

# Optimalno usmjeravanje mobilnih čvorova u bežičnim senzorskim mrežama

---

**Leovac, Mateo**

**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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:339227>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-25**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Diplomski studij**

**OPTIMALNO USMJERAVANJE MOBILNIH ČVOROVA  
U BEŽIČNIM SENZORSKIM MREŽAMA**

**Diplomski rad**

**Mateo Leovac**

**Osijek, 2019.**

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada .....	2
2. BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE I TEHNOLOGIJE USMJERAVANJA MOBILNIH SENZORSKIH ČVOROVA.....	3
2.1. Bežične senzorske mreže.....	4
2.2. Usmjeravanje mobilnih čvorova u senzorskim mrežama .....	7
2.2.1. Zigbee mreže .....	7
2.2.2. WLAN mreže .....	11
3. OPTIMALNO USMJERAVANJE MOBILNIH SENZORSKIH ČVOROVA .....	13
3.1. Opis primjera simulacije .....	13
3.2. <i>CupCarbon</i> simulator.....	14
3.3. Usmjeravanje senzorskih čvorova na osnovu potrošnje energije i baterije .....	17
4. MODELIRANJE I SIMULACIJA BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE .....	19
4.1. Primjer jednostavne bežične senzorske mreže .....	19
4.2. Analiza modela bežične senzorske mreže .....	27
4.2.1. Prvi model bežične senzorske mreže .....	27
4.2.2. Drugi model bežične senzorske mreže.....	31
4.2.3. Treći model bežične senzorske mreže .....	33
5. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJE.....	37
6. ZAKLJUČAK.....	39
SAŽETAK.....	41
ABSTRACT .....	42
ŽIVOTOPIS.....	43
PRILOZI.....	44

## 1. UVOD

Općepoznata činjenica je da se prometni sustavi sve više okreću ka autonomnim vozilima, odnosno vozilima budućnosti. S obzirom da je stiglo vrijeme u kojem je tehnologija uznapredovala i s obzirom da su uz pomoć novih tehnologija mnoge situacije u prometu olakšane, logičan je zaključak zašto je došlo do toga da se komunikacijski sustavi i procesi počinju prilagođavati autonomnim vozilima. Na prvi pogled sav taj proces prelaska na korištenje autonomnih vozila se čini jako jednostavan, međutim iza toga stoji iznimno velika količina komunikacijskih procesa koji moraju osigurati apsolutnu sigurnost putnika unutar tih vozila.

Jedan od najvažnijih sustava su svakako i senzorski sustavi, odnosno bežične senzorske mreže. Bežične senzorske mreže predstavljaju skup senzorskih čvorova koji služi za prikupljanje najvažnijih podataka vezanih za trenutno stanje na određenoj ruti kojom vozilo može proći. Također, senzori koji se koriste omogućuju međusobnu komunikaciju između senzora, kao i između senzora i određenih baznih postaja koje su u komunikaciji sa svakim pojedinim vozilom. Na osnovu senzorskog sustava svako autonomno vozilo ima u svakom trenutku najvažnije podatke (o vremenskim uvjetima, radovima na cesti, prometnim nesrećama i dr.) o stanju na ruti kojom se kreće te na vrijeme dobija obavijesti ukoliko je potrebno mijenjati planirani smjer kretanja.

Da bi senzorski sustavi dobro funkcionirali, jedna od najvažnih karakteristika je optimalan raspored senzorskih čvorova. Optimalan raspored senzorskih čvorova doprinosi pravovremenim reakcijama sustava u svrhu slanja važnih podataka i obavijesti, kao i većoj efikasnosti sustava koji određuje pojedinu rutu. Postoje različiti načini razmještaja senzorskih čvorova, koji ponajviše ovise o tome na osnovu čega se definiraju, tj. da li je najvažnija komponenta potrošnja energije pojedinog vozila, potrošnja baterije ili je najvažnija komponenta brzina, odnosno što kraće vrijeme potrebno za prelazak određene rute. Ove navedene komponente su neke od mnogih koje se mogu primijeniti prilikom optimalnog razmještaja senzorskih čvorova.

U ovom diplomskom radu će se analizirati mogući primjeri razmještaja senzorskih čvorova na osnovu potrošnje ukupne energije i potrošnje baterije senzorskih čvorova. Nastojat će se na što

jednostavniji mogući način prikazati funkcionalnost i efikasnost optimalnog razmještaja senzorskih čvorova i sve će biti potkrijepljeno simulacijom unutar programskog alata *CupCarbon*.

## **1.1. Zadatak diplomskog rada**

Zadatak rada predstavlja opis te analizu rješenja za optimalno usmjeravanje senzorskih čvorova unutar razmatranih scenarija bežičnih senzorskih mreža. Optimalno usmjeravanje, odnosno razmještanje senzorskih čvorova temeljeno na ukupnoj potrošnji energije, kao i potrošnji baterije pojedinih čvorova, omogućuje odabir rute najefikasnije za određeni mobilni čvor. Sva implementirana rješenja, kao i analiza rezultata provedena je unutar programskog alata *CupCarbon* uz pomoć kojeg su prikazani grafovi potrošnje energije unutar odabranog vremena trajanja simulacije. Na osnovu usporedbe različitih rješenja definirani su načini rasporeda senzorskih čvorova najefikasniji u pojedinim razmatranim scenarijima.

## 2. BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE I TEHNOLOGIJE USMJERAVANJA MOBILNIH SENZORSKIH ČVOROVA

Bežična mreža predstavlja komunikacijski sustav koji koristi bežični medij za razmjenu podataka. Bežična mreža ima funkciju slanja i primanja podataka zračnim putem minimizirajući potrebu korištenja žičnih veza. Bez obzira što se na prvi pogled nameće zaključak kako bežične mreže imaju funkciju da zamijene žičnu konekciju, to nije tako. Bežične mreže se koriste kao proširenje mogućih načina komunikacije između određenih točaka. Bežične mreže kao takve imaju niz prednosti u odnosu na žične, a neke od njih su:

- mobilnost - omogućuje se korištenje mreže unutar područja dosega signala bez prekida; također, korisnicima je omogućen pristup informacijama u realnom vremenu, kao i veća produktivnost;
- brza i jednostavna instalacija - za razliku od žičnih mreža, implementacija bežičnih je jednostavnija;
- veći doseg mreže - omogućena je veća dostupnost mreže i u područjima koja su fizički teško dostupna za instalaciju žičnih mreža;
- veća fleksibilnost- osiguravaju veću fleksibilnost i veći broj mogućnosti, kao i bolju prilagodbu prilikom kvara mreže;
- smanjenje troškova - troškovi održavanja mreže su manji u odnosu na žične mreže.

Dva primjera bežičnih mreža su:

- *ad-hoc* mobilne mreže
- bežične senzorske mreže.

S obzirom da je u ovom radu naglasak na bežičim senzorskim mrežama, *ad-hoc* mobilne mreže će biti samo kratko definirane, dok će senzorske mreže biti opisane detaljnije za lakše razumijevanje ostatka rada.

Mobilna *ad-hoc* mreža je skup bežičnih mobilnih čvorova koji međusobno komuniciraju bez mrežne infrastrukture ili centraliziranog upravljanja. U ovim mrežama čvorovi se konstantno kreću i predstavljaju teret mreži i zbog toga je u ovim mrežama teže odabrati protokol usmjeravanja nego u žičnim mrežama [1].

## 2.1. Bežične senzorske mreže

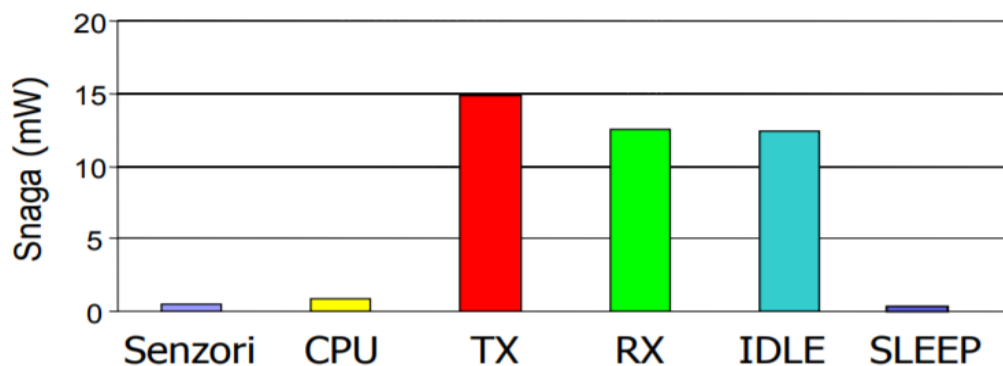
Bežične senzorske mreže se sastoje od jako malih, multifunkcionalnih senzorskih čvorova male potrošnje energije. Neke od glavnih karakteristika bežičnih senzorskih mreža su:

- veliki broj čvorova
- komunikacija temeljena na slanju zahtjeva i odgovora
- nesimetričan tok informacija
- ograničena količina energije čvorova
- mali troškovi po čvoru
- sklonost kvarovima
- ograničena sigurnost.

Svaka bežična senzorska mreža se sastoji od velikog broja čvorova koji komuniciraju međusobno na osnovu unaprijed određenih pravila. Neki od čvorova predstavljaju izvor podataka dok drugi imaju funkciju usmjeravanja informacija. Svaki od čvorova ima ograničenu količinu energije, što je jedan od uvjeta koji se uzima u obzir prilikom odabira algoritma usmjeravanja informacija. Također, komunikacija između čvorova se zasniva i na praćenju određenih događaja unutar mreže. Ova vrsta bežičnih mreža je sklona kvarovima, ali je također vrlo prilagodljiva, odnosno vrlo lako se nađe drugi optimalni put kojim informacija može stići od točke A do točke B [2].

Kao što je već navedeno, svaki senzorski čvor ima ograničenu količinu energije, a ta energija se najviše troši na:

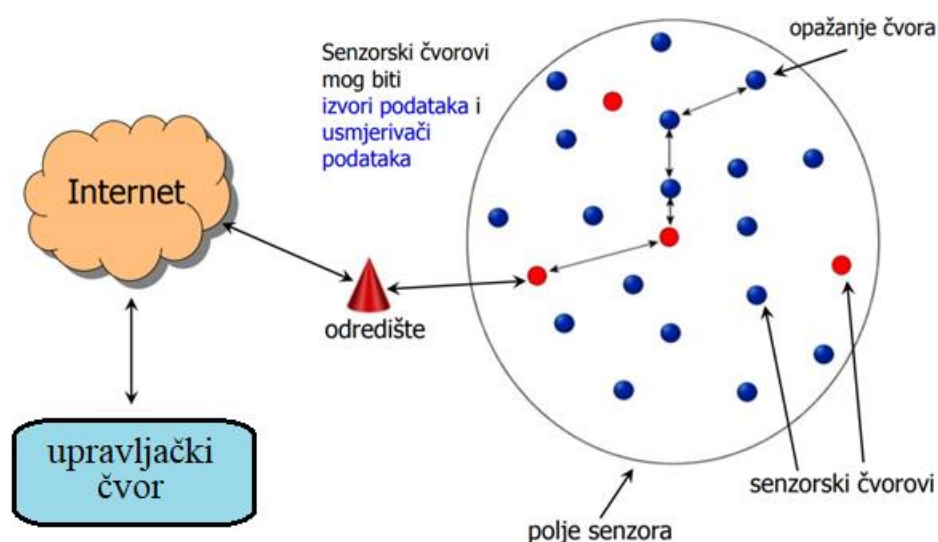
- opažanje
- obradu podataka
- komunikaciju.



**Slika 2.1 Prikaz utroška energije pojedinog senzorskog čvora [2]**

Kao što je vidljivo iz grafa sa slike 2.1, najveća potrošnja energije čvora odlazi na komunikaciju čvora, a svi ostali parametri oduzimaju zanemarivo malo energije. Također, važno je znati kako se energija čvora ne može nadopuniti niti obnoviti. Veliki broj čvorova unutar senzorske mreže omogućava bezbroj mogućnosti komunikacije između izvorišta i odredišta, kao i veliki broj alternativnih puteva informacija prilikom određenog kvara mreže ili čvora.





**Slika 2.2 Prikaz arhitekture bežične senzorske mreže [2]**

Kao što je prikazano na slici 2.2, svaka bežična senzorska mreža, osim što posjeduje polje senzorskih čvorova, njima omogućuje pristup internetu, odnosno prijenos informacija i do upravljačkog čvora, odnosno čvora koji predstavlja krajnjeg korisnika.

Primjena bežičnih senzorskih mreža je široka, ali neka od glavnih područja primjene su:

- primjena u vojsci na bojištima prilikom detekcije i praćenja ljudi i vozila,
- nadziranje klimatskih promjena,
- nadziranje broja auta na autocestama,
- „pametne ceste“.

Ova zadnja primjena bežičnih senzorskih mreža je i najvažnija za primjenu u području vožnje autonomnih vozila. „Pametne ceste“ predstavljaju sustav bežične senzorske mreže u kojoj su senzorski čvorovi postavljeni na točno određena najvažnija područja na cesti kako bi se mogli detektirati najvažniji faktori kao što su gužve na cestama, brzina kretanje vozila, semafori, radovi na cesti, vremenski uvjeti i mnogi drugi. Svi ovi podaci su jako važni te se oni uz pomoć senzorske mreže šalju u baznu postaju koja to obrađuje i prosljeđuje autonomnom vozilu te se ono na osnovu danih podataka kreće točno određenom rutom.

Da bi to sve funkcioniralo besprijekorno veliku ulogu u senzorskim mrežama imaju algoritmi za usmjeravanje informacija u bežičnim senzorskim mrežama kao i optimalno usmjeravanje mobilnih senzorskih čvorova unutar mreže, što će detaljnije biti opisano i analizirano u daljnjem tekstu.

## **2.2. Usmjeravanje mobilnih čvorova u senzorskim mrežama**

Metode usmjeravanja mobilnih senzorskih čvorova uvelike ovise o tehnologiji bežičnog prijenosa koja se koristi. Svaka od tehnologija bežičnog prijenosa posjeduje određene prednosti i nedostatke te se na osnovu toga definiraju pojedini algoritmi usmjeravanja mobilnih senzorskih čvorova. Neke od tehnologija bežičnog prijenosa su pogodne zbog svog velikog opsega pokrivanja područja signalom i zbog brzine prijenosa informacija, ali troše puno energije (kao npr. Wi-Fi), dok neke druge imaju puno manju brzinu prijenosa i doseg, ali su pogodnije zbog manje potrošnje energije (kao npr. Zigbee), što je ponekad iznimno bitno u bežičnim senzorskim mrežama s obzirom da čvorovi posjeduju ograničenu količinu energije [3].

