



IoT-polje

Ekosustav umreženih uređaja i usluga za
Internet stvari s primjenom u poljoprivredi

EP2: Bežična mreža uređaja za primjenu Interneta stvari u poljoprivredi

Energetski učinkovito praćenje okoliša u preciznoj poljoprivredi korištenjem bežičnih senzorskih mreža temeljenih na tehnologiji LoRa

izv. prof. dr. sc. Višnja Križanović

Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek

Završna radionica projekta

6. studeni 2023., Zagreb



Europska unija
zajedno do fondova EU



EUROPSKI STRUKTURNI
I INVESTICIJSKI FONDOVI



Operativni program
KONKURENTNOST
I KOHEZIJA



REPUBLIKA HRVATSKA
Ministarstvo znanosti i
obrazovanja

Projekt „IoT-polje: Ekosustav umreženih uređaja i usluga za Internet stvari s primjenom u poljoprivredi“ sufinancira Europska unija iz
Europskog fonda za regionalni razvoj u okviru Operativnog programa Konkurentnost i kohezija 2014.-2020. Republike Hrvatske

Sadržaj:

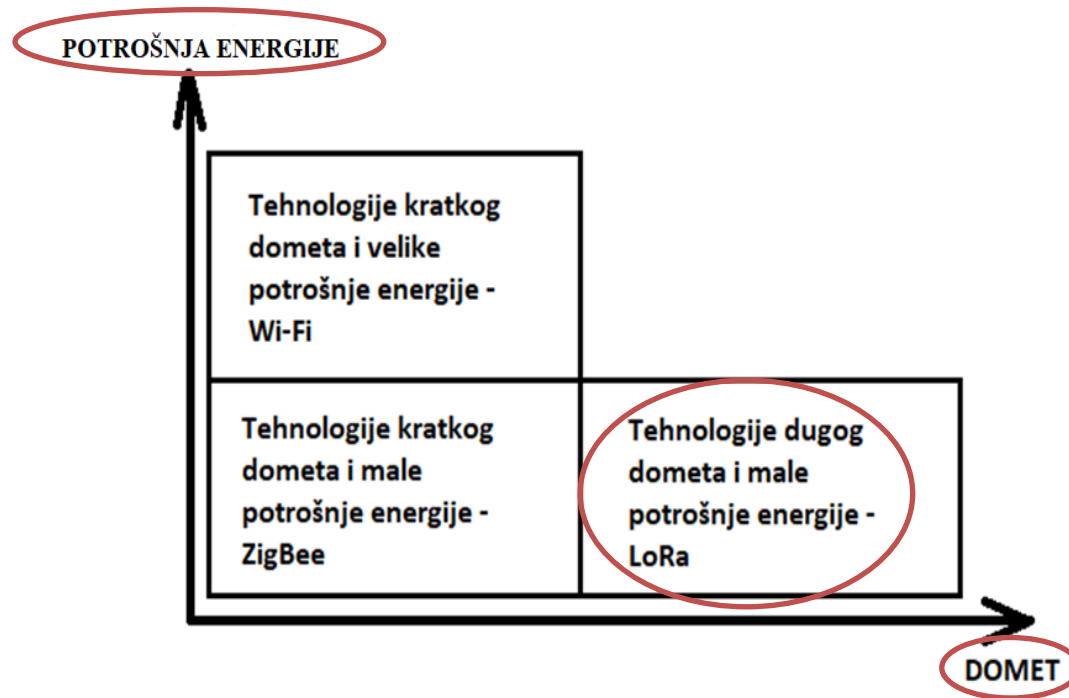
- I. Uvod
- II. Izbor odgovarajućih tehnoloških rješenja u bežičnim senzorskim mrežama u **simuliranom okruženju** s obzirom na **energetske aspekte i domet**
 - Izbor odgovarajućih postavki mrežne komunikacije
 - Izbor odgovarajuće količine mrežnog prometa
- III. Postavljanje razvijene bežične mreže u **ispitna okruženja** i **rad u realnim uvjetima**
 - Izbor ispitnih okruženja
 - Pregled rezultata dobivenih mjerenjima na terenu
- IV. Provedba mjerenja u **laboratorijskim uvjetima** i na tome zasnovane analize provedene u simulacijskom okruženju
 - Izbor odgovarajućih postavki mrežne komunikacije
 - Izbor odgovarajućih energetske modele
- V. Zaključak

I. Uvod

- U sklopu projekta „IoT polje” razmješteni senzorski čvorovi u ispitnim okruženjima namijenjeni su prikupljanju podataka o okolišu i fiziološkim parametrima usjeva
- Pri implementaciji bežične senzorske mreže bitno je voditi računa o:
 - **optimizaciji potrošnje energije**
 - **ostvarivanju maksimalne moguće uštede energije**
- **Izbor tehnoloških rješenja** koja se koriste u komunikaciji u senzorskim mrežama uvelike utječe **na potrošnju energije u mrežama** - bitan je **izbor adekvatnih tehnoloških rješenja za ostvarivanje energetski učinkovite komunikacije**
- Kako se radi o senzorskim očitanjima **nije riječ o velikoj količini podataka**, međutim potrebno je osigurati njihov **prijenos na veće udaljenosti** od nekoliko kilometara do nekoliko desetaka kilometara

II. Izbor odgovarajućih tehnoloških rješenja

- Kako je, uz domet, energetska učinkovitost jako bitan parametar, u daljnjoj analizi je iz svake grupe, osim iz grupe tehnologija dugog dometa velike potrošnje energije čiji su predstavnici mobilne mreže, odabrana po **jedna tehnologija kao predstavnik** te je dana **usporedba potrošnje energije** u takvim mrežama



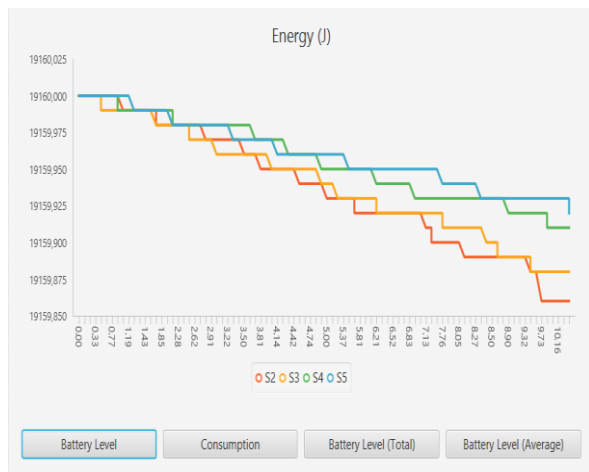
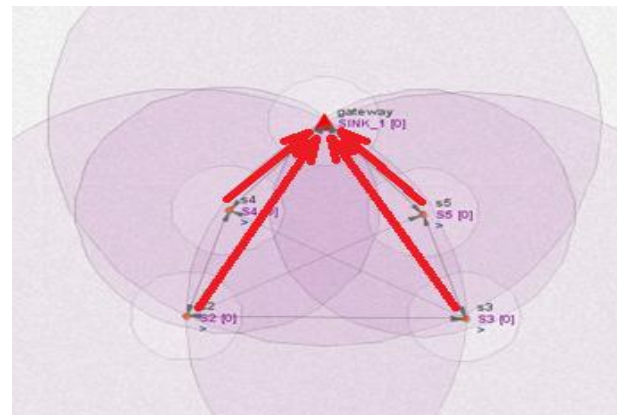
II. Izbor odgovarajućih tehnoloških rješenja (2)

Provedene aktivnosti u sklopu EP2:

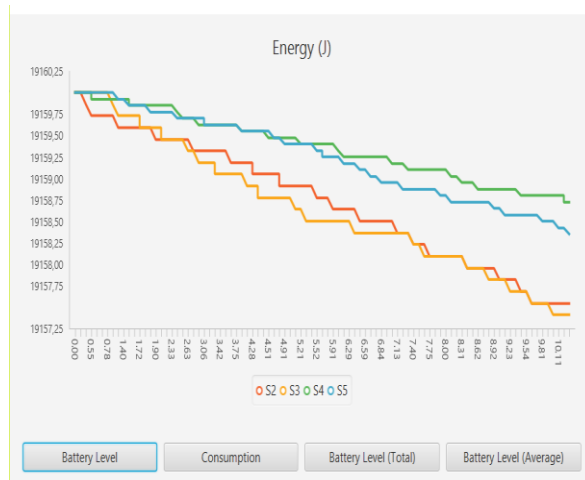
- Simulacijski postupci za izbor odgovarajućih rješenja s obzirom na energetske aspekte i domet

a) Analizirana je **potrošnja energije** ovisno o izboru odgovarajućih tehnoloških rješenja

