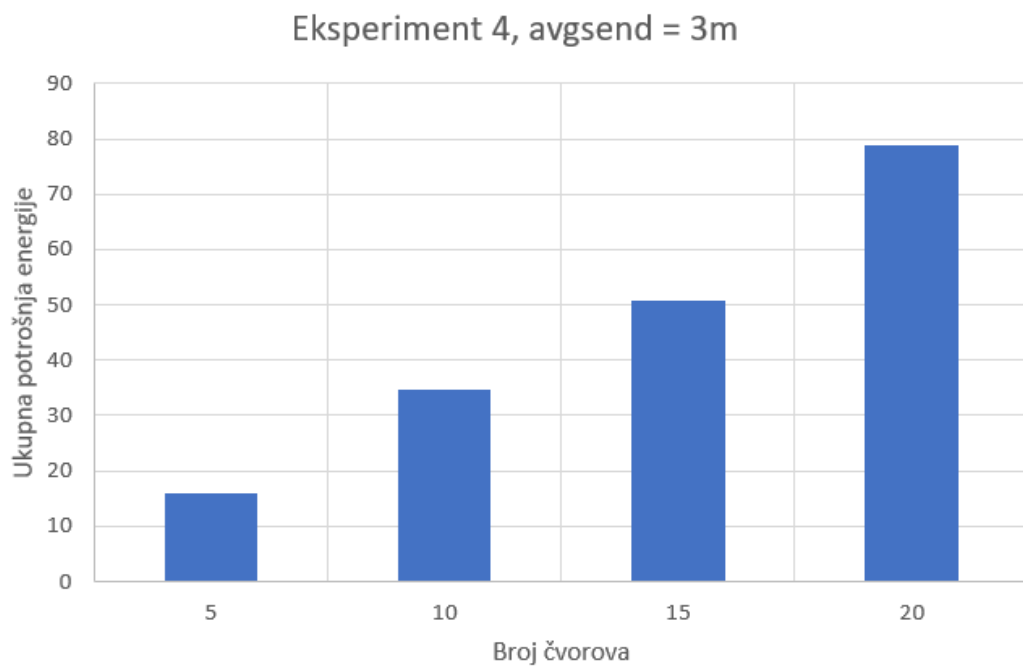
U tablici 4.5. su prikazani izlazni podaci kada je za tip eksperimenta odabran „4“, odnosno postavke simulacije su one koje su definirane za LoRaWAN. Primjer naredbe korištene za pokretanje simulacije je `python loraDir.py 20 180000 4 3600000` gdje „20“ predstavlja broj čvorova, „180000“ interval slanja, „4“ tip eksperimenta i „3600000“ ukupno vrijeme trajanja simulacije (1h). Na slikama 4.17., 4.18. i 4.19 se nalazi grafički prikaz potrošnje energije kada je vrijeme slanja jednako 1m, 3m i 6m. Slika 4.20. prikazuje usporedbu potrošnje energije za navedena vremena slanja.

Interval slanja podataka	Broj čvorova	Broj kolizija	Broj transmisija	Ukupna potrošnja energije [J]
<b>1m</b>	5	52	321	55.884939264
	10	194	604	105.154215936
	15	431	906	157.731323904
	20	676	1178	205.085540352
<b>3m</b>	5	6	91	15.842770944
	10	25	199	34.645180416
	15	60	291	50.662047744
	20	126	452	78.691565568
<b>6m</b>	5	0	44	7.660240896
	10	6	103	17.931927552
	15	16	159	27.681325056
	20	33	235	40.91265024