### **2.2.1. Zigbee mreže**

Bežične senzorske mreže, kao što je već spomenuto, predstavljaju mreže budućnosti odnosno omogućuju komunikaciju između okoline i samog krajnjeg korisnika. Jednostavne su za instalaciju i zato se sve više primijenjuju u svakodnevnim aktivnostima. Predstavljajući određeno sučelje između korisnika i okoline one mogu služiti za prikupljanje određenih podataka sa različitih senzora. Prikupljanje tih informacija te distribucija istih do korisnika zahtijeva korištenje određenih protokola usmjeravanja podataka i senzorskih čvorova. Jedan od najpoznatijih i najviše korištenih protokola usmjeravanja u bežičnim senzorskim mrežama je i Zigbee temeljen na IEEE 802.15.4 standardu. On je namijenjen uglavnom mrežama koje se sastoje od jako velikog broja čvorova unutar bežičnih senzorskih mreža koje ne razmjenjuju veliku količinu podataka. Zigbee se koristi u WPAN (*Wireless Personal Area Network*) mrežama kratkog dometa, male propusnosti te male potrošnje energije. Zigbee mreža se sastoji od jako puno senzorskih čvorova smještenih na jako maloj međusobnoj udaljenosti (do 10 m), tvoreći tako cjelokupno senzorsko polje. Sam naziv Zigbee dolazi od načina na koji lete pčele među cvjetovima (zig-zag) tvoreći tako topologiju petlje [4].

Najbitnija primjena Zigbee mreža je zapravo u aplikacijama koje služe za nadzor određenih sustava, kao i za upravljanje istim. Također, Zigbee mreže su mreže koje osiguravaju korištenje velikog broja uređaja, malu potrošnju energije, prijenos manje količine podataka, jednostavnost implementacije, manje brzine (do 256 kb/s) te korištenje nelicenciranog frekvencijskog spektra, odnosno upotrebu slobodnih frekvecijskih spektara. Također, Zigbee mreže osiguravaju veliku pouzdanost i sigurnost prijenosa podataka te vrlo brz i efikasan oporavak od kvara mreže [5].

Zigbee mreža ima tri vrlo važne karakteristike koje je izdvajaju od ostalih bežičnih senzorskih mreža, a to su samo-organiziranost, samo-izlječivost i sigurnost potkrijepljenu odgovarajućim mehanizmima.

Samo-organiziranost ove mreže se temelji na tome da prilikom ulaska novog čvora u mrežu, ostali postojeći čvorovi posjeduju mogućnost detekcije istog te se mreža nakon toga samostalno reorganizira, uključujući i novi čvor unutar postojeće strukture.

Samo-izlječivost mreže podrazumijeva mogućnosti postojećih čvorova unutar mreže da detektiraju određeni kvar u komunikaciji, bio to kvar u međusobnoj komunikaciji čvorova ili komunikaciji prema van. Nakon detekcije, popravak se vrši automatski bez potrebe za ljudskom intervencijom.

Sigurnost unutar Zigbee mreže je osigurana uz pomoć određenih ugrađenih mehanizama poput AES (*Advanced Encryption Standard*) standarda.

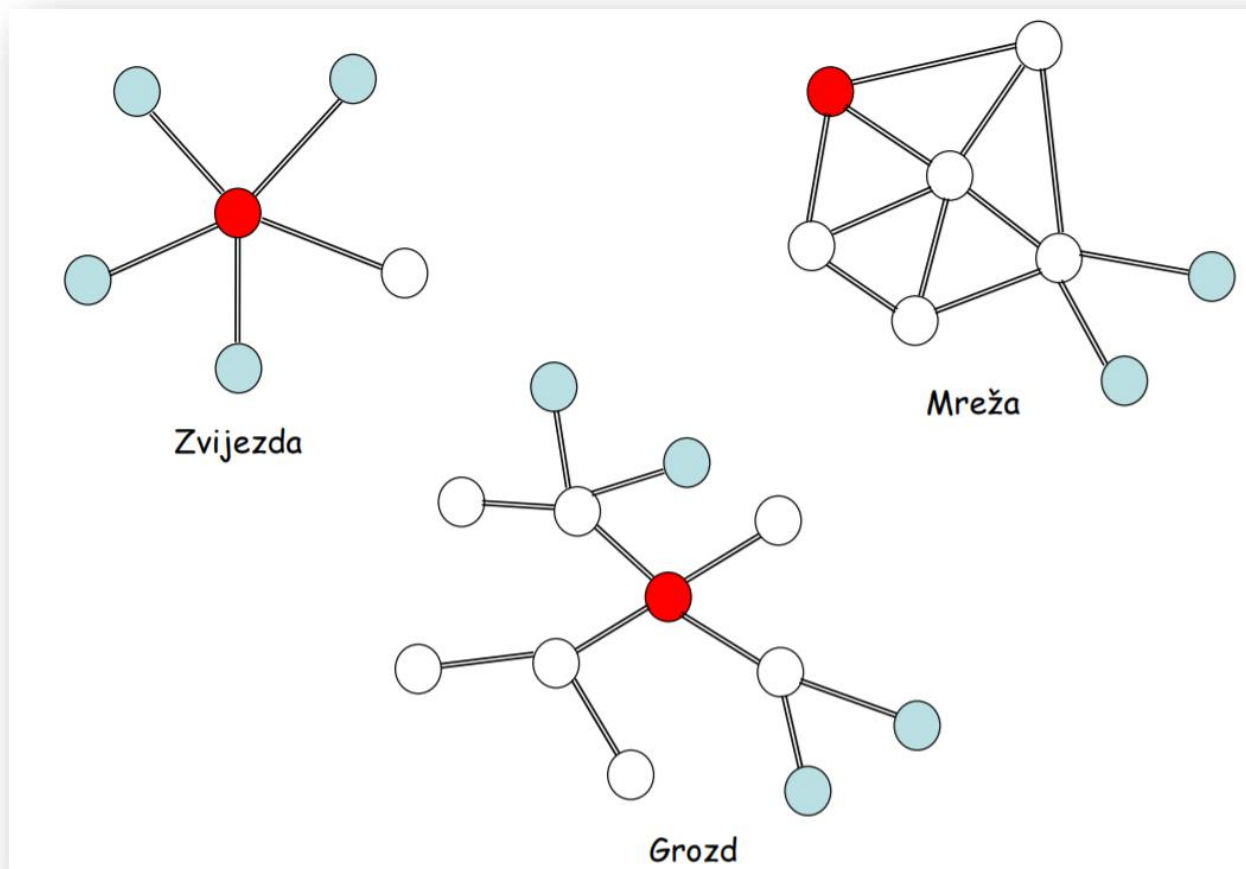
Protokolni stog se sastoji od tri glavna sloja: fizičkog, Zigbee stoga te aplikacijskog sloja. Fizički sloj podrazumijeva sloj na kojem se vrši osnovno adresiranje, kao i kontrola odašiljanja, a definiran je IEEE 802.15.4 standardom. Zigbee stog je sloj na kojem se vrši umrežavanje, tj. funkcionira na sličan način kao mrežni sloj. Na tom sloju se definiraju razne mrežne topologije, vrši se šifriranje podataka, provjerava se autentičnost korisnika, vrši se zaštita podataka i slično. Aplikacijski sloj je sloj na kojem se izvršavaju određene korisničke funkcije i usluge, dodjeljuju aplikacije čvorovima kako bi odredili njihovu funkciju i zadatak unutar mreže. Jedan čvor može sadržavati više aplikacija ovisno o tome u kojim procesima sudjeluje.

IEEE 802.15.4 standard koji definira fizički sloj definira i MAC (*Medium Access Control*). Fizički sloj se još sastoji od dva manja podsloja koja su karakteristična za Zigbee mreže. Jedan od tih podslojeva radi na 868 MHz i to je frekvencija koja se najčešće koristi u Europi, dok drugi sloj radi na 915 MHz i to je frekvencija koja je karakteristična za Ameriku. MAC sloj kojeg također definira IEEE 802.15.4 standard je sloj koji služi za kontrolu pristupa radio kanalu uz pomoć CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance*) mehanizma. MAC sloj osigurava pouzdanost prijenosa podataka [3].

Zigbee stog, odnosno mrežni sloj, služi za formiranje mrežnih topologija, za pravilno adresiranje podataka, za usmjeravanje podataka, za konfiguraciju uređaja, za kontrolu čvorova, za korištenje točno određenih potrebnih čvorova, tj. za njihovo paljenje i gašenje te određivanje najboljeg puta za paket.

Svaka Zigbee mreža koja se koristi neovisno o njoj odabranoj topologiji mora imati jedan glavni čvor preko kojeg se odvija sav promet u mreži. Taj čvor je zadužen za kontrolu ispravnosti podataka, za isporuku podataka na vrijeme, za kontrolu isporuke, za dodjeljivanje mrežnih adresa svakom od uređaja te za komunikaciju s krajnjim korisnikom.

Zigbee mreža koristi 64-bitno IEEE i 16-bitno kratko adresiranje koje omogućuje stvaranje senzorske mreže od preko 65 000 čvorova u mreži. Mrežni sloj Zigbee mreža na osnovu toga mora podržavati određene topologije rasporeda tih čvorova, a podržava zvijezdastu, grozdastu i mješovitu.



**Slika 2.3 Mrežne topologije koje podržava Zigbee mreža[2]**

Zvijezdasta topologija je vrsta topologije mreže koja se sastoji od jednog glavnog čvora odnosno uređaja koji kontrolira sve unutar te mreže. Svi ostali uređaji su krajnji uređaji i ovise o glavnom. Također, sva komunikacija između uređaja odvija se preko glavnog, odnosno centralnog uređaja.

Grozdasta (engl. *cluster tree*) topologija je vrsta mrežne topologije u kojoj također postoji jedan glavni čvor ili uređaj (koordinator) i ostali čvorovi koji mogu imati još tzv. listova ispod sebe, odnosno čvorova koji su po prioritetu ispod tih glavnih čvorova. Svaki od tih listova odgovara čvoru iznad sebe, a taj čvor opet odgovara glavnom čvoru cijele mreže, odnosno koordinatoru. Glavni čvor mreže ima istu funkciju kao i kod zvijezdaste topologije, odnosno sav promet unutar mreže se odvija preko njega. Ostali čvorovi unutar mreže se mogu podijeliti u dvije skupine: FFD i RFD čvorove. FFD (*Full Function Device*) čvorovi podrazumijevaju potpuno funkcionalne čvorove koji imaju mogućnost da budu i glavni čvor (koordinator) i da budu podređeni čvor.

RFD (*Reduced Function Device*) čvorovi su čvorovi sa ograničenim mogućnostima, odnosno sa mogućnošću da samo komuniciraju sa FFD čvorovima i ne mogu predstavljati glavni čvor mreže.

Mješovita (engl. *mesh*) topologija je topologija mreže koja predstavlja sigurnu i kompatibilnu mrežu. Ova topologija podsjeća na topologiju stabla i kao takva osigurava vrlo kvalitetnu povezanost i komunikaciju unutar same mreže. Ovakav tip povezanosti mreža unutar jedne topologije osigurava međusobnu komunikaciju svih uređaja koji su u dometu te veliku otpornost na smetnje. Jedini nedostatak ovoj topologiji je što zahtijeva više memorije nego ostale topologije. Također, glavna odlika ove mreže je u tome što omogućava povezivanje čvorova različitim putanjama, čime se osigurava velika efikasnost dostave informacija, kao i velika robusnost. Standardizacijom koja je uvedena u ovu topologiju omogućava se korištenje komponenata različitih proizvođača, pri čemu ne dolazi do problema u komunikaciji prilikom praktične implementacije [4].

### 2.2.2. WLAN mreže

WLAN (*Wireless Local Area Network*) mreže predstavljaju bežične mreže koje se temelje na IEEE 802.11 standardu, koji se sastoji se od više podstandarda, npr. IEEE 802.11.a, IEEE 802.11.b te IEEE 802.11.c i drugih. Ova vrsta bežične komunikacije temelji se na topologiji u kojoj je svaki uređaj spojen na određenu pristupnu točku (engl. *Access Point*). Kao što je već navedeno, WLAN je tehnologija prijenosa informacija koja osigurava velike brzine i veći opseg područja pokrivanja, ali uz puno veću potrošnju resursa i energije. S obzirom na te karakteristike, u prijenosu se koristi u slučajevima kada potrošnja energije nije važan parametar. Uređaji koji se nalaze unutar WLAN mreže međusobno komuniciraju preko TCP/IP protokola. Također, pri ostvarivanju WLAN prijenosa tehnike prijenosa koje su se smatrale najboljima su:

- infracrvene zrake,
- uskopojasni frekventni kanal,
- tehnika raširenog spektra.

Infracrvene zrake predstavljaju tehnologiju prijenosa koja se koristila od samog začetka bežičnog prijenosa. Temelji se na signalu infracrvene zrake male snage. S obzirom da ova tehnologija

prijenosa zahtijeva direktnu vidljivost između predajnika i prijemnika vrlo brzo se odustalo od ove tehnologije u WLAN prijenosu.

Kod tehnologije prijenosa uskopojasnim frekventnim kanalom interferencija je predstavljala najveći problem jer se često javljala kod klasičnih radio signala na frekvenciji od 2.4 GHz. Da bi se izbjegla ta interferencija predajnici bi morali imati jako malu snagu, a time i jako mali domet što nije bila ideja WLAN mreža te je ta ideja također jako brzo propala.

Ideja koja je zaživela, koja je uspješna i koja se koristi i dan danas u tehnologiji prijenosa WLAN mreža je tehnika raspršenog spektra. Ova tehnika ispunjava sve potrebne preduvjete WLAN mreže, odnosno zadovoljava pouzdan i brz prijenos informacija i u prisustvu interferencije. Ova tehnika je bazirana na „širenju“, odnosno prilagodbi uskopojasnog signala na spektar prijenosnog kanala čime prijemnik dobija puno jači signal i signal koji se puno lakše detektira. To u isto vrijeme ne pravi probleme za druge prijemnike jer frekvenciju kojom se šalje signal poznaju samo taj predajnik i prijemnik dok drugi prijemnici to detektiraju kao šum.

### 3. OPTIMALNO USMJERAVANJE MOBILNIH SENZORSKIH ČVOROVA

#### 3.1. Opis primjera simulacije

Kao zadatak ovog diplomskog rada je definirana analiza optimalnog rasporeda čvorova u bežičnim senzorskim mrežama. Uz terijski opis mogućih rješenja, glavni dio rada se odnosi na simulaciju samostalnih ideja i rješenja unutar programskog alata *CupCarbon*. Rješenja koja budu simulirana i implementirana u daljnjem dijelu rada bit će odabrana na osnovu analize određenih parametara, a to su potrošnja ukupne energije mobilne stanice i senzora, te potrošnja baterije pojedinih mrežnih uređaja.