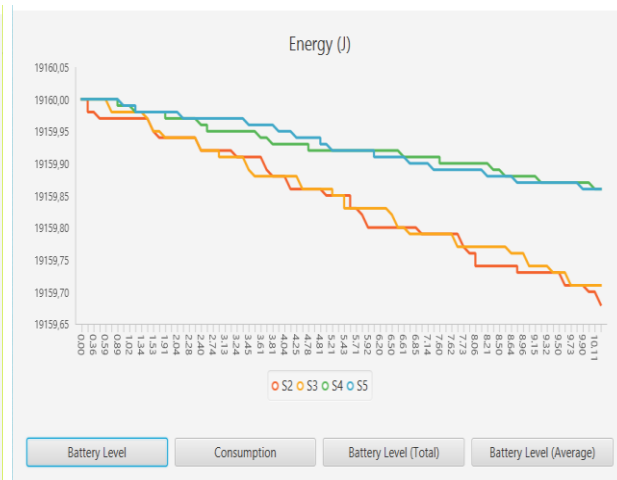
Mrežna topologija:



ZigBee



Wi-Fi



LoRa

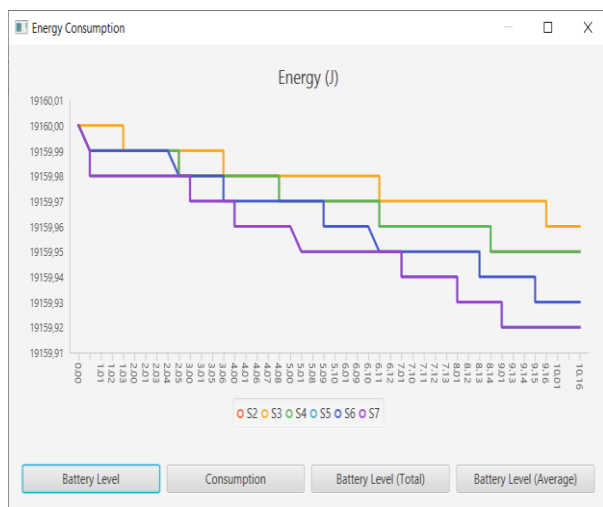
- **Wi-Fi tehnologija** ima **veću potrošnju energije** u odnosu na primjere u kojima se koristi **LoRa ili ZigBee**.
- Iako je Zigbee tehnologija nešto energetske učinkovitija od LoRa-e, LoRa tehnologija je u ovom slučaju ipak najbolji izbor zbog većeg dometa pokrivanja područja signalom potrebnog za projekt IoT-polje.

II. Izbor odgovarajućih tehnoloških rješenja (3)

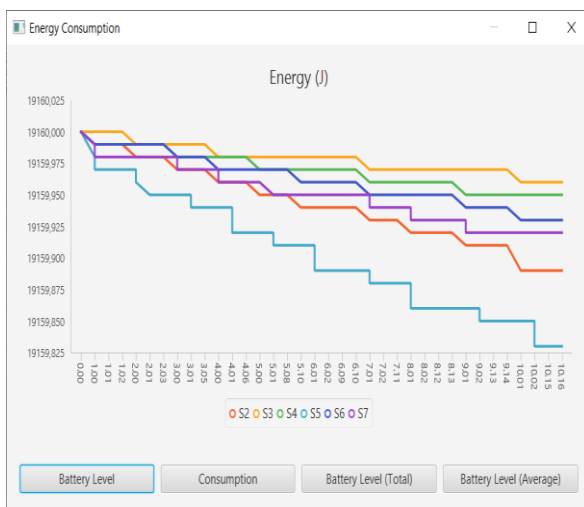
Provedene aktivnosti u sklopu EP2:

- Simulacijski postupci za izbor odgovarajućih rješenja s obzirom na energetske aspekte i domet

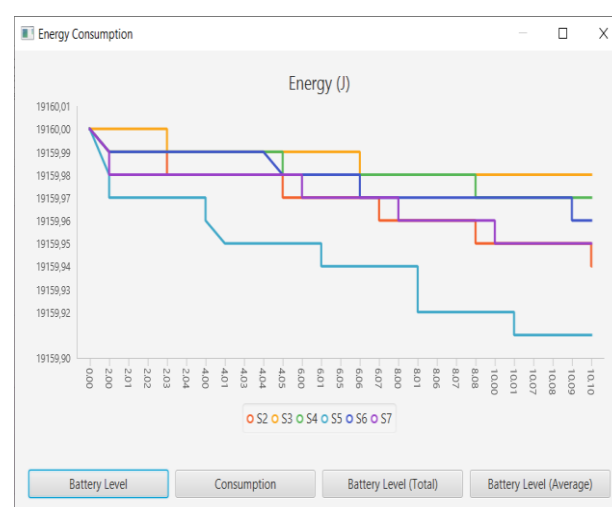
b) Analizirana je **potrošnja energije** ovisno o izboru odgovarajuće količine **mrežnog prometa**



- Kontinuirano slanje podataka sa senzorskih čvorova **različito udaljenih** od pristupnika



- **Različita količina podataka** koja se šalje sa senzorskih čvorova jednako udaljenih od pristupnika



- **Rjeđe slanje podataka** sa senzorskih čvorova prema pristupniku

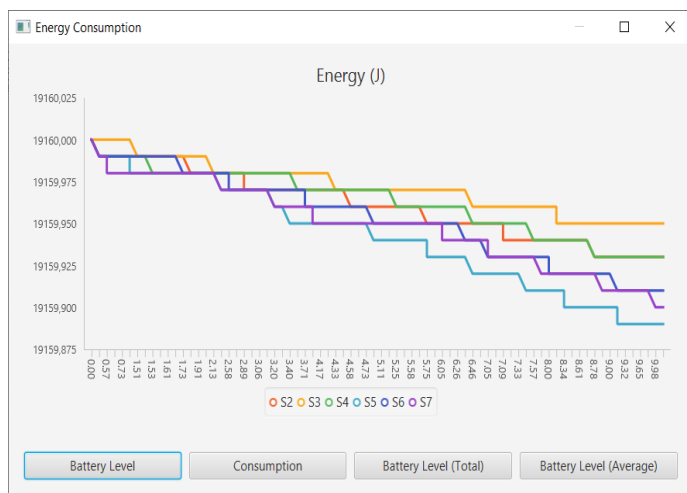
Primjene LoRa tehnologije su moguće u svim IoT projektima gdje se ne zahtjeva brzo slanje velike količine podataka, dok se dodatna **ušteta energije** može **postići slanjem manje količine podataka kroz dulje vremenske periode između slanja.**

II. Izbor odgovarajućih tehnoloških rješenja (4)

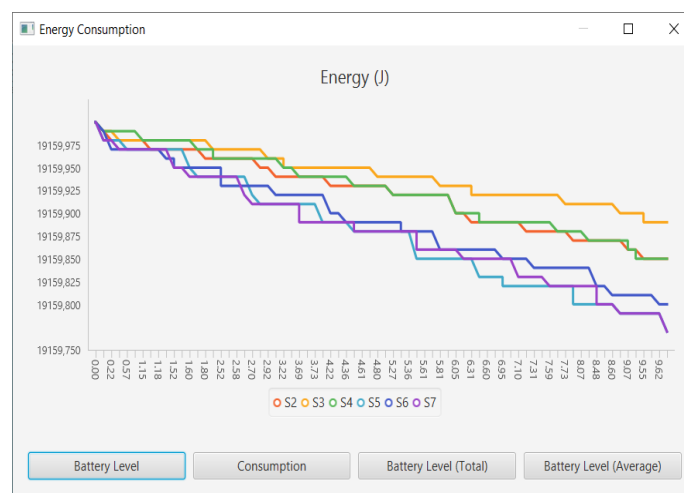
Provedene aktivnosti u sklopu EP2:

- Simulacijski postupci za izbor odgovarajućih rješenja s obzirom na energetske aspekte i domet

c) Analizirana je **potrošnja energije** ovisno o izboru odgovarajućih **postavki mrežne komunikacije**



- Potrošnja energije uz SF=7 i CR=4/8



- Potrošnja energije uz SF=12, i CR=4/5

Faktor širenja (eng. *Spreading Factor*, SF): vrijednost između 6 i 12, veća vrijednost → više vremena potrebno za slanje paketa → veći domet komunikacije.