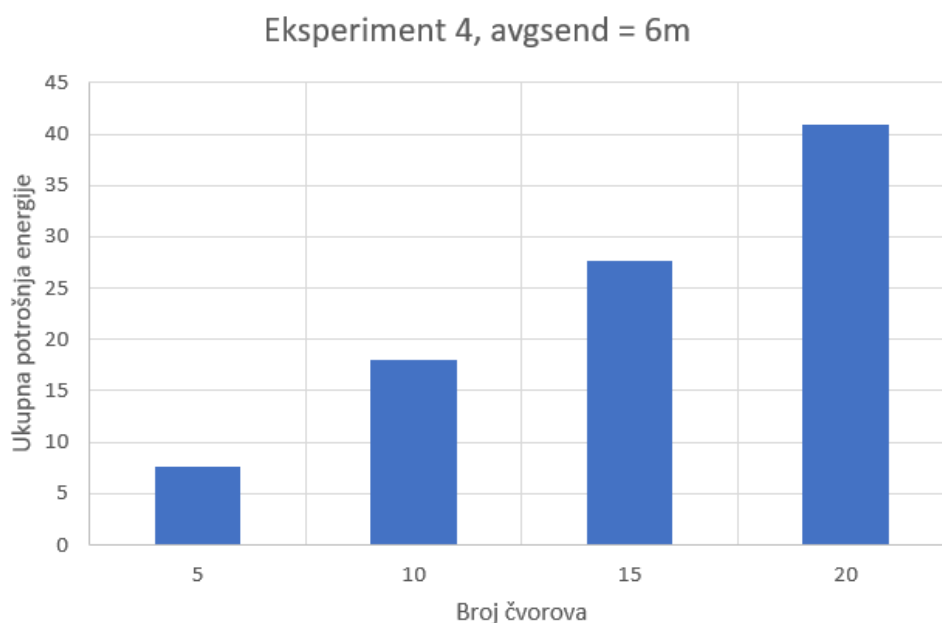
*Tablica 4.5. Prikaz podataka za eksperiment tipa „4“*



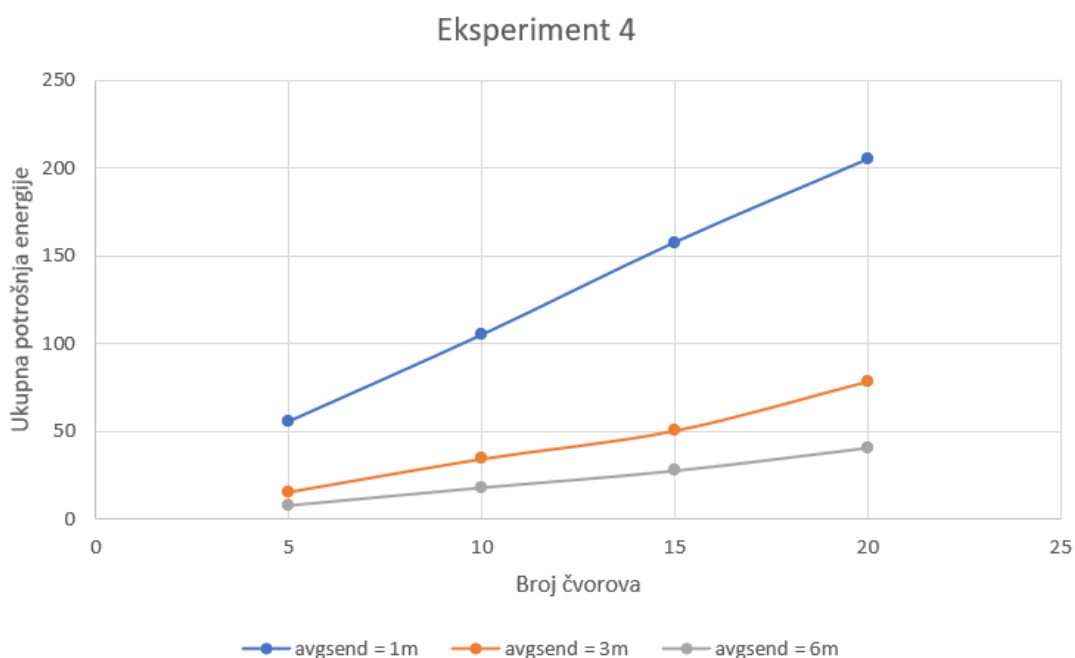
*Slika 4.17. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „4“, avgsend = 1m*



*Slika 4.18. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „4“, avgsend = 3m*



*Slika 4.19. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „4“, avgsend = 6m*