Jedan od konkretnih primjera simulacije unutar programskog alata *CupCarbon* sastoji se od pokretne stanice, odnosno mobilne stanice, senzora te odabrane rute kojom će ta mobilna stanica prolaziti.

Prije početka simulacije potrebno je odabrati rutu kojom će se mobilna stanica kretati. Takva ruta će biti odabrana proizvoljno. Zatim se na toj kompletnoj ruti postavljaju senzori na određena mjesta na kojima će prikupljati podaci prilikom prolaska mobilne stanice. Raspored senzora je ključni dio analize u radu jer pravilan raspored senzora može doprinijeti uštedi ukupne energije uređaja, kao i produljenju trajanja baterija. Nakon što se odabere pravilan, odnosno određeni raspored senzora, pišu se skripte u prozoru *SenScript* u zadanom programskom alatu unutar kojih se dodjeljuju naredbe određenoj mobilnoj stanici, kao i sensorima. Svaki od senzora će biti zadužen za prikupljanje i distribuciju prikupljenih podataka. Nakon što je sve postavljeno, namješta se vrijeme trajanja simulacije te se počinje simulirati cijeli projekt. Svi senzori će međusobno komunicirati izmjenjujući podatke koje su primili te će se na osnovu toga stvarati grafovi potrošnje energije i baterije svakog od uređaja. Također, analizirat će se međusobne ovisnosti dobivenih grafova za svaki od uređaja i izvlačiti zaključci koji će biti uspoređivani s ostalim tehnikama za optimalan raspored mobilnih čvorova unutar bežične senzorske mreže. Opisani su primjeri koji su analizirani, kako bi se na moglo doći do zaključka koji od primjera je bio najefikasniji i na osnovu kojeg parametra. Na osnovu te analize mobilna stanica može utvrditi



koju rutu treba odabrati ukoliko želi potrošiti manje energije u nekom slučaju ili ako joj to nije prioritetno onda odabrati rutu u kojoj se manje troši baterija uređaja nego ukupna energija.

### **3.2. CupCarbon simulator**

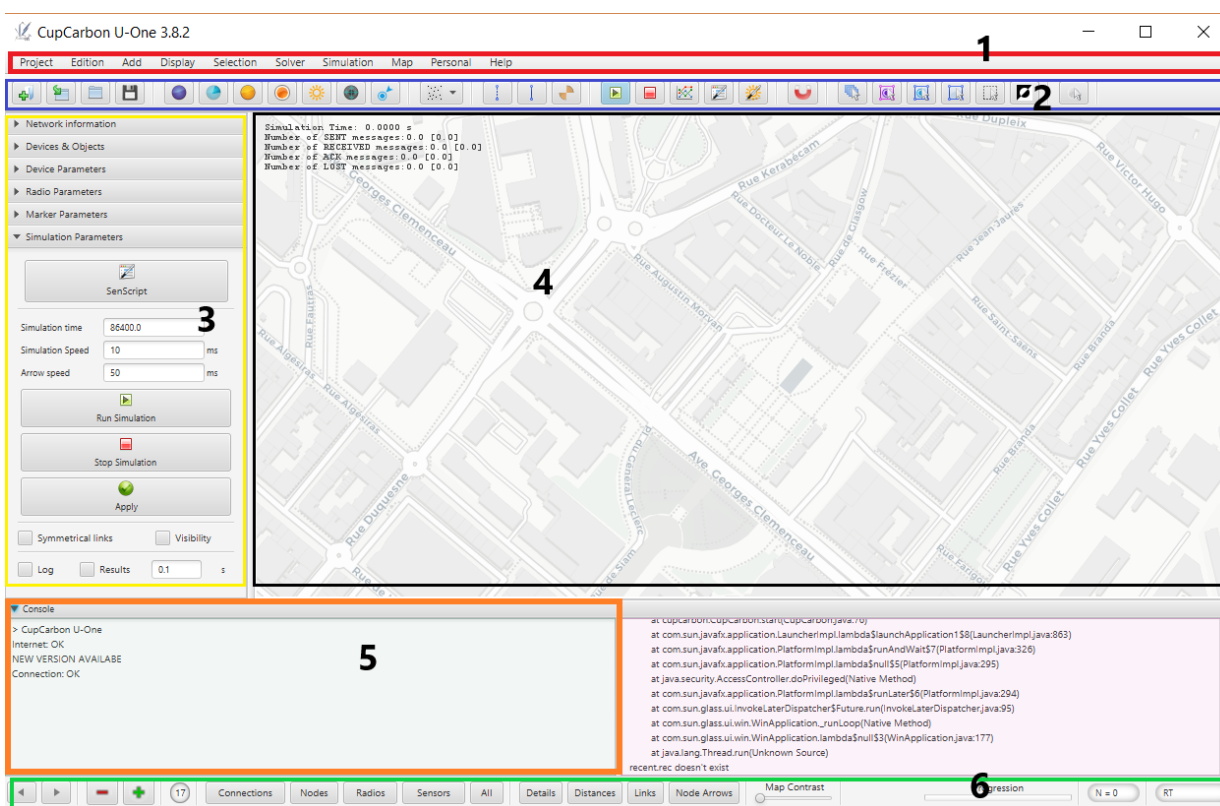
*CupCarbon* predstavlja simulator koji je dizajniran posebno za WSN (*Wireless Sensor Networks*) mreže, odnosno bežične senzorske mreže. Cilj ovog simulatora je dizajn, vizualizacija, validacija algoritama za praćenje okoliša i okoline, prikupljanje podataka iz istog i dr. Omogućuje stvaranje scenarija i situacija u okolini, poput požara, prometnih nesreća, te detektiranje mobilnih objekata koji se kasnije koriste u određenim istraživačkim i znanstvenim projektima. Ovaj simulator nudi dva moguća scenarija, odnosno simulacije u dvije vrste okruženja. Prva vrsta podrazumijeva dizajniranje scenarija pokretljivosti i promjenjivosti prirodnih događaja i okoline, dok druga vrsta podrazumijeva dizajniranje i simulaciju diskretnih događaja unutar WSN mreža [6].

Senzorska mreža unutar *CupCarbona* može biti dizajnirana uz pomoć grafičkih sučelja koja uz korištenje OPM (*Open Street Map*) aplikacije omogućuju postavljanje senzora direktno na točno određena mjesta koja želimo. Osim toga, svaki od senzora koji se tako postave može se zasebno konfigurirati unutar *SenScript Window-a* koji predstavlja sučelje unutar kojeg se uz pomoć programskog jezika posebno dizajniranog za *CupCarbon* mogu mijenjati komandne linije svakog senzora. *CupCarbon* je simulator koji ne podržava sve slojeve mreže. Zbog toga je glavna funkcionalnost ovog simulatora u tome da nadopunjuje postojeće simulatore i donosi mogućnost promatranja potrošnje prirodnih resursa kao i promatranje utjecaja zgrada i ulica unutar bežičnih senzorskih mreža.

*CupCarbon* također ima mogućnost izračuna i grafičkog prikaza potrošnje energije unutar mreže u odnosu na vrijeme, odnosno trajanje simulacije. Osim toga, nudi mogućnost prikaza propagacije pojedinog senzora, što automatski omogućuje lakše prepoznavanje područja interferencije unutar mreže koja se mogu izbjeći. *CupCarbon* podržava samo ZigBee, LoRa i Wi-Fi rješenja. Međutim, bez obzira što ne podržava veliki broj integriranih rješenja, ovaj simulator je pisan u Java programskog okruženju što uvelike olakšava i omogućuje implementaciju

određenih algoritama unutar programa na osnovu promjene originalnog programskog koda. Time se uvelike proširuju mogućnosti i funkcije *CupCarbon* programskog simulatora.

Na slici 3.1 je prikazano grafičko sučelje odnosno GUI (*Graphical User Interface*) koje se koristi. To grafičko sučelje *CupCarbon*-a se sastoji od šest manjih dijelova: trake izbornika (1), alatne trake (2), sučelja s parametrima uređaja i simulacije (3), mape (4), komandnog prozora (5) te trake s detaljima pojedinih dijelova simulacije.



**Slika 3.1. Prikaz grafičkog sučelja unutar *CupCarbon* simulatora**

Svaki od ovih dijelova grafičkog sučelja je zadužen za određenu funkciju *CupCarbon* simulatora. Na traci s izbornicima je moguće otvoriti novi projekt, uređivati dijelove simulacije, pronaći odgovore na određena pitanja i dr. Alatna traka je jako slična traci s izbornicima te ona predstavlja kraći način odabira određenih alata, odnosno senzora i uređaja uz pomoć njihovih simbola.

Sučelje s parametrima simulacije omogućuje namještanje parametara simulacije, pokretanje i zaustavljanje iste te određuje što će se prikazivati na kraju simulacije. Četvrti dio je mapa na kojoj se prikazuje senzorska mreža. Peti dio predstavlja komandu liniju, odnosno komandni prozor u kojem se mogu pisati određene naredbe koje određuju pojedini uređaj. Zadnja stavka, odnosno šesti dio predstavlja traku uz pomoć koje se može lakše orjentirati na mapi poput zumiranja, te označavanja određenih dijelova senzorske mreže [7].

Jedna od najzanimljivijih karakteristika ovog programa je u tome što se može implementirati na različitim vrstama mapa, odnosno karti, od kojih je naravno najznačajnija *Google Maps*. To omogućuje stvaranje simulacije koja može biti realistična, odnosno simulirana i prikazana na točno određenim lokacijama koje su i potrebne u pojedinom projektu. Uređaji koji mogu biti prikazani na određenim kartama, odnosno mapama su:

- *Sensor Node* – čvor koji predstavlja klasični senzorski čvor bez nekih dodatnih mogućnosti.
- *Media Sensor Node* – predstavlja senzorski čvor koji može prikupljati podatke iz okoline te može biti usmjeren ka prikupljanju točno određenih podataka; njegove karakteristike mogu biti izmijenjene unutar *SenScript* prozora.
- *Base Station (Sink)* – predstavlja statični senzorski čvor sa neograničenom količinom baterije.
- *Mobile* – predstavlja mobilnu stanicu koja se može kretati po određenom području uz pomoć unaprijed određene rute markerima.
- *Markers* – markeri predstavljaju uređaje koji mogu obavljati više funkcija, odnosno mogu biti markeri koji ograničavaju određeno područje senzorske mreže, mogu određivati rute kojima će se kretati mobilna stanica te se uz pomoć njih mogu dodavati zgrade na mapi.

Sve u svemu, *CupCarbon* predstavlja program koji posjeduje određene funkcije kao što su analiza potrošnje energije i baterije koje će biti temelj simulacije senzorske mreže u daljnjem radu, kao i same analize dobivenih rezultata.

### **3.3. Usmjeravanje senzorskih čvorova na osnovu potrošnje energije i baterije**

Optimalno usmjeravanje mobilnih čvorova u bežičnim senzorskim mrežama kao tema ovog diplomskog rada zapravo omogućuje odabir različitih ruta. U drugom poglavlju ovog rada su detaljnije objašnjene tehnologije usmjeravanja koje se najčešće koriste u najpoznatijim simulatorima. Međutim, optimalno usmjeravanje je u potpunosti slobodan proces odlučivanja, odnosno ovisi uvelike o tome što se traži u zadanom projektu. Tako usmjeravanje mobilnih čvorova može ovisiti o što boljem odabiru rute, o brzini prelaska određenog područja, o što sigurnijem prelasku određenog područja, o potrošnji energije i baterije uređaja i vozila. Ove dvije potonje karakteristike, odnosno ovisnost o potrošnji energije i baterije uređaja će detaljnije biti prikazane na primjerima simulacije koja je rađena u *CupCarbon* programskom okruženju. Cilj ovog usmjeravanja na osnovu potrošnje je vrlo logičan, a to je da se prijeđe određena ruta mobilnom stanicom uz što manju potrošnju energije te mobilne stanice, kao i da se omogući što manja potrošnja baterije pojedinih uređaja koji omogućuju komunikaciju između mobilne stanice i senzorskih čvorova duž takve rute, odnosno što manju potrošnju senzora uz rutu. Vrlo je važno imati na umu da će se u skorijoj budućnosti puno pažnje morati pridavati upravo ovakvom načinu usmjeravanja, tj. usmjeravanju na osnovu potrošnje energije i baterije. Razlog tome je vrlo jednostavan - na tržištu se sve više pojavljuju automobili koje pokreću baterije koje imaju ograničeni vijek trajanja te vozila koja će se kretati autonomno, bez ljuskog utjecaja i kao takva radit će sa jako puno manjih uređaja koji će također imati ograničenu količinu baterije i energije. Svi ovi faktori će utjecati na to da će autonomna vozila odabirati rute unutar kojih će trošiti manje energije, čak i ako te rute budu sporije od nekih drugih, osim ako sam korisnik drugačije ne zahtijeva.

Tako će u sljedećem poglavlju biti prikazano nekoliko primjera senzorskih mreža sa različitim razmještajem senzorskih čvorova, ovisno o tome o kojem faktoru će ovisiti odabir pojedine rute. Svaka od tih senzorskih mreža će se sastojati od mobilne stanice sa definiranom rutom te nekoliko senzora koji će prikupljati i razmjenjivati podatke na osnovu prikupljenih podataka iz okoline kada mobilna stanica prolazi kroz područje djelovanja senzora.

Prikazat će se detaljna analiza utroška energije mobilne stanice i senzora u odnosu na vrijeme trajanja simulacije, kao i utroška baterije u odnosu na trajanje simulacije. Također, na osnovu zadanih kriterija prikazat će se zašto bi pojedina ruta bila odabrana u pojedinom slučaju.