Brzina kodiranja (eng. *Code Rate*, CR): $CR = 4/(4 + n)$, gdje je n od 1 do 4, veća vrijednost → kraće vrijeme za prijenos podataka → manja potrošnja energije.

Uz zadržavanje istog iznosa definiranog parametrom SF, povećanjem CR vrijednosti s 4/8 na 4/5, potrošnja energije se smanjuje!

III. Postavljanje razvijene bežične mreže u ispitna okruženja

a. Izbor ispitnih okruženja

- Provedena je analiza ponašanja LoRa komunikacijskih veza u različitim okruženjima s obzirom na **usporedbu** uspješnosti prijenosa informacija pri različitim veličinama paketa.
- Terenski eksperimenti na hardverskim prototipovima LoRa uređaja. Mjerenja su provedena korištenjem RFM95/96/97/98(W) LoRa modula kako bi se utvrdilo **kako parametri** poput **pojačanja antene primopredajnika**, faktora širenja signala i brzine kodiranja utječu na komunikaciju.
- Uspoređena su **dva načina korištenja prijenosne snage**, način u kojem se koriste **male snage** (*Low Power*, LP) odašiljanja i način u kojem se koriste **velike snage** (*High Power*, HP) **odašiljanja**, te se analizira njihov utjecaj na domet komunikacije.

III. Postavljanje razvijene bežične mreže u ispitna okruženja (2)

b. Izbor primopredajnika korištenog u ispitnim okruženjima

Transceiver	Current Consumption							
	Transmit					Receive	Sleep	References
	20 dBm	14 dBm	13 dBm	7 dBm	2dBm			
HopeRF RFM95/96/97/98(W)	120 mA	-	29 mA	20 mA	-	11.5 mA (min. 10.8 mA, max. 12.1 mA)	0,2 µA (max. 1 µA)	[76]
HopeRF HM- TRLR-LF/HFS	120 mA	-	35 mA	-	-	16 mA (min. 15 mA, max. 18 mA)	2 µA (max. 3 µA)	[87]
	133 mA	-	-	-	-	16.3 mA	7.7 µA	[88]
Semtech SX1272	124 mA	-	-	18 mA	-	10.5mA or 11.2 mA	0.1 µA (max. 1µA)	[91]
	-	-	-	-	-	11 mA	2 µA	[47], [92]
	-	-	-	-	26 mA	12 mA	40 µA	[48], [92]
	-	-	-	-	-	20 mA	70 µA	[49], [93]
Microchip RN2482	-	38.9 mA	-	-	-	14.2 mA	up to 100- 150 µA	[94], [95], [96], [97]
	-	48 mA	-	-	-	17.2 mA	3.4 mA	[98], [95]
	-	38.5 mA	-	-	23.9 mA	-	-	[99]
	-	-	-	-	-	46 mA	34 mA	[100]

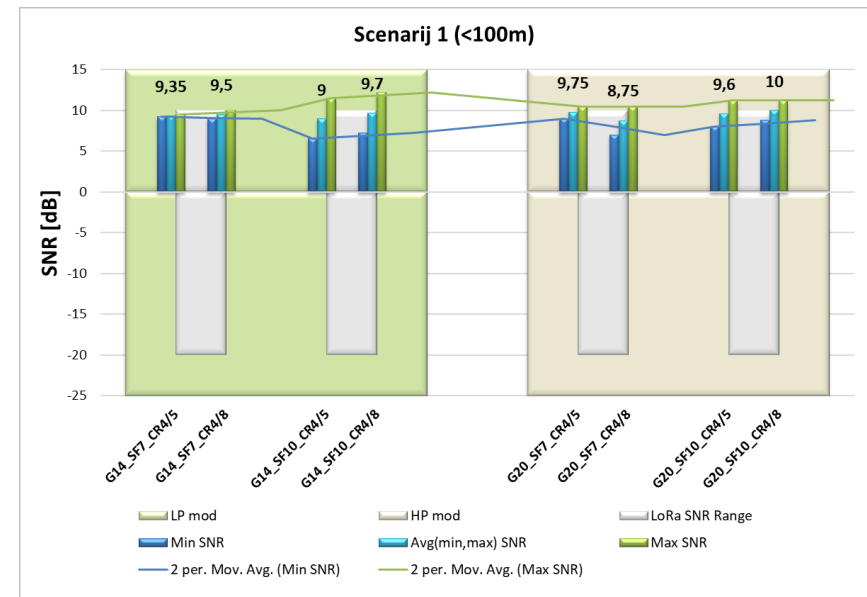
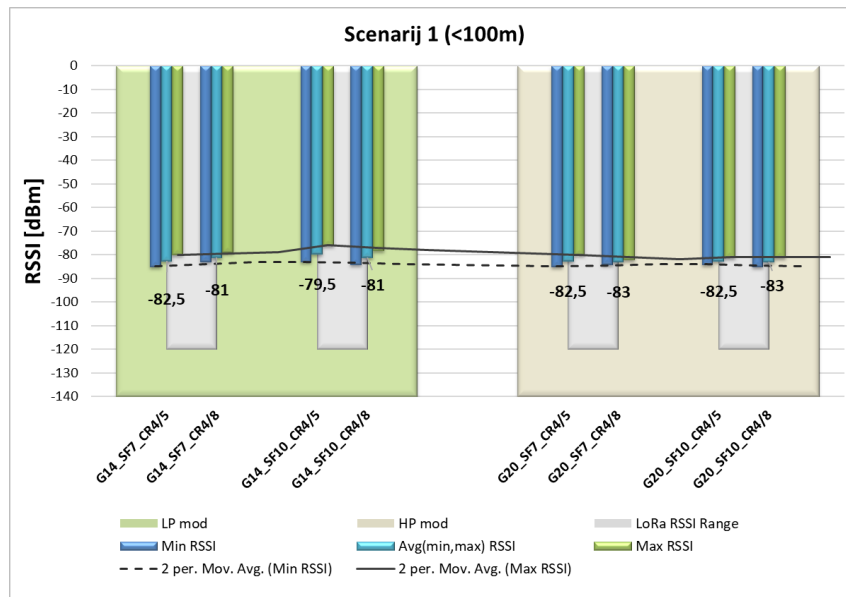
III. Postavljanje razvijene bežične mreže u ispitna okruženja (3)

c. Postavljanje razvijenog senzora u ispitno okruženje i analiza rada u realnim uvjetima

U daljnjim analizama kvalitete komunikacije, **metrike performansi** koje se koriste na **prijemnoj strani** su **indikator jačine primljenog signala (RSSI)** i **omjer snage signala i šuma (SNR)**.

Scenarij 1: Urbani vrt bez izravne optičke vidljivosti (NLOS)

- Udaljenost manja od 100m:



Vrijednosti RSSI parametara poprimaju vrijednosti daleko od graničnih minimalnih vrijednosti.