*Slika 4.20. Grafički prikaz podataka za eksperiment „4“*

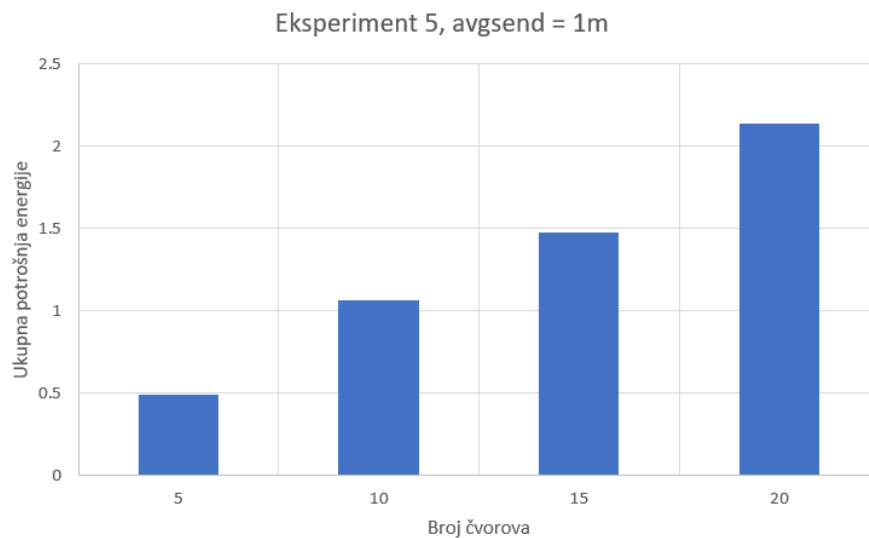
Iz tabličnih podataka i grafičkih prikaza je vidljivo da je potrošnja energije veća s povećanjem broja čvorova u mreži. Na primjer, za vrijeme slanja od 3m, potrošnja za 10 čvorova iznosi 34J, dok za isto vrijeme slanja potrošnja energije za 20 čvorova iznosi 78J. Također, povećanjem vremena slanja se smanjuje potrošnja energije i broj kolizija.

## Primjer 6.

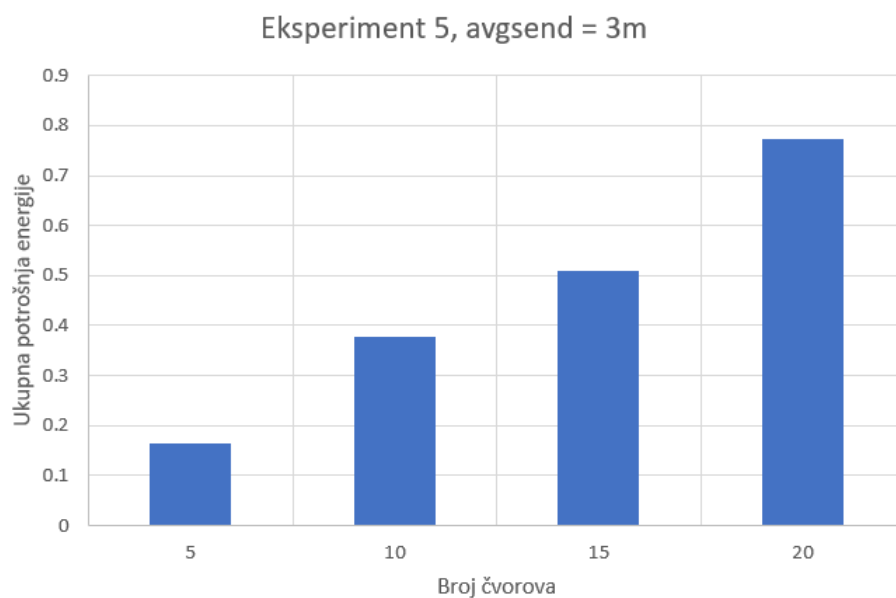
U tablici 4.6. su prikazani izlazni podaci kada je za tip eksperimenta odabran „5“, odnosno postavke simulacije su slične kao za eksperiment „3“, ali poboljšava prijenosnu snagu. Primjer naredbe za pokretanje simulacije je `python loraDir.py 5 360000 5 3600000` gdje brojevi redom označavaju broj čvorova, vrijeme slanja, tip eksperimenta, ukupno vrijeme trajanja simulacije. Na slikama 4.21., 4.22., 4.23. i 4.24. se nalaze grafički prikazi potrošnje energije.

Interval slanja podataka	Broj čvorova	Broj kolizija	Broj transmisija	Ukupna potrošnja energije [J]
1m	5	0	307	0.490216896
	10	0	610	1.062356928
	15	4	891	1.475272512
	20	8	1155	2.135828736
3m	5	0	102	0.165546816
	10	0	210	0.377513472
	15	0	301	0.508797696
	20	2	420	0.773361984
6m	5	0	52	0.085315968
	10	0	93	0.173184576
	15	0	132	0.20850432
	20	0	190	0.33049152