## 4. MODELIRANJE I SIMULACIJA BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE

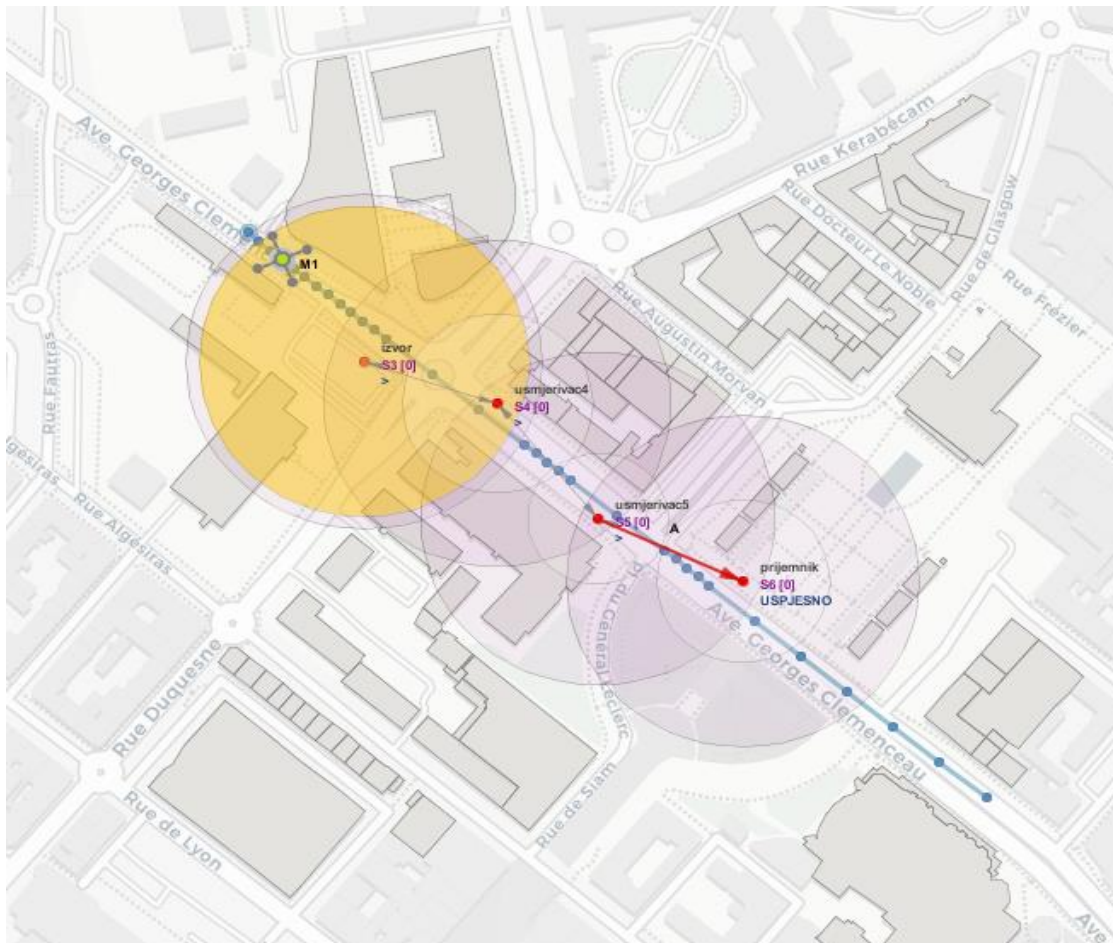
Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima, glavni dio ovog projekta i diplomskog rada predstavlja kreiranje i simulacija bežične senzorske mreže u kojoj će biti prikazan raspored senzorskih čvorova te provedena analiza dobivenih rezultata na osnovu grafova potrošnje energije i baterije. Sva odabrana rješenja optimalnog rasporeda senzorskih čvorova su samostalna i odabrana su na osnovu određenih parametara poput trajanja baterije i potrošnje energije. Svi primjeri su simulirani unutar već ranije opisanog programskog alata *CupCarbon* te će detaljno biti prikazani u sljedećim potpoglavljima. Također, optimalno usmjeravanje mobilnih senzorskih čvorova na osnovu potrošnje baterije i ukupne energije ukazuje na to da su čvorovi ti koji definiraju bežičnu senzorsku mrežu te da se prema njima oblikuje način rada te mreže. S obzirom da ih svaka bežična senzorska mreža sadrži jako puno, ne bi bilo isplativo vršiti njihovu izmjenu često.

### 4.1. Primjer jednostavne bežične senzorske mreže

Jedan od konkretnih primjera simulacije unutar programskog alata *CupCarbon* će se sastojati od pokretne stanice odnosno mobilne stanice, senzora, te odabrane rute kojom će ta mobilna stanica prolaziti.

Prije početka simulacije potrebno je odabrati rutu kojom će se mobilna stanica kretati, ta ruta će biti odabrana proizvoljno, zatim se na toj kompletnoj ruti postavljaju senzori na točno određena mjesta na kojima će prikupljati podatke prilikom prolaska mobilne stanice. Taj raspored senzora je ključni dio cijelog rada jer pravilan raspored senzora može doprinijeti jako puno uštedi cjelokupne energije uređaja kao i produljenju trajanja baterija. Nakon što se odabere pravilan odnosno određeni raspored senzora pišu se skripte u komandnom prozoru *SenScript* u zadanom programskom alatu unutar kojih se dodjeljuju naredbe određenoj mobilnoj stanici kao i sensorima. Svaki od senzora će biti zadužen za prikupljanje i distribuciju prikupljenih podataka. Nakon što je sve postavljeno, namješta se vrijeme trajanja simulacije te se počinje simulirati čitav projekt. Svi senzori će međusobno komunicirati izmjenjujući podatke koje su primili te će se na osnovu toga stvarati grafovi utroška energije i baterije svakog uređaja. Također, analizirat će se međusobne

ovisnosti tih grafova svakog od uređaja i izvlačit će se zaključci koji će biti uspoređivani s ostalim tehnikama za optimalan raspored mobilnih čvorova unutar bežične senzorske mreže.



**Slika 4.1. Primjer jednostavne bežične senzorske mreže**

Na slici 4.1. je prikazana jednostavna bežična senzorska mreža koja je općenito opisana iznad. Konkretno govoreći ova jednostavna bežična senzorska mreža se sastoji od: markera (rute), mobilne stanice, izvornog senzora (detektora), dva usmjerivača, te prijemnog senzora odnosno prijemnika.

Markeri (označeni plavom bojom na mapi) predstavljaju točke koje obilježavaju rutu kojom će se kretati mobilna stanica. Na početku dizajniranja bežične senzorske mreže postavljaju se dvije točke odnosno početna i krajnja točka rute kojom želimo da se mobilna stanica kreće. Nakon što je uspostavljena ta konačna ruta postavljaju se markeri između početne i krajnje točke koji služe kao

*checkpoint* za mobilnu stanicu. Zapravo njihova uloga je da prilikom simulacije mobilna stanica na svakom od tih markera zastane i tako se olakša prikaz svega što se događa tokom simulacije kao i spremanje rezultata tokom simulacije. Postavljanjem gušćeg rasporeda markera se dobija na vizualizaciji tokom simulacije te detaljnijeg prikaza. Naravno, gušći raspored markera se postavlja smisljeno odnosno u područja koja su važnija za analizu simulacije i rezultata [8].

▼ Marker Parameters

Route from markers    Insert Markers

Load Buildings

File Name: route1.gps

Title: Route name

From: City one

To: City two

Loop after: 60 Seconds

Number of loops: 10

Save    Delete

Route List

route1.gps

Draw all routes

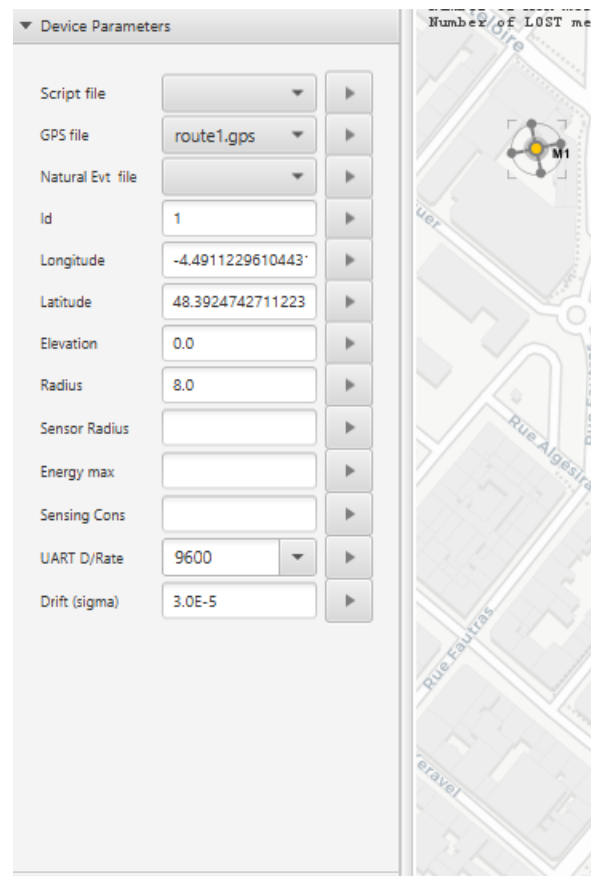
**Slika 4.2. Izbornik s parametrima markera**

Na slici 4.2. je prikazan izbornik s parametrima markera unutar kojeg se prilikom postavljanja markera definiraju detalji. Tako je unutar tog izbornika moguće mijenjati naziv markera i rute, određivati početnu i krajnju točku rute te vršiti petlju odnosno tražiti da mobilna stanica iznova i iznova prelazi istu rutu kako bi se utvrdile promjene koje se dešavaju u odnosu na vrijeme trajanja simulacije.

Sljedeći dio simulacije koji se treba postaviti je mobilna stanica. Mobilna stanica kako joj i ime samo kaže predstavlja dron, vozilo ili bilo koji drugi uređaj koji se kreće po točno određenoj ruti i



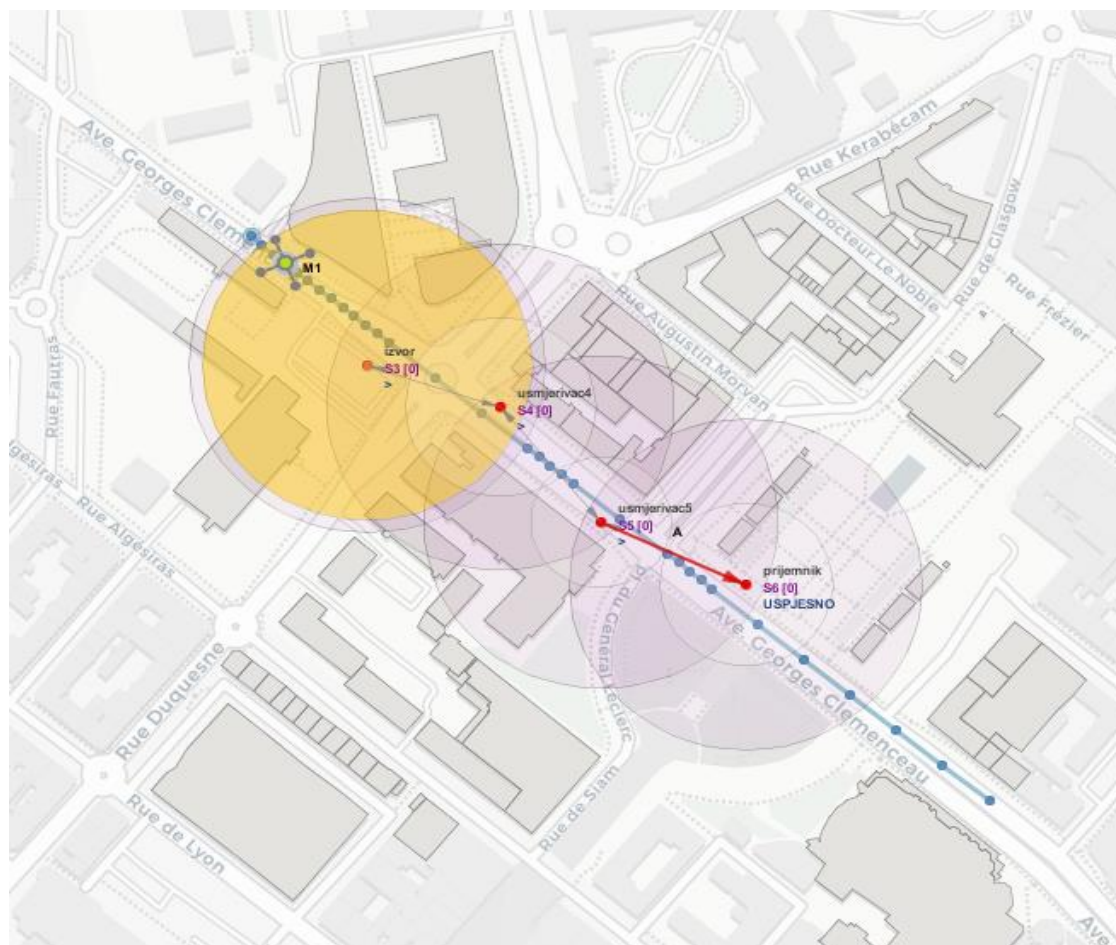
komunicira s postavljenim sensorima te na osnovu njih odabire najbolje rute odnosno rute koje su po određenim parametrima najbolji izbor.



**Slika 4.3. Izbornik s parametrima mobilne stanice**

Na slici 4.3. je prikazan izbornik s parametrima mobilne stanice unutar kojeg su prikazani detalji vezani za tu mobilnu stanicu. Izbornik se sastoji od različitih parametara mobilne stanice a kao najvažniji se ističu: GPS datoteka, koordinate te radius djelovanja. Najvažniji dio mobilne stanice je zapravo GPS datoteka. GPS datoteka predstavlja rutu kojom će se kretati mobilna stanica, a ta ruta je preuzeta, odnosno učitana na osnovu postavljenih markera. Koordinate mobilne stanice prikazuju točnu lokaciju mobilne stanice, što može biti vrlo korisno ukoliko se radi neki projekt u kojem je važno postaviti mobilnu stanicu na točno određenu lokaciju kako bi simulacija bila što realističnija. Radius mobilne stanice definira koliko prostora pokriva ta mobilna stanica unutar mape.