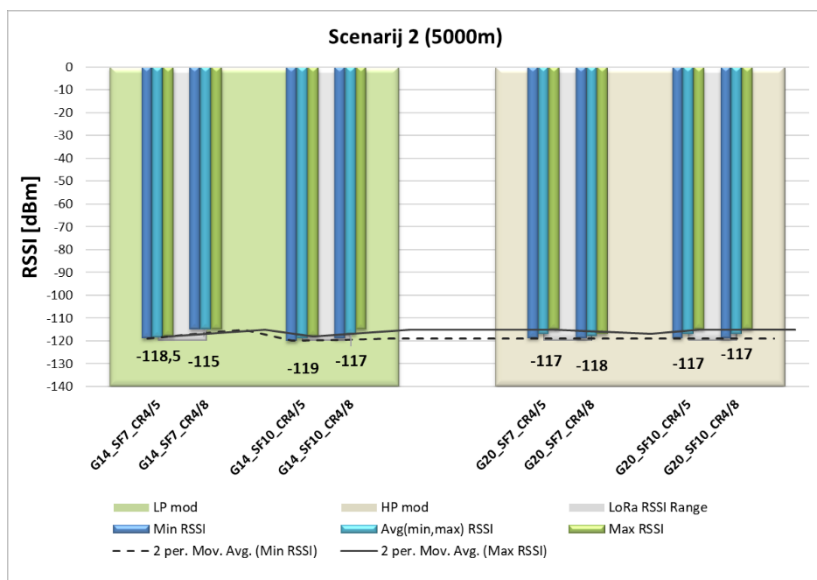
Vrijednosti SNR parametra poprimaju vrijednosti blizu gornjih graničnih vrijednosti.

III. Postavljanje razvijene bežične mreže u ispitna okruženja (4)

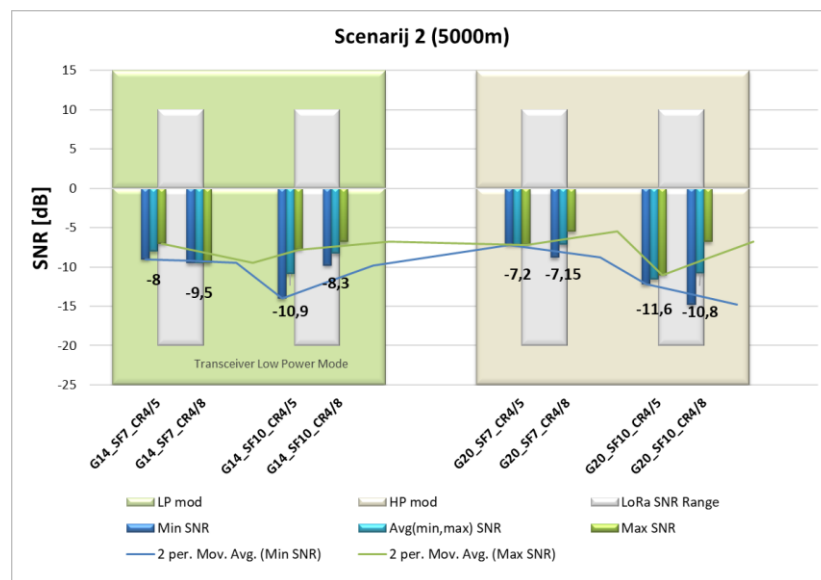
c. Postavljanje razvijenog senzora u ispitno okruženje i analiza rada u realnim uvjetima

U daljnjim analizama kvalitete komunikacije, **metrike performansi** koje se koriste na **prijemnoj strani** su **indikator jačine primljenog signala (RSSI)** i **omjer snage signala i šuma (SNR)**.

Scenarij 2: Suburbani scenarij bez optičke vidljivosti (NLOS) – polja u vlasništvu PIO instituta
- Udaljenost oko 5km:



Vrijednosti RSSI parametara poprimaju vrijednosti blizu graničnih minimalnih vrijednosti.



Vrijednosti SNR parametra poprimaju vrijednosti bliže minimalnim graničnim vrijednostima.

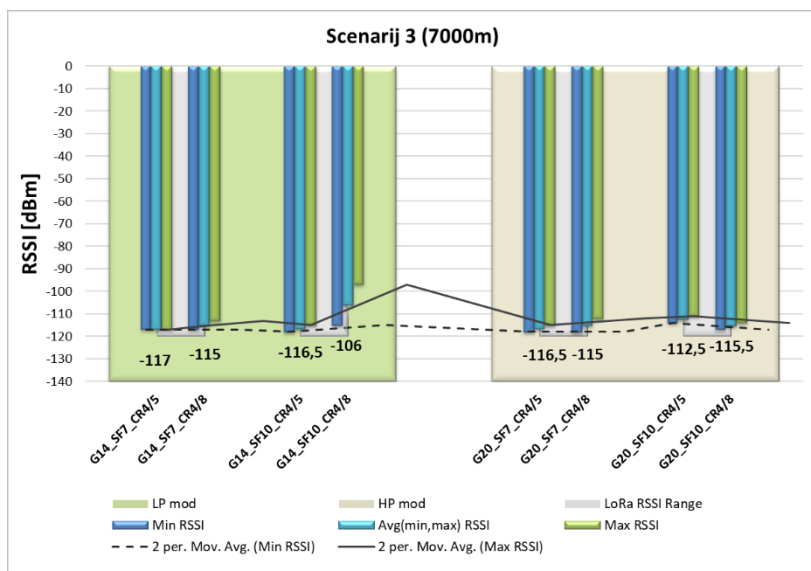
III. Postavljanje razvijene bežične mreže u ispitna okruženja (5)

c. Postavljanje razvijenog senzora u ispitno okruženje i analiza rada u realnim uvjetima

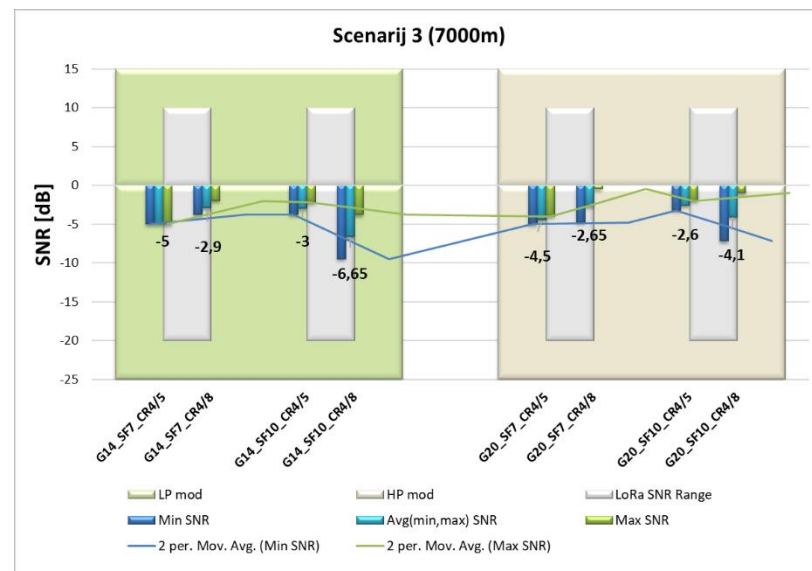
U daljnjim analizama kvalitete komunikacije, **metrike performansi** koje se koriste na **prijemnoj strani** su **indikator jačine primljenog signala (RSSI)** i **omjer snage signala i šuma (SNR)**.

Scenarij 3: Ruralni scenarij s izravnom optičkom vidljivošću (LOS)

- Udaljenost oko 7km:



Vrijednosti RSSI parametara poprimaju vrijednosti blizu graničnih minimalnih vrijednosti.



Vrijednosti SNR parametra poprimaju vrijednosti daleko od minimalnih graničnih vrijednosti.

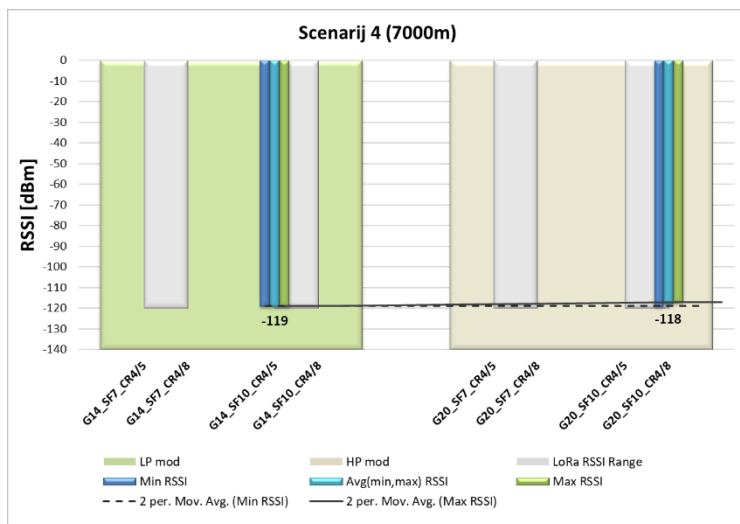
III. Postavljanje razvijene bežične mreže u ispitna okruženja (6)

c. Postavljanje razvijenog senzora u ispitno okruženje i analiza rada u realnim uvjetima

U daljnjim analizama kvalitete komunikacije, **metrike performansi** koje se koriste na **prijemnoj strani** su **indikator jačine primljenog signala (RSSI)** i **omjer snage signala i šuma (SNR)**.