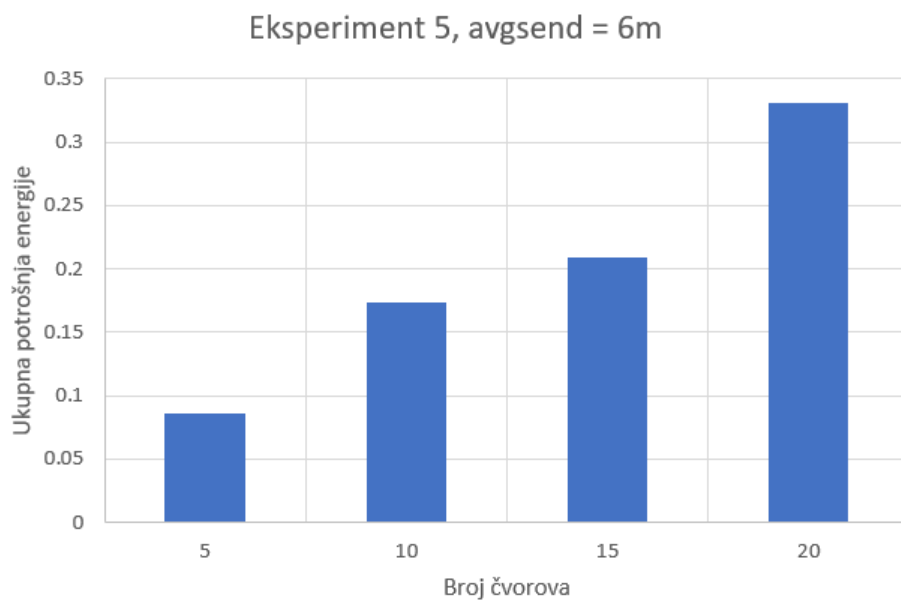
**Tablica 4.6.** Prikaz podataka za eksperiment tipa „5“



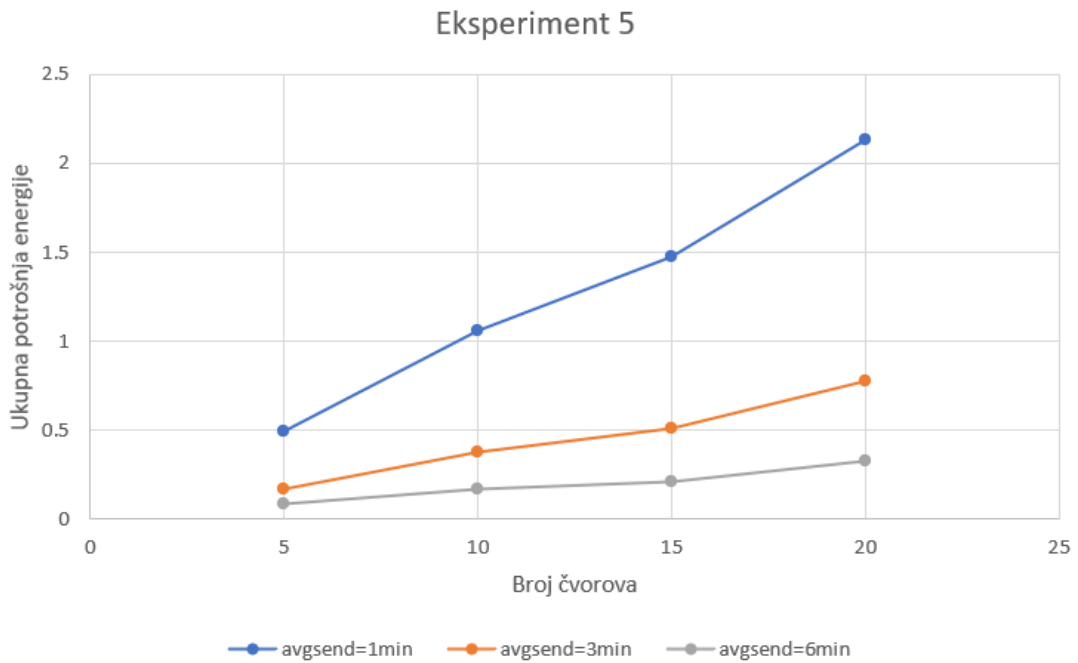
**Slika 4.21.** Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „5“, avgsend = 1m



*Slika 4.22. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „5“, avgsend = 3m*