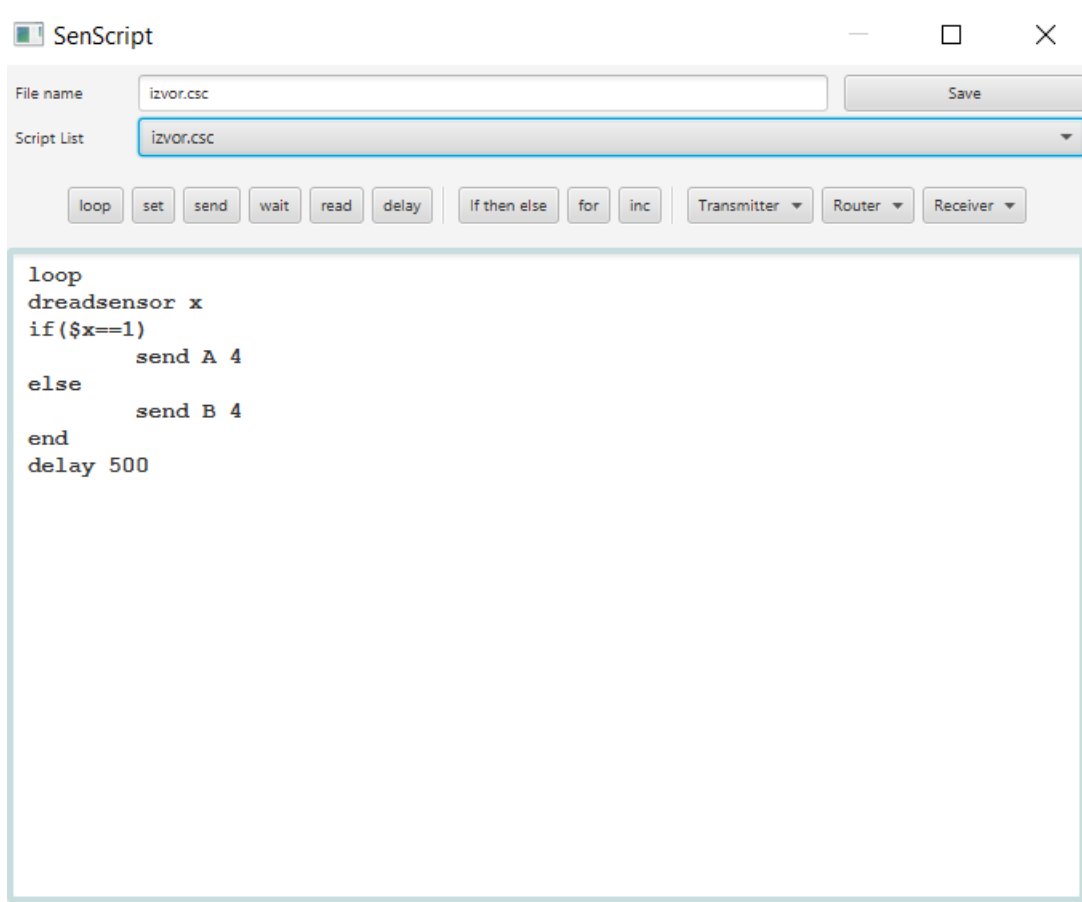
Glavni dio bežične senzorske mreže predstavljaju naravno sami senzori. Svaki od senzorskih čvorova koji je postavljen unutar bežične senzorske mreže ima točno određenu funkciju. Postavljanje senzora odnosno analiza rasporeda senzorskih čvorova će detaljnije biti objašnjena na sljedećim primjerima, a ovdje će fokus biti na analizu njihovog rada te kako se definiraju.



**Slika 4.4. Prikaz senzorskih čvorova**

Slika 4.4. je ista kao slika 4.1. ali će ovaj put na slici biti naglasak na senzorskim čvorovima koji čine ovu jednostavnu bežičnu senzorsku mrežu. Kao što je vidljivo na slici bežična senzorska mreža se sastoji od četiri senzorska čvora: izvorišnog čvora odnosno detektora, dva usmjerivača te prijemnika odnosno čvora na koji se šalju sve informacije. S obzirom na to da oba senzorska čvora koji predstavljaju usmjerivače imaju jednake funkcije njih ćemo promatrati kao jedan čvor.

Izvorišni čvor odnosno detektor u ovoj bežičnoj senzorskoj mreži imaju funkciju detektiranja mobilne stanice te njenog prolaska kroz područje djelovanja tog senzora. Prilikom detekcije mobilne stanice senzorski čvor razmjenjuje informacije s mobilnom stanicom. S obzirom da tokom trajanja simulacije svi čvorovi neprestano komuniciraju izvorišni čvor prilikom detekcije mobilne stanice odmah prosljeđuje zaprmljene podatke ka prvom usmjerivaču s kojim je povezan odnosno u ovom konkretnom primjeru *usmjerivaču4*.



```
loop
dreadsensor x
if ($x==1)
    send A 4
else
    send B 4
end
delay 500
```

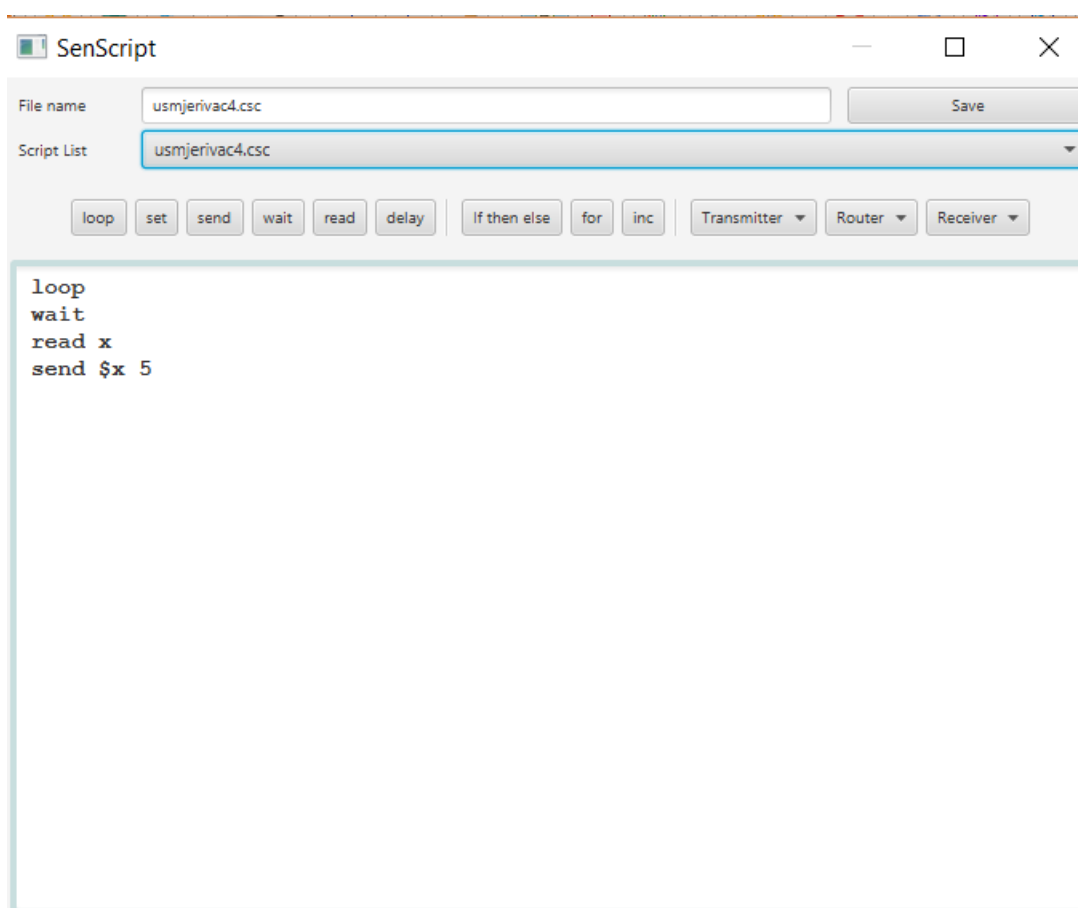
**Slika 4.5. Programski kod izvorišnog čvora (detektora)**

S obzirom da *CupCarbon* posjeduje svoju vlastitu skriptu unutar koje se pišu komadne linije za svaki senzor i uređaj olakšava posao svakom tko se njime koristi. Tako se na vrlo jednostavan način kao što je i prikazano na slici 4.5. definiraju funkcije izvorišnog čvora.

Na samom početku se postavlja petlja koja označava da će se zadani programski kod izvršavati iznova i iznova svaki put nakon što završi s razmakom od 500 ms. Nakon definiranja petlje se inicijalizira *senzor x* te se uz pomoć *if* petlje definiraju dvije mogućnosti. Prva mogućnost je

definirana na način ako je senzor detektirao mobilnu stanicu da odmah šalje taj podatak ka senzoru *usmjerivač4*. U slučaju kada detekcija ne postoji šalje se također podatak na senzor *usmjerivač4* koji mu govori kako nema nikakve detekcije. Nakon druge mogućnosti petlja se završava te se stalno izvodi iznova dok god traje simulacija cijele bežične senzorske mreže.

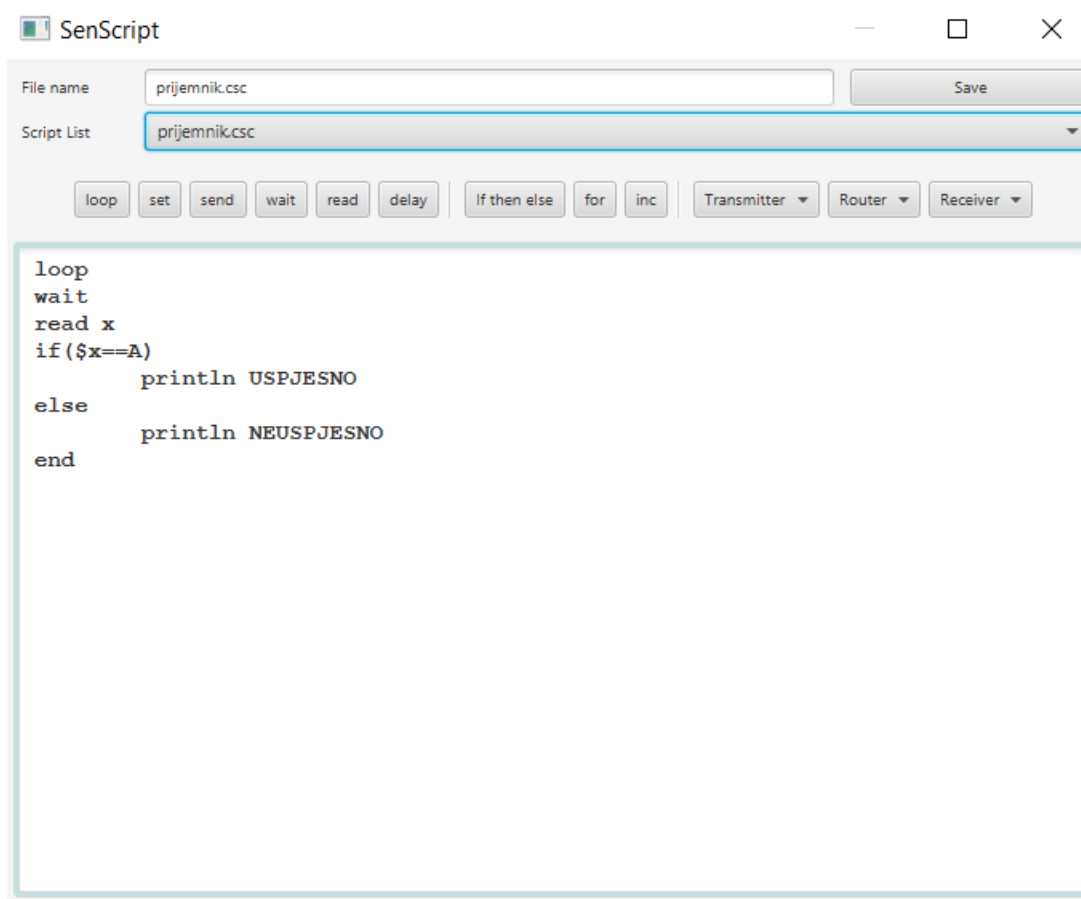
Sljedeći senzorski čvor odnosno čvorovi su usmjerivači (eng. *router*). Već je općepoznata činjenica kako rade usmjerivači, a u ovom primjeru im je zadaća u tome da podatke primljene sa prethodnog senzora proslijede na sljedeći senzor. Programski kod za njihovu funkciju se nalazi na slici 4.6.



**Slika 4.6. Programski kod umjerivača**

Kao što je prikazano na slici 4.6. programski kod usmjerivača je vrlo jednostavan. Sastoji se od petlje unutar koje senzor čeka da pristignu podaci, zatm ih očitava te prosljeđuje na sljedeći senzor.

Zadnji senzor bežične senzorske mreže u datom primjeru je prijemnik odnosno senzor do kojeg dolaze svi podaci. Funkcija ovog senzora je zaprimanje podataka o približavanju mobilne stanice odnosno o tome da je mobilna stanica detektirana u području određene rute. To se radi na ovaj način, tj. prosljeđivanjem podataka preko više senzora do prijemnika kako bi prijemnik u zadanim situacijama mogao te podatke proslijediti na neku baznu stanicu. Prosljeđivanjem podataka na ovaj način se osigurava dovoljno vremena baznoj stanici ukoliko je potrebno da mobilna stanica promijeni rutu kretanja ukoliko je došlo do određenih problema (prometne nesreće, zastoja, gužve i dr.) na postojećoj ruti.



```
loop
wait
read x
if ($x==A)
    println USPJESNO
else
    println NEUSPJESNO
end
```

**Slika 4.7. Programski kod prijemnog senzorskog čvora**

Programski kod prikazan na slici 4.7. se također sastoji od petlje unutar koje senzor ima opciju da čeka podatke koji su poslani, zatim ih očitava te uz pomoć *if* petlje ispisuje određenu poruku. Ukoliko su zaprimljeni podaci jednaki poslanima ispisat će se poruka „USPJESNO“, a u suprotnom

slučaju će se ispisati poruka „*NEUSPJESNO*“ kao poruka da poslani podaci nisu zaprimljeni odnosno da nema detekcije.

Opisom zadnjeg senzora bežične senzorske mreže je završen detaljan opis parametara i funkcioniranja uređaja bežične senzorske mreže, a u daljnjem tekstu će fokus biti na analizi pojedinog primjera bežične senzorske mreže, rasporedu senzorskih čvorova te rezultata dobivenih simulacijama.