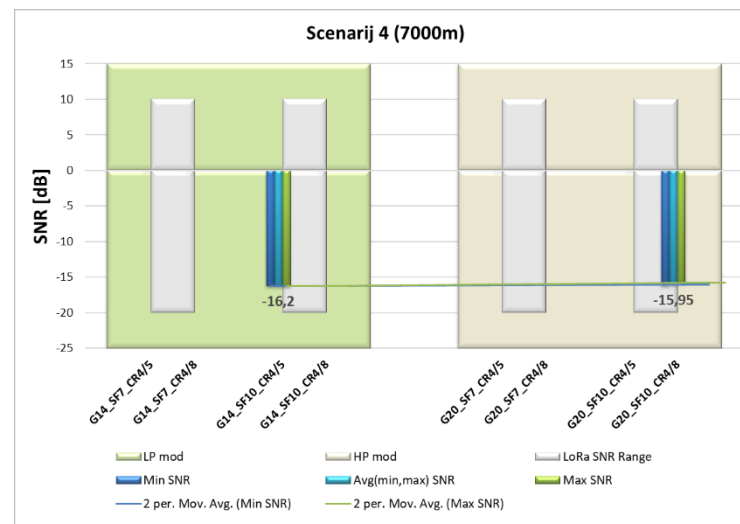
Scenarij 4: Ruralni scenarij bez izravne optičke vidljivosti (NLOS)

- Udaljenost od oko 7km:



Vrijednosti RSSI parametara poprimaju vrijednosti graničnih minimalnih vrijednosti.

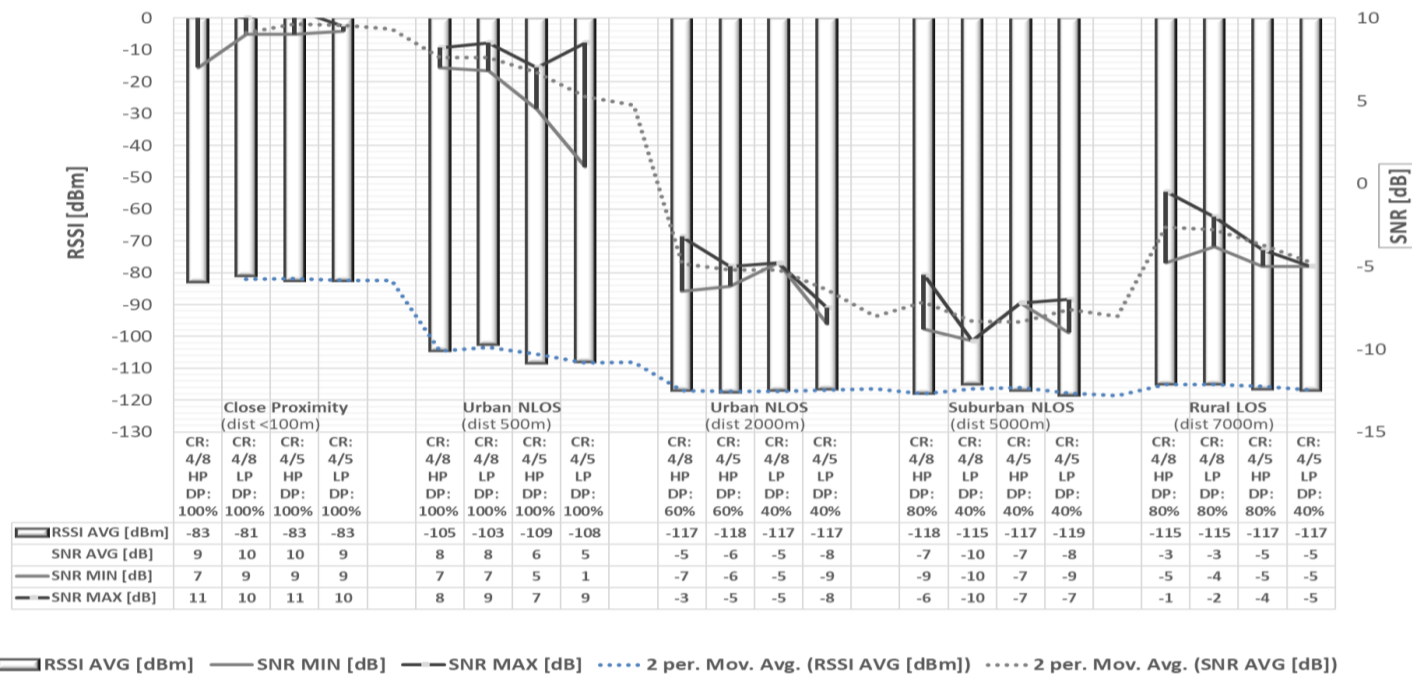
Zabilježeni su gubici pri isporuci paketa pri komunikaciji u kojoj je korišten faktor SF7.



Vrijednosti SNR parametra poprimaju vrijednosti blizu minimalnim graničnih vrijednosti.

III. Postavljanje razvijene bežične mreže u ispitna okruženja (7)

RSSI and SNR Values with Respect to Deployment Scenarios (Pmin, SF7)



Prikazani rezultati prikupljeni su **na temelju** približno ukupno **pet stotina** provedenih mjerenja SNR i RSSI vrijednosti.

Kako se može zaključiti iz dobivenih prikaza, za **snagu signala na manjim udaljenostima** dobivaju se **veće RSSI vrijednosti**.

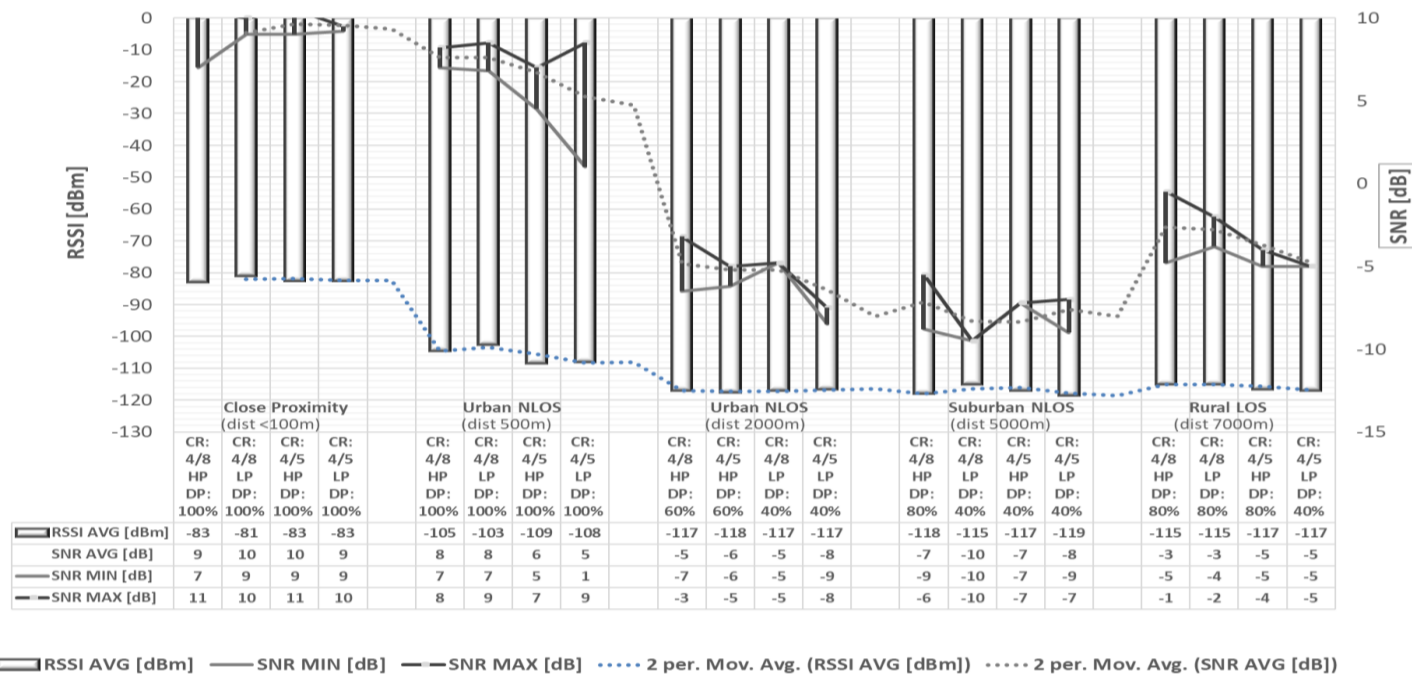
Dobivene RSSI vrijednosti su:

- oko **-80 dBm** na udaljenostima **manjim od 100 m**,
- na udaljenostima **od 500 m** između **-100 dBm** i **-110 dBm**,
- a na još **većim udaljenostima** u rasponu **od -110 dBm do -120 dBm**.

Nadalje, s **povećanjem udaljenosti između odašiljača i prijmnika**, smanjuju se i **vrijednosti SNR parametra**. U **NLOS scenarijima** također se može **primijetiti utjecaj prepreka na SNR**. SNR vrijednosti postaju **negativne na udaljenostima od 2 km**, što znači da **primljeni signal radi ispod donje razine šuma**.

III. Postavljanje razvijene bežične mreže u ispitna okruženja (8)

RSSI and SNR Values with Respect to Deployment Scenarios (Pmin, SF7)



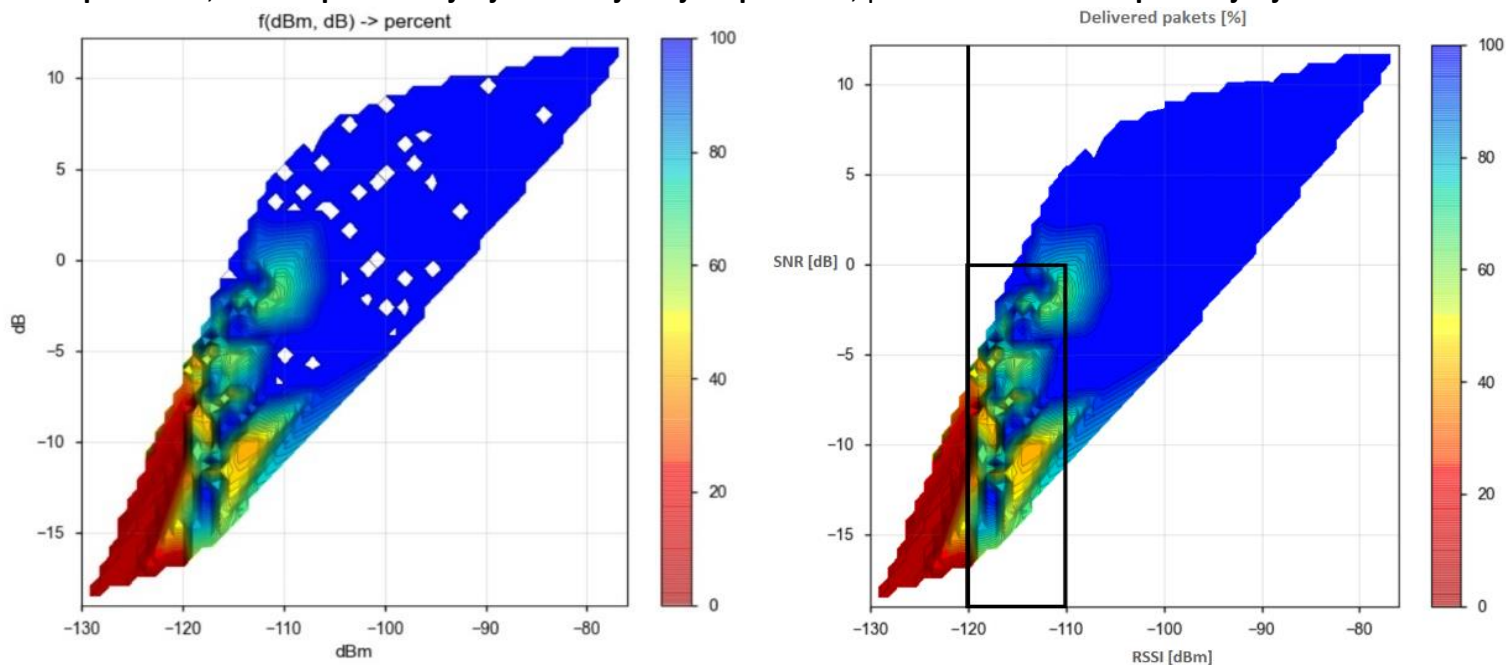
Prosječni uspjeh prikupljenih prijenosa unutar svakog scenarija izračunat je za izmjereni raspon RSSI i SNR vrijednosti, a i neki neuspješni prijenosi su zabilježeni, oni u kojima je DP parametar manji od 100%. Kao što je prikazano na grafu, broj izgubljenih paketa bilježi se za vrijednosti RSSI parametra manjih od -110 dBm, kao i za negativne vrijednosti SNR parametra.

Vrijednosti SNR-a pri kojima se javljaju pogreške prijenosa unutar komunikacijskog procesa ovisе o vrijednosti parametra SF, a donekle i o vrijednostima CR.

Prema prikupljenim rezultatima o neuspjelim prijenosima može se zaključiti da je za SNR<0, ako je potreban pouzdan prijenos podataka, također potrebna i primjena potvrda o isporuci paketa.

III. Postavljanje razvijene bežične mreže u ispitna okruženja (9)

Kako bi se smanjili gubici prijenosa podataka u LoRa komunikaciji, moguće je koristiti mehanizam **adaptivne brzine prijenosa** (*Adaptive Data Rate, ADR*) za **optimizaciju brzine prijenosa podataka, vremena emitiranja i potrošnje energije u mreži**. ADR mehanizam **kontrolira faktor širenja, širinu pojasa i snagu prijenosa senzorskog čvora** kako bi se **optimizirala potrošnja energije uređaja**, istovremeno osiguravajući da se poruke i dalje primaju na pristupnicima. Kako bi odredio **optimalnu brzinu prijenosa podataka**, mrežni poslužitelj mjeri **20 najnovijih uplinkova**, počevši od trenutka postavljanja ADR bita.



Prema dobivenim rezultatima provedenih mjerenja prikazanim na slici, vidljivo je da se **područje gdje dolazi do povećanih gubitaka paketa zbog slabljenja signala nalazi upravo u području SNR vrijednosti navedenih kao graničnih za primjenu ADR-a**. Najveći gubici nastaju pri vrijednostima SNR parametra manjim od -5 dB, ako su RSSI vrijednosti manje od -110 dBm. Nadalje, također je evidentno da u slučaju kada su SNR vrijednosti manje od -5dB, a RSSI vrijednosti su u rasponu od -110 dBm do -120 dBm, ipak dolazi do isporuke podataka, dok u slučaju kada su RSSI vrijednosti manje od -120 dBm to rezultira potpunim gubitkom paketa.

III. Postavljanje razvijene bežične mreže u ispitna okruženja (10)

d. Izbor optimalne veličine paketa

- **Senzori mogu pratiti parametre** koji se odnose **na okoliš i na stanje usjeva**, pa se **podaci u paketu** koriste **za prijenos izmjerenih vrijednosti**, na primjer - *temperature, vlažnosti, tlaka, sunčevog zračenja i padalina*.
- **Optimizacija potrošnje energije u LoRa mreži zahtijeva razmatranje optimalne veličine paketa, pri čemu je za uštedu energije potrebno poslati što manji ukupni promet.**
- Stoga je važno **optimizirati pakete** kako bi se **maksimizirao prijenos korisnih informacija u minimalnom broju bitova**.