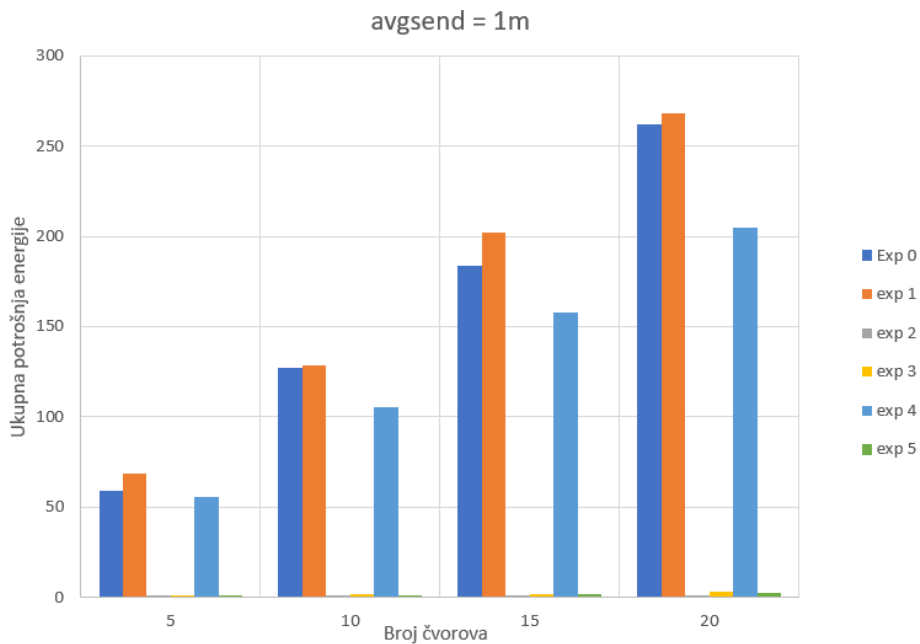
*Slika 4.23. Grafički prikaz potrošnje energije za eksperiment „5“, avgsend = 6m*



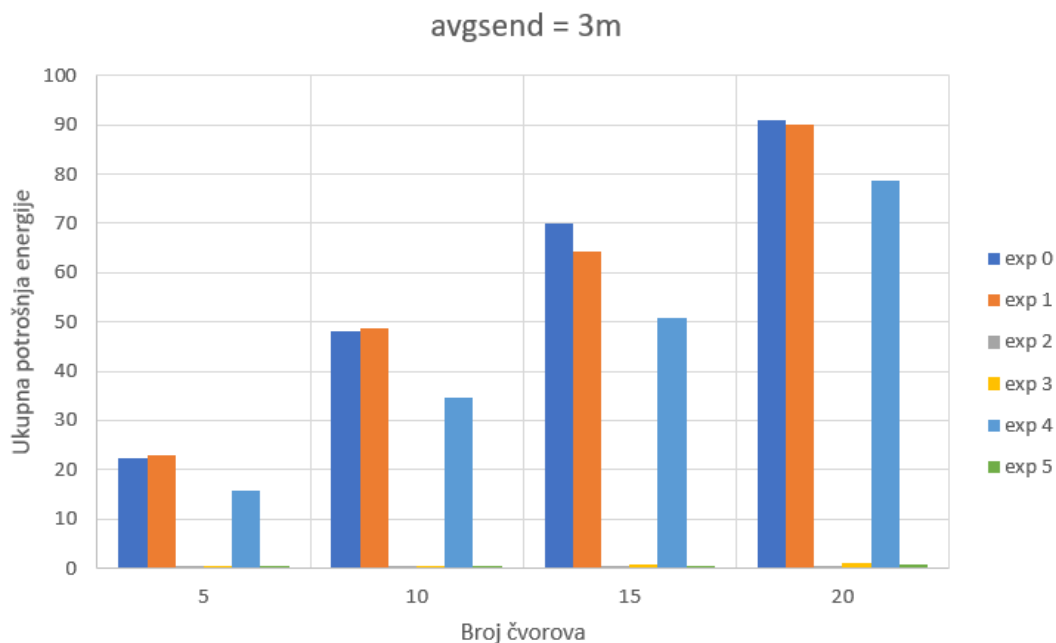
**Slika 4.24.** Grafički prikaz podataka za eksperiment „5“

Iz grafičkih prikaza je vidljivo da potrošnja energije raste s porastom broja čvorova, kao i s porastom intervala slanja podataka.