## **4.2. Analiza modela bežične senzorske mreže**

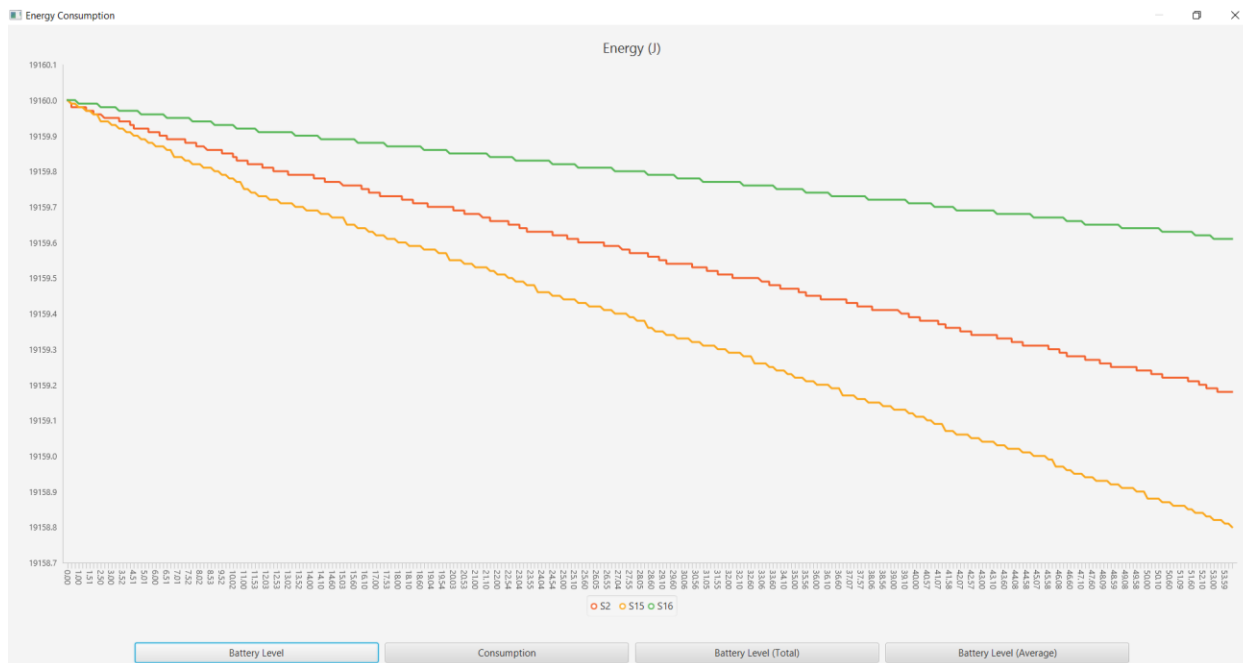
Prilikom kreiranja bežične senzorske mreže raspored čvorova u modelima koji će biti prikazan je odabran na osnovu proizvoljnog rasporeda, uz uvjet da raspored senzora pokriva najvažnija područja rute kojom se kreće mobilna stanica. Svaki dio rute koji prelazi mobilna stanica mora biti u potpunosti pokriven jednim od senzora kako ne bi došlo do prekida veze među njima, a time i prekida prijenosa podataka. Prijenos podataka sensorima je vrlo važan kako bi se na vrijeme obavijestila mobilna stanica o samom utrošku energije u konkretnim primjerima kakvi će biti prikazani u ovom radu, dok u drugim slučajevima pravoremeni prijenos podataka može olakšati mobilnoj stanici promjenu rute ukoliko je na planiranoj ruti došlo do nekih zastoja ili prometne nesreće. Na svakom od sljedećih primjera će biti izvršena analiza potrošnje energije mobilne stanice i senzora te usporedba svakog od primjera međusobno. Svaki od modela bežične senzorske mreže će imati svoju rutu koju će mobilna stanica prelaziti, a razlikovat će se samo u zadnjem dijelu rute kako bi se rezultati mogli lakše uspoređivati.

### **4.2.1. Prvi model bežične senzorske mreže**

Svi modeli bežične senzorske mreže u ovom radu će imati rutu koja stiže na isti cilj ali različitim ulicama odnosno putanjama.



tema ovog rada mogao prosljediti tu informaciju baznoj stanici. Tada bazna stanica posjeduje sve podatke o toj trenutnoj ruti te može poslati upozorenje mobilnoj stanici ukoliko su senzori detektirali gužvu ili prometnu nesreću na tom dijelu te mobilna stanica može reagirati na vrijeme promjenom rute. U ovom radu će biti prikazana tri različita modela odnosno simulirat će se tri rute koje imaju isti cilj ali malo izmijenjene putanje kretanja pri kraju rute. Na osnovu ovih testiranja bi bazna stanica unutar nekog projekta mogla odabrati jednu od tri ponuđene rute te odabrati najbolju rutu za mobilnu stanicu u datom trenutku. Ova prikazana simulacija traje 54 sekunde uz brzinu simulacije 200 ms te prijenos informacija od senzora do senzora od 50 ms.



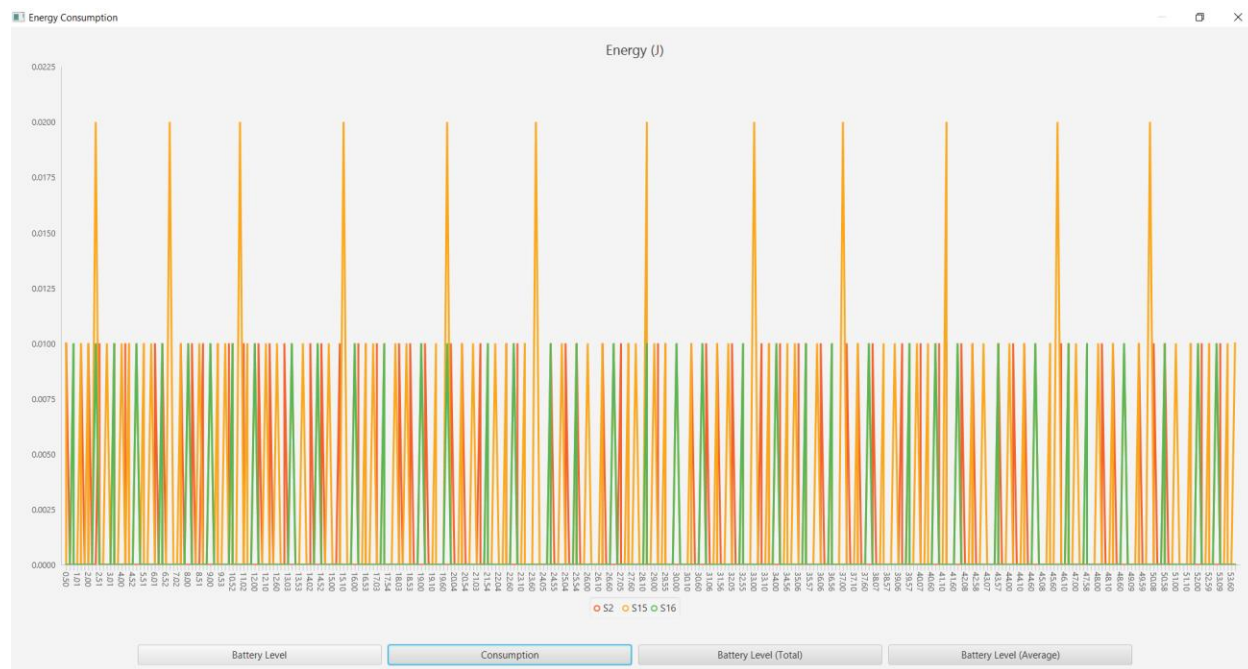
**Slika 4.9. Prikaz potrošnje baterije tri glavna čvora**

Na slici 4.9. prikazan je graf potrošnje baterije 3 glavna čvora unutar senzorske mreže. Ta tri čvora čine: čvor *izvor* odnosno čvor koji prvi detektira nailazak mobilne stanice, zatim *usmjerivač15* koji je zadnji usmjerivač prije nego se podaci prosljede na senzor *prijemnik*, te zadnji senzorski čvor odnosno senzor *prijemnik* koji služi za prijem svih podataka te na osnovu toga ispisuje određenu poruku.

Na ovom grafu se prikazuje potrošnja energije odnosno baterije u ovom slučaju u džulima (J) u odnosu na vrijeme trajanja simulacije. Iz grafa je vidljivo da najmanju potrošnju baterije od ova



tri senzora ima senzor *S16* odnosno senzor *prijemnik* a najveću potrošnju baterije senzor *usmjerivac15* koji je zadnji usmjerivač prije senzora prijemnika. Na osnovu ovog prikazanog grafa se nameće zaključak kako najveću potrošnju ima zadnji senzor od usmjerivača te na osnovu njega se mora projektirati čitava bežična senzorska mreža. Svi ostali senzori imaju manju ili jednaku potrošnju baterije u odnosu na taj senzor.

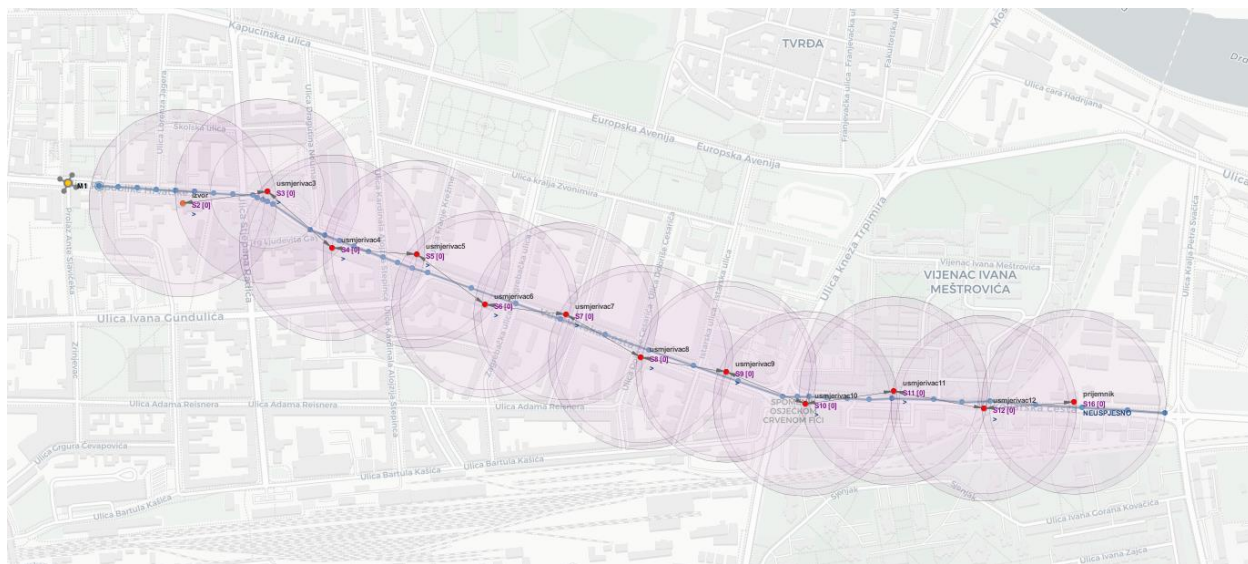


**Slika 4.10. Prikaz potrošnje energije tri glavna čvora**

Kao i na slici 4.9. i na slici 4.10. je prikazana analiza tri glavna čvora odnosno: čvora *izvor*, čvora *usmjerivac15* te čvora *prijemnik*. Razlika u ovoj analizi i ovom grafu je u tome što je ovaj puta analizirana ukupna potrošnja energije senzorskih čvorova. Iako je ovaj puta varijabla energije u pitanju, a ne baterije i dalje najveću potrošnju predstavlja senzorski čvor *usmjerivac15* čija potrošnja seže do 0.0200 J u pojedinim trenucima dok u ostala dva senzorska čvora potrošnje energije ne prelazi 0.0100 J. Na prikazanom grafu na slici 4.10. je vidljivo kako energija senzorskih čvorova oscilira kako vrijeme simulacije protiče odnosno u pojedinim trenucima je minimalna, dok je u drugim maksimalna potrošnja energije. Na osnovu ove analize opet se nameće zaključak kako projektiranje bežične senzorske mreže ovog modela mora uzimati u obzir najviše senzorski čvor *usmjerivac15* ako su kriteriji kreiranja potrošnja energije i baterije.

## 4.2.2. Drugi model bežične senzorske mreže

Drugi model bežične senzorske mreže kao što je već navedeno će imati isti cilj, ali malo drugačiju rutu od prvog modela.

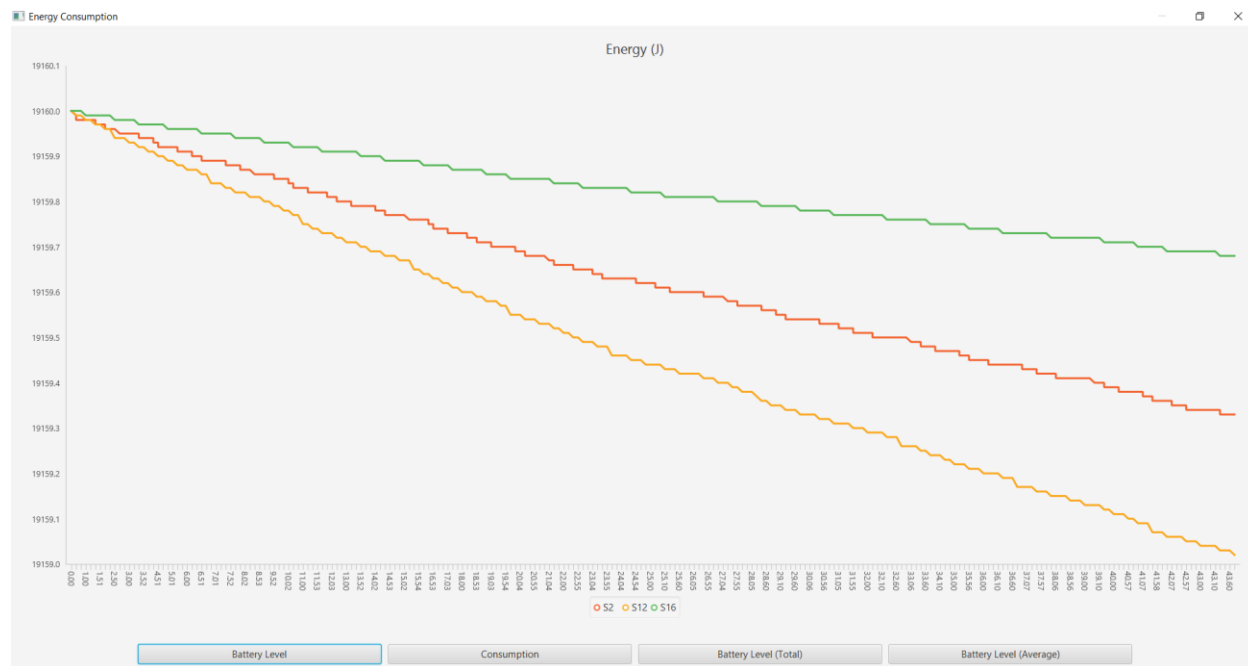


**Slika 4.11. Prikaz sheme drugog modela**

Na slici 4.11. je prikazana shema drugog modela bežične senzorske mreže. Ova senzorska mreža se sastoji od jedne mobilne stanice, dvanaest senzorskih čvorova te rute kojom će se kretati sama mobilna stanica.