- U slučaju senzorskog čvora s više senzorskih elemenata koji imaju sinkronizirana mjerenja, logično je **grupirati sva očitavanja u isti paket**.
- Pri grupnom očitavanju, proces **maksimiziranja prijenosa podataka u najmanje bitova, tj. proces pakiranja bitova**, iskorištava prednosti **binarnog prijenosa** podataka gdje se **bitovi korisnog sadržaja šalju jedan za drugim kako bi se osigurao kompaktan protok informacija**. Pri tome je **važno optimizirati veličinu paketa** kako bi se **maksimizirao prijenos korisnih informacija u minimalnom broju bitova**.

[OPEN Data Format: MeteoHelix IoT Sigfox & LoRaWAN wireless message bit string verifier calculator](#)

This calculator is mean for quick message string payload decoding for MeteoHelix IoT micro weather stations that send a 11 byte bit-shifted string.

OPEN PROTOCOL START BIT (Type) = 1

Input 11 byte string (hex) =	693e0001bf3eb0020000ff										
hex converted to binary =	0110100100111110000000000000001101111100111110101100000000010000000000000001111111NaNNaN										
bit shifting string start position =	1	3th bit	8th bit	19th bit	25th bit	31th bit	40th bit	54th bit	64th bit	73th bit	81th bit
Physical Property Measured =	Type	Battery	Temperature	T_min	T_max	Humidity	Pressure	Irradiation	Irr_max	Rain (revolving)	Min_time_be rain_gauge_
converted to binary =	01	10100	10011111000	000000	000000	011011111	100111110101	0000000001	000000000	00000000	1111111
converted to decimal =	1	20	1272	0	0	223	10198	1	0	0	255
Converted value in output units =	1	4	27.2	0	0	44.6	100990	2	0	0	255
units	n/a	V	C	C	C	%	Pa	W/m2	W/m2	pulses	seconds
resolution	1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.2	5	2	2	1	1
bits	2	5	11	6	6	9	14	10	9	8	8
max no. of values	4	32	2048	64	64	512	16384	1024	512	256	256
min value	0	3	-100	0	0	0	50000	0	0	0	0
max value	3	4.55	104.7	6.3	6.3	102.2	131915	2046	1022	255	255
req min value	0	3	-50	0	0	0	60000	0	0	0	1
req max value	3	4.5	80	3	3	100	128000	1500	100	25	255
Check	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

T_max & Irr_max values are added to the Temperature and Irradiation readings which are currently set to be 10min averages of 15sec measuring intervals. T_min is subtracted from the Temperature reading. Sensor Error or N/A = Maximum possible value for the physical property which in binary = 11111.... (FFFF.... In hex)

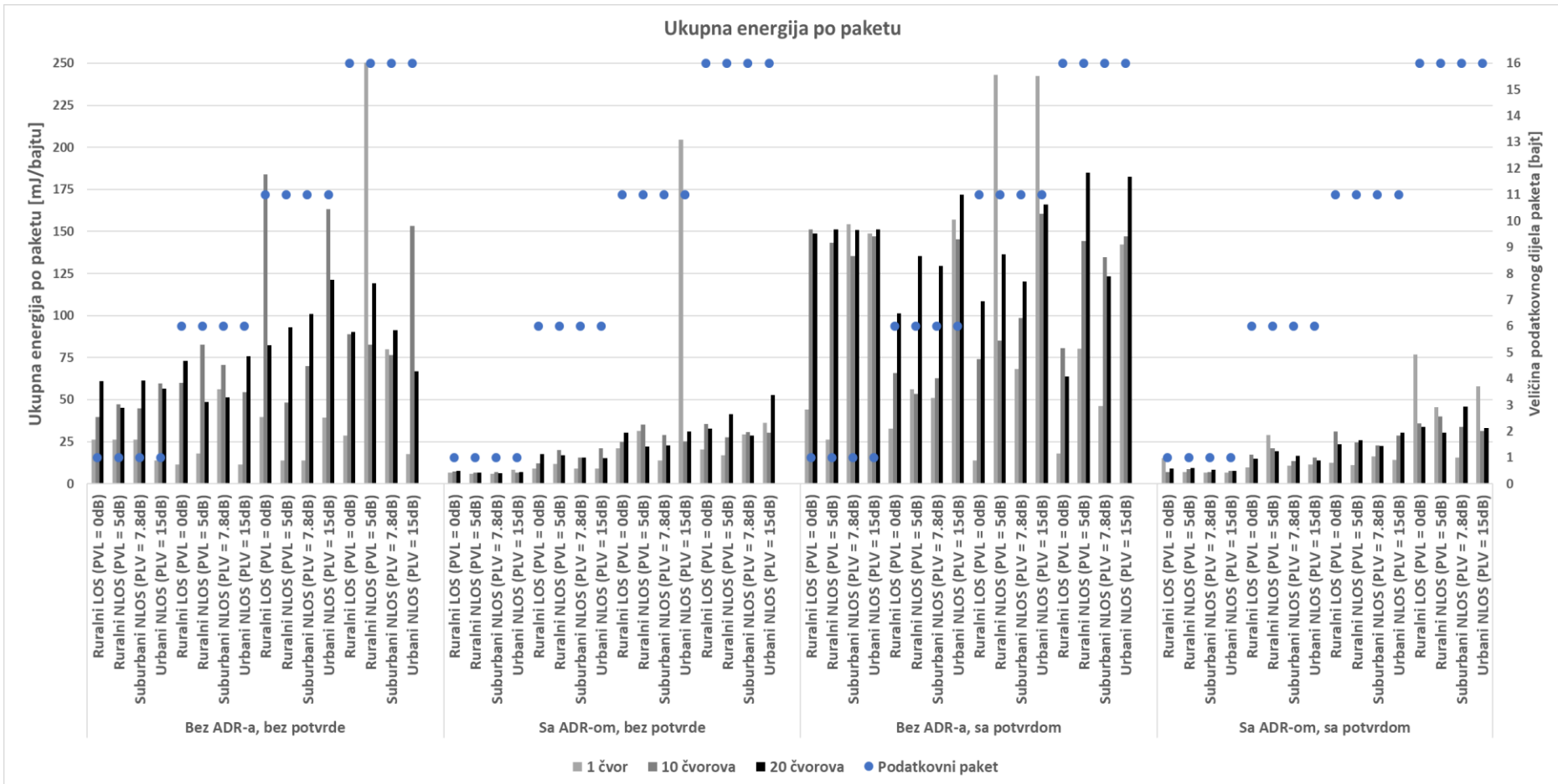
III. Postavljanje razvijene bežične mreže u ispitna okruženja (10)

d. Izbor optimalne veličine paketa

- **Važan aspekt pakiranja bitova** je osiguranje **odgovarajućeg raspona i preciznosti podataka**. Mnoga **fizička mjerenja** mogu se **komprimirati u manje bitne prikaze podataka**.
- Na primjer, za **prijenos informacija o temperaturi okoliša** može se koristiti **8-bitna reprezentacija**, prikazana u tablici, **umjesto 11-bitne**. Ona omogućuje prikaz **temperaturnog raspona** od -40°C do $+87,5^{\circ}\text{C}$, što je dovoljno za prikaz **traženih temperatura s visokom točnošću**. Isto vrijedi i za **ostale parametre okoliša koje prate senzori**.
- Na primjer, **6-bajtni format korisnih podataka** prikazan u tablici odgovara **optimalnom skupu podataka potrebnih za praćenje parametara okoliša**, koji može pružiti istu **količinu korisnih informacija kakvu može prikazati i 11-bajtni paket** u kojem se koristi veći broj bitova za prikaz istih parametara kao i 6-bajtni paket.