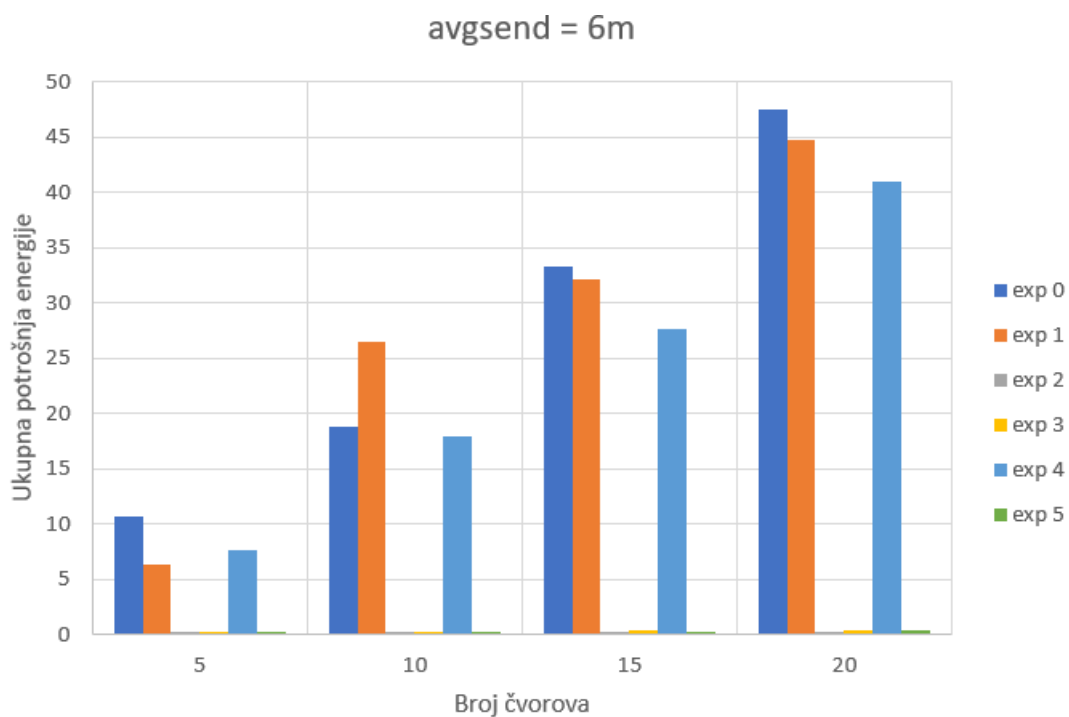
Na slikama 4.25., 4.26. i 2.57 je prikazana usporedba potrošnje energija s obzirom na postavke simulacije ovisno o intervalu slanja.



**Slika 4.25.** Grafički prikaz potrošnje energije za avgsend = 1m



*Slika 4.26. Grafički prikaz potrošnje energije za avgsend = 3m*



*Slika 4.27. Grafički prikaz potrošnje energije za avgsend = 6m*

Iz grafičkih prikaza se može zaključiti da potrošnja energije raste s povećanjem intervala slanja. Također, eksperimenti tipa 2, 3 i 5 imaju izuzetno malu potrošnju energije. Uspoređujući između eksperimenata 0, 1 i 4, vidljivo je da simulacije s postavkama LoRaWAN mreža imaju najmanju potrošnju energije.



## 4.2. Analiza podataka

Simulacije su rađene za šest različitih tipova eksperimenata. Za potrebe rada je vrijeme trajanja simulacije postavljeno na jedan sat. Za svaki tip eksperimenta je napravljena simulacija s 5, 10, 15 i 20 čvorova. Interval slanja podataka je za postavljen na 1m, 3m i 6m.

Iz rezultata dobivenih simulacijama se može zaključiti da ukupna potrošnja energije ovisi o broju čvorova te je ovisnost skoro pa linearna. Također, ovisno o intervalu slanja podataka, povećava se i potrošnja energije. Što je interval slanja manji, to je potrošnja energije veća budući da se više poruka pošalje u određenom periodu.

Eksperimenti tipa 2, 3 i 5 imaju izuzetno nisku potrošnju energije. Faktor proširenja za navedene tipove eksperimenata je postavljen na vrijednost 6, što znači manju potrošnju energije. Odnosno, što je faktor proširenja veći, veća je i potrošnja energije. Pojasna širina je postavljena na vrijednost 500 kHz što također znači manju potrošnju energije. Kodna brzina je postavljena na najveću vrijednost, odnosno 4/5 što znači da je manje vremena potrebno za prijenos podataka, a time je i manja potrošnja baterije.

Uspoređujući eksperimente tipa 0, 1 i 4, eksperimenti s postavkama LoRaWAN mreže imaju najmanju potrošnju. Sva tri navedena tipa eksperimenata imaju vrijednost faktora proširenja 12. Što je veći faktor proširenja, to je više vremena potrebno za slanje paketa, a samim time je i potrošnja baterije veća. U eksperimentima „0“ i „1“ kodna brzina je postavljena na vrijednost 4/8 (najmanja), dok je u eksperimentu s postavkama LoRaWAN mreže (eksperiment „4“) kodna brzina jednaka 4/5 (najveća). Manja kodna brzina podrazumijeva više vremena za prijenos paketa pa je i potrošnja veća. Budući da eksperiment „4“ ima veću kodnu brzinu, potrošnja je manja u odnosu na eksperimenta tipa „0“ i „1“.