Mobilna stanica se kreće zadanom rutom dok traje simulacija prolazeći kroz svih dvanaest senzora postavljenih tako da svaki dio rute bude pokriven u svakom trenutku. Također, raspored senzora je takav da u svakom trenutku postoji komunikacija između susjednih senzora te time se omogućava da ne dolazi do prekida prijenosa podataka. Također, položaji senzora su takvi da je svaki senzor postavljen na rub područja pokrivanja susjednog senzora. Time se omogućava maksimalna pokrivenost signala uz najmanji mogući broj korištenih senzora. Najbolja iskorištenost senzora je vrlo važna u projektima gdje je bitna što manja potrošnja budžeta, a da se zadrži visoka kvaliteta mreže. Takav raspored čvorova zapravo i podrazumijeva optimalno raspoređivanje mobilnih senzorskih čvorova što je i glavna tema ovog rada. Vrijeme trajanja ove simulacije iznosi 44 sekunde uz brzinu simulacije od 200 ms te brzinu prijenosa podataka od 50 ms.

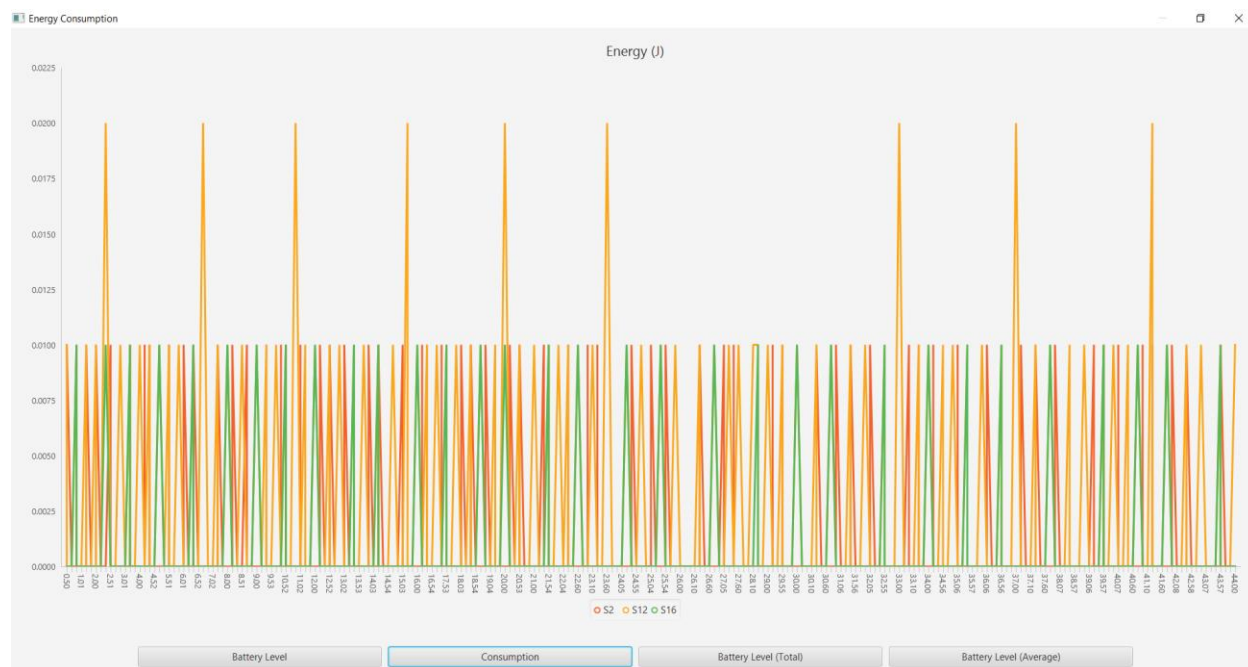
Od dvanaest senzorskih čvorova koji su postavljeni u ovom modelu bežične senzorske mreže tri su najvažnija. To su: senzorski čvor *izvor*, *usmjerivac12*, te senzorski čvor *prijemnik* kao i u prvom modelu bežične senzorske mreže. Funkcije su im identične onima u prvom modelu te će također i u ovom modelu biti prikazana analiza ta tri čvora.



**Slika 4.12. Prikaz potrošnje baterije tri glavna čvora**

Na slici 4.12. prikazan je graf potrošnje baterije za tri glavna čvora. Kao što se može iščitati iz grafa najveću potrošnju baterije ima senzorski čvor *usmjerivac12* kao i kod prvog modela. Razlog tome je što najveća količina informacija stiže na taj usmjerivač te ih on kao takve mora proslijediti dalje na senzor prijemnik. Na osnovu toga kao i kod prvog modela prilikom kreiranja bežične senzorske mreže u obzir se mora uzeti potrošnja baterije ovog usmjerivača dok su potrošnje svih ostalih senzorskih čvorova manje ili jednake od njegovoj. Na grafu je prikazana ovisnost potrošnje baterije iskazane u džulima (J) te vremena simulacije. Također, optimalan raspored mobilnih senzorskih čvorova zapravo i podrazumijeva raspored što manjeg broja čvorova sa što većom pokrivenšću rute. Time se osigurava lakša izmjena čvorova kada dođe do toga da su potrošeni u potpunosti. Zato ova analiza koja je prikazana na slici 4.12. je vrlo korisna prilikom konstrukcije

sljedeće bežične senzorske mreže time što se zna da će najviše energije trošiti senzor koji dobije najviše informacija te se prema njemu moraju uskladiti svi ostali proračuni.



**Slika 4.13. Prikaz potrošnje energije tri glavna senzorska čvora**

Na slici 4.13. prikazana je potrošnja energije drugog modela bežične senzorske mreže. Graf je prikazan u ovisnosti potrošne energije koja je izražena u džulima (J) i vremena trajanja simulacije. Kao i u prvom modelu najveću potrošnju ima senzorski čvor *usmjerivac12* koji doseže maksimalnu potrošnju energije od 0.0200 J. Međutim, razlika u odnosu na prvi model je u tome što period u kojem ne doseže maksimalnu potrošnju je u različitom vremenskom dijelu simulacije. Kod prvog modela taj period je većinom konstantan dok je kod drugog modela taj period nešto izraženiji i nalazi se u dijelu simulacije od 24. sekunde do 32. Također, potrošnja energije ova tri senzorska čvora oscilira kroz trajanje simulacije a senzori *izvor* i *prijemnik* dosežu maksimalnu potrošnju energije od 0.0100 J.

### 4.2.3. Treći model bežične senzorske mreže

Treći, ujedno i posljednji model bežične senzorske mreže koji je simuliran u ovom diplomskom radu se sastoji od najduže rute. Ako uzmemo za primjer da mobilna stanica predstavlja autonomno vozilo onda ova ruta ima najmanju vjerojatnost da će biti odabrana zbog

svoje udaljenosti. Međutim, ovakve rute i opcije moraju postojati u slučajevima kada su sve kraće rute zauzete odnosno kada je na tim rutama došlo do nekih iznenadnih zastoja, prometnih nesreća i slično.

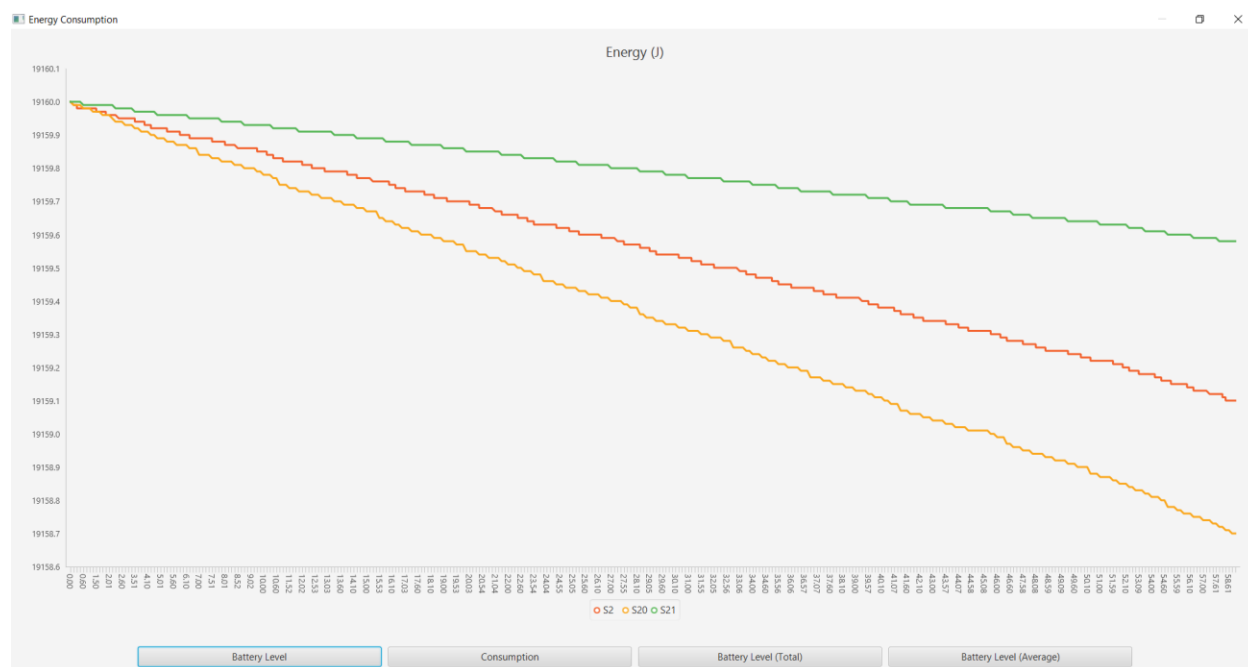


**Slika 4.14. Prikaz sheme trećeg modela**

Na slici 4.14. vidljiv je prikaz sheme trećeg modela bežične senzorske mreže koja se sastoji od mobilne stanice, 19 senzorskih čvorova te spomenute rute. Ruta koja je kreirana, što nije navedeno u prošla dva modela, se zapravo tvori unutar simulacije uz pomoć markera. Postavljenjem markera na točne lokacije stvara se ruta između njih te je moguće uz pomoć dodatnih čvorova na toj glavnoj ruti oblikovati izgled same rute. Također, ova ruta je najdulja ruta od ova tri navedena modela te se time i sastoji od najvećeg broja senzorskih čvorova, njih 19, od kojih su kao i kod prošlih modela *izvor*, *prijemnik* i *usmjerivac20* najvažniji.

Raspored senzorskih čvorova u ovom modelu je također napravljen tako da bude što efikasniji odnosno da se sa što manjim brojem senzora pokrije kompletna dužina rute te da ne postoje dijelovi rute u kojima mobilna stanica neće biti detektirana. Također, na slici 4.14. je vidljiv trenutak detekcije mobilne stanice te se prijenosom informacija kroz ostale senzore ispisala poruka „USPJESNO“ na prijemniku što znači da su podaci proslijeđeni pravovremeno. Vrlo važna stavka ovakvih modela je i odabir vremena prijenosa informacija jer u slučajevima kada je prijenos

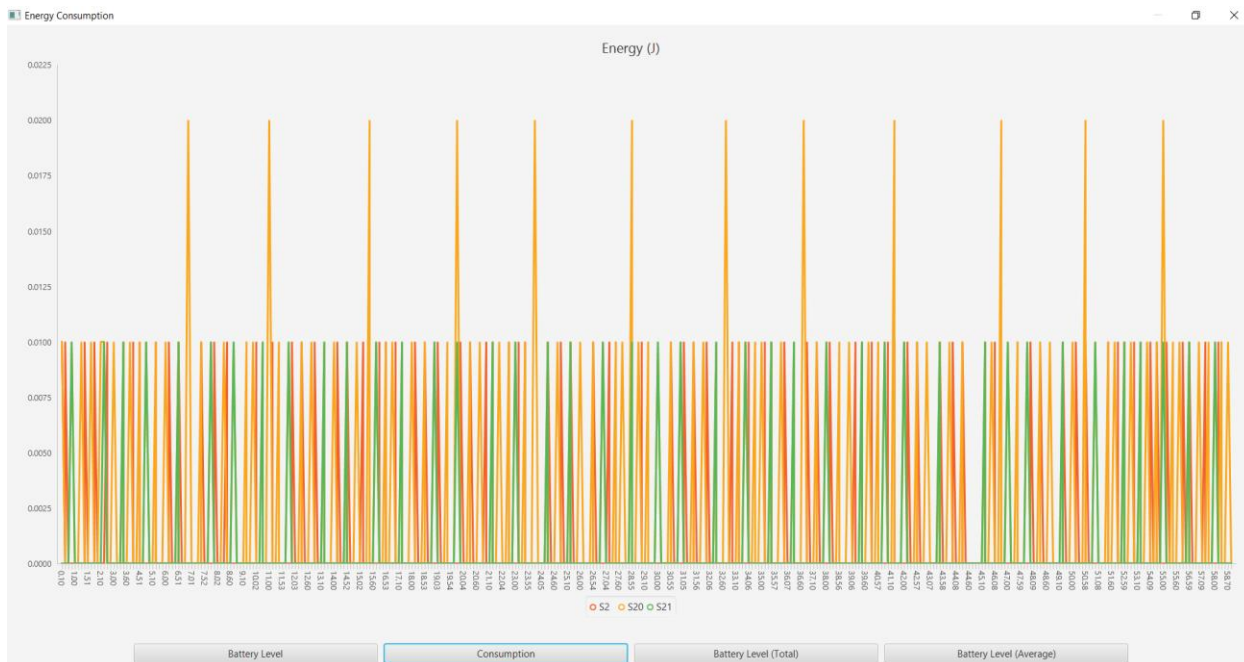
informacija nedovoljno brz može doći do toga da mobilna stanica ne stigne reagirati i promijeniti rutu u datom trenutku ukoliko je to potrebno. U sva tri modela koja su simulirana brzina prijenosa informacija je 50 ms. Trajanje simulacije trećeg modela iznosi 59 sekundi, dok brzina simulacije iznosi 200 ms kao i u prethodna dva modela.



**Slika 4.14. Prikaz potrošnje baterije tri glavna čvora**

Na slici 4.14. je prikazana međusobna ovisnost potrošnje baterije tri glavna čvora bežične senzorske mreže i vremena trajanja simulacije. Potrošnja baterije iskazana u džulima (J) prikazuje kako i u trećem modelu najveću potrošnju baterije ima senzorski čvor *usmjerivac20*. Na osnovu toga kao i u prethodnim modelima prilikom kreiranja bežične senzorske mreže u obzir se uzima potrošnja tog čvora. Svi ostali senzorski čvorovi imaju manju ili jednaku potrošnju baterije te se ne moraju uzimati u obzir kada je u pitanju taj kriterij unutar ovog modela.