Packet payload format: 6-byte payload						
Measured parameter	Battery	Temperature	Humidity	Atmospheric Pressure	Irradiation	Rain
Bit start position	1st bit	6th bit	14th bit	23rd bit	35th bit	44th bit
No. of bits	5	8	9	12	9	5
Value in binary	10100	10000110	011011111	100101101011	000000001	00000000
Value in units	4	27.0	44.6	100987	3	0
Units	V	$^{\circ}\text{C}$	%	Pa	W/m^2	pulses
Resolution	0.05	0.5	0.2	17	3	1
Max no. of values	32	256	512	4096	512	32
Min - max value	3 - 4.55	-40 - 87.5	0 - 102.2	60000 - 129632	0 - 1536	0 - 32
Req min - max values	3 - 4.5	-50 - 80	0 - 100	60000 - 128000	0 - 1500	0 - 25
Check	OK	OK	OK	OK	OK	OK

S obzirom na navedeno, provedena je simulacija koja prikazuje **vezu između veličina paketa i utrošene energije za njihovo slanje.**



Rezultati pokazuju da je **optimizacija** parametara kao što je i **veličina korisnog tereta** ključni element u **smanjenju potrošene energije** od strane senzorskog čvora!

IV. Testiranje u laboratorijskim uvjetima

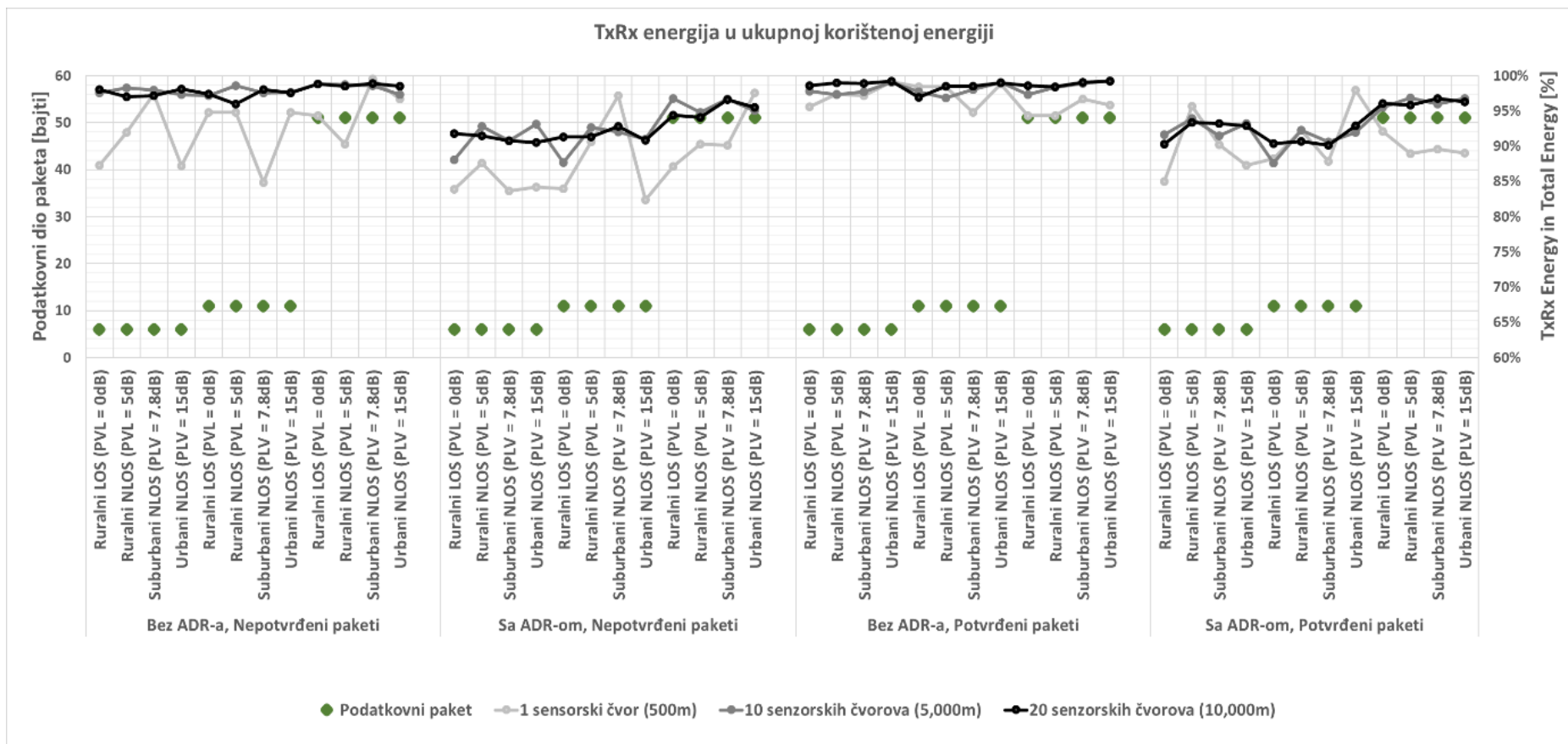
LoRa uređaji su dizajnirani za efikasnu i minimalnu potrošnju energije. Potrošnja energije ovisi o tome koliko je vremena uređaj proveo u određenom stanju i o klasi uređaja koja se koristi za prijenos podataka.

Uređaj može biti u jednom od sljedećih stanja: **slanja podataka**, **primanju podataka** ili **sleep načinu rada**. Kako bi se postigla maksimalna efikasnost potrošnje energije, uređaj prelazi u *sleep* način rada kada završi slanje ili primanje podataka. **Najviše energije se troši prilikom slanja podataka.**

Transceiver	Potrošnja							
	Slanje (Transmit)					Primanje (Receive)	Stanje mirovanja (Sleep)	Referenca
	20 dBm	14 dBm	13 dBm	7 dBm	2 dBm			
HopeRF RFM95/96/97/98(W) – specifikacija u dokumentaciji	120 mA	-	29 mA	20 mA	-	11.5 mA (min. 10.8 mA, max. 12.1 mA)	1 μ A	[16]
RFM 95W – testiranje u laboratorijskim uvjetima	120 mA	-	-	-	-	13 mA	2 μ A	-



Ove poznate i potvrđene pretpostavke korištene su pri daljnjoj analizi gdje je razmatrana **TxRx energija u ukupnoj korištenoj energiji**.



- Energija u stanjima prijensa (Tx) i primanja (Rx) najviše pridonosi ukupnoj potrošnji energije.
- Međutim, energija u stanju mirovanja ima značajniji udio u ukupnoj energiji ako se koristi ADR dok su potvrde izostavljene.

V. Zaključak

- Primjena LoRa tehnologije se pokazala kao najbolji izbor zbog većeg dometa pokrivanja područja signalom potrebnog za projekt IoT-polje.
- Dodatna ušteda energije može se postići slanjem manje količine podataka kroz dulje vremenske periode između slanja.
- Uz zadržavanje istog iznosa definiranog parametrom SF, povećanjem CR vrijednosti s 4/8 na 4/5, potrošnja energije se dodatno smanjuje!
- Rezultati istraživanja pokazuju da je optimizacija parametara kao što je i veličina korisnog tereta ključni element u smanjenju potrošene energije od strane senzorskog čvora!
- U provedenim ispitnim scenarijima korišteni su indikator jačine primljenog signala (RSSI) i omjer snage signala i šuma (SNR) te su utvrđeni optimalni uvjeti prijenosa
- Primjenom mehanizma adaptivne brzine prijenosa (*Adaptive Data Rate, ADR*) moguće je postići optimizaciju brzine prijenosa podataka, vremena emitiranja i potrošnje energije u mreži

Publikacije:

1. V. Križanović, D. Čačić, K. Grgić, D. Žagar, „**Energy Efficiency of LoRa based Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring and Precision Agriculture**”, Proceedings of The Eighteenth Advanced International Conference on Telecommunications (**AICT 2022**), Porto, Portugal, ThinkMind, 2022.
2. J. Spišić, A. Pejković, M. Zrnić, V. Križanović, K. Grgić, and D. Žagar, “**LoRaWAN Parameters Optimization for Efficient Communication**,” Proceedings of the International Conference on Smart Systems and Technologies (**SST**), **2022**.
3. Križanović, Višnja, Krešimir Grgić, Josip Spišić, and Drago Žagar. 2023. "An Advanced Energy-Efficient Environmental Monitoring in Precision Agriculture Using LoRa-Based Wireless Sensor Networks" **Sensors 2023**, no. 14: 6332. <https://doi.org/10.3390/s23146332>
4. **Tehničko izvješće D2.2: Analiza rada bežične senzorske mreže za prikupljanje okolišnih parametara sa poljoprivrednih usjeva**, 2023.