U eksperimentima tipa 2, 3 i 5 je broj kolizija skoro uvijek jednak nuli, dok se u eksperimentima 0, 1 i 4 povećava s povećanjem transmisija. Odnosno, što je manji interval slanja, to je veći broj transmisija, pa samim time i kolizija.

## 5. ZAKLJUČAK

IoT (*Internet of Things*) podrazumijeva modernu komunikacijsku platformu koja primjenom različitih komunikacijskih tehnologija omogućava povezivanje i međusobnu interakciju različitih uređaja i sustava. Jedna od tehnologija koja se primjenjuje u IoT-u je LoRa, odnosno LoRaWAN. LoRa je bežična tehnologija koja služi za komunikaciju na velikim udaljenostima te je kao takva jedna od najraširenijih LPWAN tehnologija u svijetu.

Pomoću LoRaSim simulatora su provedeni eksperimenti te je praćena potrošnja energije ovisno o različitim postavkama mreže, broju čvorova te intervalu slanja podataka. Trajanje simulacije je postavljeno na jedan sat, dok su ostali parametri mijenjani. Iz rezultata se može zaključiti kako je potrošnja energije veće s porastom broja čvorova. Također, porastom intervala slanja poruka se povećava potrošnja energije.

Na osnovi eksperimenata se može zaključiti kako LoRa tehnologija ima optimiziraniju potrošnju energije u usporedbi s ostalim mogućim postavkama sustava.

## LITERATURA

- [1] A technical overview of LoRa and LoRaWAN, 2015, dostupno na: <https://loro-alliance.org/resource-hub/what-lorawanr>, pristupljeno: 16.9.2020.
- [2] LoRa, dostupno na: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/#modulation-types-and-chirp-spread-spectrum>, pristupljeno: 16.9.2020.
- [3] J.P.S. Sundaram, W. Du, Z. Thao, A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions, and Open Issues, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020
- [4] LoRaWAN Security, Full end-to-end encryption for IoT application providers, dostupno na: [https://loro-alliance.org/sites/default/files/2019-05/lorawan\\_security\\_whitepaper.pdf](https://loro-alliance.org/sites/default/files/2019-05/lorawan_security_whitepaper.pdf), pristupljeno: 17.8.2020.
- [5] R. Miller, LoRa Security: Building a Secure LoRa Solution, 2016, dostupno na: <https://labs.f-secure.com/assets/BlogFiles/mwri-LoRa-security-guide-1.2-2016-03-22.pdf>, pristupljeno: 17.8.2020.
- [6] About LoRaWAN, dostupno na: <https://loro-alliance.org/about-lorawan>, pristupljeno: 17.8.2020.
- [7] LoRaWAN Security, dostupno na: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/security.html>, pristupljeno: 18.8.2020.
- [8] Security in LoRaWAN Applications, dostupno na: <https://smartmakers.io/en/security-in-lorawan-applications/>, pristupljeno: 16.8.2020.
- [9] Nguyen, Tung.T.; Nguyen, Ha H.; Barton, Robert; Grossetete, Patrick; Efficient Design of Chirp Spread Spectrum Modulation for Low-Power Wide-Area Networks, IEEE Internet Of Things Journal, 2019, dostupno na: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8765617>, pristupljeno: 18.9.2020.
- [10] Chirp Spread Spectrum (CSS), dostupno na: [https://nanotron.com/EN/co\\_techn-css-php/](https://nanotron.com/EN/co_techn-css-php/), pristupljeno: 18.9.2020.
- [11] Khutsoane, Oratile; Isong, Basse; Abu-Mahfouz, Adnan M., IoT Devices and Applications based on LoRa/LoRaWAN, 2017.
- [12] Haxhibeqiri, Jetmir; De poorter, Eli; Moerman, Ingrid; Hoebeke, Jeroen; A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application; Sensors (Schwitzerland), 2018.
- [13] Petajajarvi, Juha; On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology, IEEE, 2015
- [14] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley; A Study of LoRa: Low Power & Long Range Networks for the Internet of Things, 2016
- [15] P. Neumann, J. Montavont, and T. Noel, Indoor deployment of lowpower wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study, IEEE, 2016