Na prikazanom grafu se može vidjeti kako sva tri čvora imaju „stepenast“ rast potrošnje baterije što je i logično ako se uzme u obzir kako svaki senzorski čvor ima vrijeme u kojem isčekuje podatke da pristignu odnosno vrijeme čekanja u kojem troši znatno manje baterije. Dok traje vrijeme čekanja senzorski čvor se nalazi u stanju mirovanja što mu omogućava minimalnu potrošnju baterije. U trenutku kada podaci stignu do senzorskog čvora, isti se odmah prebacuje u stanje rada što objašnjava dijelove grafa gdje se povećava potrošnja baterije.



**Slika 4.15. Prikaz potrošnje energije tri glavna čvora**

Kao što je vidljivo na slici 4.15. potrošnja energije tri glavna čvora je približno jednaka. Jedina razlika je kod čvora *usmjerivac20* koji u pojedinim trenucima ima potrošnju energije duplo veću od maksimalne potrošnje energije ostala dva čvora. Razlog tome su trenutci tokom simulacije u kojima svi podaci sa svih senzora stižu na *usmjerivac20*. Obradom svih podataka troši se znatno više energije što je i vidljivo na samom grafu. Oscilacije potrošnje energije koje su vidljive su uzrokovane slično kao i kod potrošnje baterije odnosno potrošnja energije je u pojedinim trenucima skoro na nuli iz razloga što se tada senzori nalaze u stanju mirovanja. To stanje mirovanja omogućava sensorima puno dulji radni vijek što je vrlo važno kod velikih sustava i modela gdje je potreban prijenos i detekcija velike količine podataka u što kraćem vremenu.

## 5. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJE

Kao što je prikazano u prethodnom poglavlju simulacija bežične senzorske mreže za ovaj diplomski rad je vršena na tri različita primjera. Svaki od primjera je imao jedan dio rute koji je bio zajednički dok se ostatak rute razlikovao od ostala dva primjera. Bez obzira na tu razliku u rutama rezultati sve tri simulacije su davale slične rezultate. Razlika koja se javila u rezultatima je uzrokovana ponajviše odabirom rute odnosno duljine rute. Što je bila dulja ruta to je bila veća potrošnja energije kao i baterije svakog pojedinog senzorskog čvora. Na osnovu toga se može zaključiti da ako mobilna stanica ima jedini preduvjet potrošnju energije i baterije onda bi trebala uvijek odabrati najkraću moguću rutu.

Međutim, ukoliko se osim ta dva parametra u obzir uzimaju i ostali parametri (gužva na cesti, prometne nesreće, radovi na cesti i dr.) tada najkraća ruta ne jamči i najbolje rješenje. Stoga, odabir, uvjetno rečeno, najbolje rute je uvijek ovisan o parametrima koji se uzimaju u obzir. Međutim, prilikom analize rezultata simulacije razlike koje su dobivene na tri primjera nisu toliko primjetne kao što su sličnosti tih rezultata. Većina grafova koji su prikazani u prethodnom poglavlju ističu kako se potrošnja baterije i ukupne energije senzorskih čvorova ne mijenja značajno promjenom rute. Veći je naglasak na tome da ti senzorski čvorovi, ukoliko su slično raspoređeni, troše približno jednako svoje bateriju i ukupnu energiju. Tu se dolazi do suštine ovog diplomskog rada, važnost optimalnog rasporeda mobilnih senzorskih čvorova je ogromna. Optimalan raspored mobilnih senzorskih čvorova je važan ponajviše zbog same potrošnje energije tih čvorova jer kao što se može primijetiti na sva tri primjera, potreban je veliki broj senzorskih čvorova da bi se jedna ruta bila u potpunosti „pokrivena“. Također, odmah se nameće i zaključak kako često mijenjanje senzorskih čvorova ne bi bilo isplativo upravo zbog velikog broja istih. Upravo zbog toga se u bežičnim senzorskim mrežama naglasak uvijek stavlja na senzorske čvorove te se analizira njihova potrošnja. Analizom potrošnje se utvrđuje koji od senzorskih čvorova ima najveću potrošnju te se na osnovu tog čvora postavljaju uvjeti i definira trajanje senzorske mreže prije prve potrebne izmjene čvorova. Također, znajući da do izmjene čvorova mora doći odnosno da je ta izmjena neizbježna nakon nekog vremena, optimalno usmjeravaje mobilnih čvorova dobiva svoju važnost. Svakim rasporedom i usmjeravanjem mobilnih senzorskih čvorova se nastoji minimalizirati broj potrebnih senzorskih čvorova s tim da efikasnost bude što



veća. Svaka ruta odnosno svaki primjer donosi sa sobom svoje probleme i potrebne načine usmjeravanja mobilnih senzorskih čvorova. U najjednostavnijim primjerima optimalan raspored senzorskih čvorova je vrlo lako postaviti jer se uglavnom te rute sastoje od samo jednog pravca kretanja. Međutim, ukoliko su rute drugačije, odnosno ukoliko sadrže više pravaca kretanja te ukoliko posjeduju veliki broj promjena smjera to može zahtijevati veći broj senzora da bi se pokrilo cijelo područje rute.

Upravo to je vidljivo na tri primjera simulacije koja su prikazana u prethodnom poglavlju. U drugom primjeru koji je imao jako malo promjena pravaca kretanja korišten je najmanji broj senzorskih čvorova – 12. U ostala dva primjera koja su prikazana korišteno je više senzorskih čvorova što je uvjetovano upravo većim brojem pravaca kretanja a ujedno i duljom rutom. Razlika u broju senzora između primjera broj 2 i druga dva primjera je na prvi pogled zanemariva (razlika prvog i drugog primjera je 3 senzora, a drugog i trećeg 7 senzora). Međutim, ta razlika trenutno izgleda zanemarivo malena ali ovdje se radi o primjerima koji obuhvaćaju rute koje nisu pretjerano dugačke. Kada bi se radilo s primjerima puno većih gradova u kojima jedna ruta mora pokrivati dužinu čitavog grada tada se dolazi do velike razlike u broju senzorskih čvorova a time i do veće važnosti optimalnog usmjeravanja mobilnih senzorskih čvorova u bežičnim senzorskim mrežama.

Na osnovu slika 4.8. (prva ruta), 4.11. (druga ruta) i 4.14. (treća ruta), vidljiva je očita razlika u duljini istih. Međutim, bez obzira na duljinu i to što se druga ruta nameće kao najizlednija opcija za odabir, ostale dvije rute također imaju funkciju da budu odabrane u slučajevima kada je druga ruta iz nekih razloga zatvorena za promet. Također, svako autonomno vozilo koje bude koristilo sustave bežičnih senzorskih mreža će morat imati uvijek u opciji barem dvije ili tri rezervne rute kojima će se moći kretati ukoliko dođe do problema na glavnoj ruti. U suprotnom slučaju bi došlo do zastoja cijelog prometa autonomnih vozila. Tu najveću važnost imaju bežične senzorske mreže a unutar njih optimalno usmjeravanje mobilnih senzorskih čvorova kao glavna inačica.

## 6. ZAKLJUČAK

Kao što je već spomenuto u većini poglavlja ovog diplomskog rada, bežične senzorske mreže predstavljaju sve veći oslonac autonomnim vozilima. S obzirom na to, kvaliteta dizajniranja i izrade bežičnih senzorskih mreža je vrlo važna. Kako bi njihova funkcionalnost bila što veća, optimalno usmjeravanje mobilnih senzorskih čvorova unutar tih mreža je ključno. Upravo je optimalno usmjeravanje analizirano unutar ovog diplomskog rada. Prilikom dizajniranja i provedbe simulacija tri različita primjera postignuti su očekivani rezultati. S obzirom da je naglasak u ovom radu bio na optimalnom usmjeravanju u odnosu na potrošnju baterije i ukupne energije senzorskih čvorova rezultati su prikazani samo u tom području. Naravno, postoji još mnoštvo mogućih parametara koji se mogu uvesti kao dijelovi analize bežične senzorske mreže. Rezultati simulacije i analize simulacije su takvi da potvrđuju kako najveću potrošnju mobilnih senzorskih čvorova ima čvor koji se nalazi do prijemnika i koji prenosi najveću količinu podataka u istom trenutku. S obzirom na to, prilikom dizajniranja mreže te proračuna za izmjene čvorova u obzir se mora uzimati taj čvor kao glavni te se u odnosu na njega moraju vršiti sva ostala mjerenja. Također, optimalno usmjeravanje mobilnih senzorskih čvorova podrazumijeva minimaliziran broj iskorištenih senzora za efikasno pokrivanje područja rute. Sve u svemu, bežične senzorske mreže te optimalno usmjeravanje mobilnih senzorskih čvorova uz primjenu istih imaju bitnu ulogu u području primjene autonomnih vozila.

## LITERATURA

- [1] J.Velagić, Bežične mreže u industrijskoj automatizaciji, Faculty of Electrical Engineering Department of Automatic Control and Electronics, Sarajevo, 2008.
- [2] M.Saoudi, A.Bounceur, R.Euler, T.Kechadi, A. Cuzzocrea, Intelligent Data Mining Techniques for Emergency Detection in Wireless Sensor Networks, France, Ireland
- [3] A.Diaz, P. Sanchez, Simulation of Attacks for Security in Wireless Sensor Network, University of Cantabria, Spain, 2016.
- [4] S.Baraković, J. Baraković, S. Kasapović, Protokoli usmjeravanja u bežičnim ad hoc mrežama, Sarajevo, 2010.
- [5] H.Kaur, S.Sharma, A Comparative Study of Wireless Technologies: Zigbee, Bluetooth LE, EnOcean, Wavenis, Insteon and UWB, RTCCE 2013.
- [6] M.Lounis, A.Bounceur, A.Laga, B.Pottier, GPU-based Parallel Computing of Energy Consumption in Wireless Sensor Networks, Paris, France, 2015.
- [7] CupCarbon U-One 4.1, [www.cupcarbon.com](http://www.cupcarbon.com) (07.08.2019.)
- [8] C.L.Pavon, S. Sendra, J.F.Valenzuela-Valdes, Evaluation of CupCarbon Network Simulator for Wireless Sensor Networks, Universidad de Granada, Granada, Spain, 2018.

## SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je optimalno usmjeravanje mobilnih čvorova u bežičnim senzorskim mrežama. U sklopu ovog rada definirani su i kreirani određeni modeli bežičnih senzorskih mreža te su na osnovu simulacije i analize rezultata definirani najbolji načini usmjeravanja mobilnih čvorova. Kreiranje modela te prikaz rezultata načinjeni su unutar programskog alata *CupCarbon* namijenjenog isključivo dizajniranju modela bežične senzorske mreže. U praktičnom primjeru kreirana su tri modela s različitim rutama kretanja mobilne stanice dok su početna i krajnja točka rute jednake u sva tri modela. Svaki model se sastojao od mobilne stanice, rute kojom se kreće ta mobilna stanica, te senzorskih čvorova postavljenih duž rute. Na osnovu kreiranih modela definirani su svi potrebni zaključci za optimalno usmjeravanje mobilnih čvorova. Na osnovu opisanih modela provedena je simulacija te su analizirani dobiveni rezultati. Dobiveni rezultati su uključivali analizu na osnovu potrošnje baterije senzora te potrošnje ukupne energije senzora odnosno čvorova. Rezultati su analizirani na temelju dobivenih grafova unutar programskog alata *CupCarbon*, a grafovi su prikazivali međusobnu ovisnost potrošnje baterije senzora o vremenu simulacije te potrošnje ukupne energije senzora o vremenu simulacije. Na osnovu opisanih rezultata su se izvukli zaključci za svaki pojedini model te je odabran model sa najoptimalnijim rasporedom mobilnih čvorova unutar bežične senzorske mreže.

**Ključne riječi:** optimalno usmjeravanje, bežične senzorske mreže, simulacija, model, mobilna stanica, ruta, senzori, čvorovi.

## ABSTRACT

The topic of this thesis is the optimal routing of mobile nodes in wireless sensor networks. As part of this paper, certain models of wireless sensor networks are defined and created, and based on the simulation and analysis of results, the best ways to route mobile nodes are defined. The model creation and results display are made within the *CupCarbon* software tool designed exclusively to design wireless sensor network models. In the practical example, three models were created with different mobile station movement routes, while the start and end points of the route are the same in all three models. Each model consisted of a mobile station, the route that that mobile station runs, and sensor nodes placed along the route. Based on the created models, all the necessary conclusions for optimal routing of mobile nodes are defined. Based on the described models, a simulation was performed and the obtained results were analyzed. The results obtained included analysis based on the battery consumption of the sensor and the consumption of the total energy of the sensor or nodes. The results were analyzed on the basis of the obtained graphs within the *CupCarbon* software tool, and the graphs depicted the interdependence of the sensor battery consumption on the simulation time and the total sensor energy consumption on the simulation time. Based on the results described, conclusions were drawn for each model and the model with the most optimal arrangement of mobile nodes within the wireless sensor network was selected.

**Key words:** Optimal Routing, Wireless Sensor Networks (WSN), simulation, model, mobile station, route, sensors, nodes.

## ŽIVOTOPIS

Mateo Leovac rođen je 15.07.1996. godine u Hannoveru, Njemačka. Osnovnu i srednju školu je završio u Odžaku, Bosna i Hercegovina. Tijekom pohađanja osnovne i srednje škole sudjelovao je u različitim izvannastavnim aktivnostima od kojih mu je nogomet glavna aktivnost. Uz to, redovito je sudjelovao i osvajao nagrade na školskim i županijskim natjecanjima iz matematike kao i nizao odlične uspjehe iz svih ostalih predmeta. Po završetku srednjoškolskog obrazovanja 2014. godine upisuje preddiplomski studij Elektrotehnike na Fakultetu Elektrotehnike, Računarstva i Informatičkih Tehnologija (FERIT) u Osijeku. Nakon uspješno završene prve godine studija odabire smjer Komunikacije i Informatika. Dvije godine uspješno predstavlja svoj Fakultet u sportu na Elektrijadi – međunarodnom natjecanju studenata Elektrotehnike. 2017. godine završava trogodišnji ciklus školovanja na preddiplomskom studiju Elektrotehnike sa temom završnog rada „Prerada konvencionalnog automobila u električno vozilo“ te time stječe titulu prvostupnika Elektrotehnike. Iste godine upisuje sveučilišni diplomski studij Fakulteta Elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, izborni blok Komunikacijske tehnologije. Osim studiranja bavi se različitim izvannastavnim aktivnostima gdje stiče iskustvo rada u zajednici te na različitim studentskim poslovima. Član je udruge „Prsten“ unutar koje redovito sudjeluje u organizaciji različitih sportskih i humanitarnih manifestacija.

## PRILOZI

- CD
  - Elektronička verzija rada (document u *.docx* i *.pdf* formatu)