- [16] D. H. Kim, J. Y. Lim, and J. D. Kim, Low-Power, Long-Range, HighData Transmission Using Wi-Fi and LoRa, 2016
- [17] A. Dirk; A measurement-driven approach to understand urban greenhouse gas emissions in Nordic cities, 2016.
- [18] Tanumihardja, Wisena Aditya, Edy Gunawan; On the application of IoT: Monitoring of troughs water level using WSN, IEEE, 2015
- [19] Y. Yang, Design and Application of Intelligent Agriculture Service System With LoRa-based on Wireless Sensor Network, 2020
- [20] S. Escolar, F. Rincon, X. Del Toro, J. Barba, F. J. Villanueva, M. J. Santofimia, D. Villa, J. C. Lopez, The PLATINO Experience: A LoRa-based Network of Energy-Harvesting Devices for Smart Farming, 2019.
- [21] S. Gutierrez, I. Martinez, J. Varona, M. Cardona, R. Espinosa, Smart Mobile LoRa Agriculture System based on Internet of Things, IEEE, 2019.
- [22] M. Ji, J. Yoon, J. Choo, M. Jang, A. Smith, LoRa-based Visual Monitoring Scheme for Agriculture IoT, IEEE 2019
- [23] V. A. Vu, D. Cong Tring, T. C. Truvant, T. Dang Bui; Design of automatic irrigation system for greenhouse based on LoRa technology, 2018.
- [24] LoRa Networking Guide, Transmission mode, dostupno na: [https://development.libelium.com/lora\\_networking\\_guide/transmission-modes](https://development.libelium.com/lora_networking_guide/transmission-modes), pristupljeno: 20.9.2020.

## SAŽETAK

Internet stvari opisuje mrežu fizičkih objekata čija je svrha povezivanje i razmjena podataka putem interneta. IoT tehnologija može utjecati na svijet u kojem živimo poboljšavajući industriju, povezujući vozila i stvarajući pametne gradove. Međutim, veliki je izazov pokriti veliko područje koristeći IoT. Da bi se postigla pouzdana komunikacija, širokopojasne mreže male snage su dobro rješenje. Jedna od takvih tehnologija je upravo LoRa.

LoRaWAN nudi mogućnost razvoja privatnih mreža i jednostavnu integraciju s brojnim mrežnim platformama rasprostranjenim širom svijeta. S komunikacijskim dometom od preko deset kilometara i dugim životnim vijekom baterija, LoRa tehnologija omogućava aplikacije male snage za velike domete i niske potrošnje. Neke od primjena LoRa tehnologije su pametni grad, pametno zdravstvo, nadgledanje okoliša, pametan uzgoj. Upravo zbog velikog dometa komunikacije, LoRa tehnologija pronalazi brojne primjene u poljoprivredi.

Cilj ovog rada je utvrditi potrošnju energije u slučaju korištenja LoRa tehnologije. Provedeni su eksperimenti kojima je utvrđeno da LoRa ima optimiziraniju potrošnju u usporedbi s ostalim sustavima koji su testirani u radu.

**Ključne riječi:** LoRa, LoRaWAN, LPWAN, Internet stvari

## **ABSTRACT**

The Internet of Things describes a network of physical objects whose purpose is to connect and exchange data over the Internet. IoT technology can impact the world we live in by improving industry, connecting vehicles and creating smart cities. However, it is a great challenge to discover a large area using IoT. To achieve reliable communication, low-power broadband networks are a good solution. One such technology is precisely LoRa.

LoRaWAN offers the ability to develop private networks and easy integration with numerous network platforms spread around the world. With a communication range of over ten kilometers and a long battery life, LoRa technology enables many power applications for long ranges and low consumption. Some of the applications of LoRa technology are smart city, smart healthcare, environmental monitoring, smart farming. Precisely because of the great range of communication, LoRa technology has found numerous applications in agriculture.

The aim of this paper is to determine the energy consumption in the case of using LoRa technology. Experiments were conducted to determine that LoRa has optimized consumption compared to other systems tested in the work.

**Key words:** LoRa, LoRaWAN, LPWAN, IOT

## **ŽIVOTOPIS**

Veronika Viljušić je rođena 19.12.1996. u Mannheimu, Savezna Republika Njemačka. Pohađala je Osnovnu školu Orašje te nakon završene osnovne škole upisuje Opću gimnaziju u Orašju. Poslije srednje škole upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, te na drugoj godini upisuje smjer Komunikacije i informatika. Godine 2017. završava preddiplomski studij Elektrotehnike te upisuje diplomski studij smjer Mrežne tehnologije.