

ANALIZA SPEKTRA BEŽIČNIH MREŽA GRADSKOG STADIONA POLJUD

Bedalov, Mate

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:627178>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-08**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Specijalistički diplomski stručni studij Informacijska tehnologija

MATE BEDALOV

ZAVRŠNI RAD

**ANALIZA SPEKTRA BEŽIČNIH MREŽA GRADSKOG
STADIONA POLJUD**

Split, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Specijalistički diplomski stručni studij Informacijska tehnologija

Predmet: Upravljanje poslužiteljima otvorenog koda

Z A V R Š N I R A D

Kandidat: Mate Bedalov

Naslov rada: Analiza spektra bežičnih mreža Gradskog stadiona Poljud

Mentor: dipl. ing. Valentini Kožica, predavač

Split, rujan 2020.

**Ovaj rad napravljen je uz suglasnost i pod kontrolom osoblja
Gradskog stadiona Poljud i nogometnog kluba Hajduk.**

Korištenje ovih materijala za ometanje rada bežičnih sustava u vlasništvu kluba povlači odgovornost po Kaznenom zakonu Republike Hrvatske

U Splitu 25.08.2020.

Predsjednik uprave

HNK Hajduk

Marin Brbić

SADRŽAJ

SAŽETAK	4
SUMMARY	5
1. UVOD	6
2. TEORIJSKI DIO	7
2.1. BEŽIČNE TEHNOLOGIJE	7
2.1.1. Generacije Wi-Fi uređaja	7
3. TEHNIČKI DIO	14
3.1. ALATI	14
3.1.1. MetaGeek Chanalyzer	14
3.1.2. Ekahau Site Survey	14
3.1.3. Acrylic Wi-Fi Professional - TRIAL	15
3.1.4. Cisco Wireless LAN Controller	15
3.1.5. Ubiquiti Networks	15
3.2. METODA MJERENJA	16
3.3. OBRADA PODATAKA	21
3.3.1. MetaGeek Chanalyzer	21
3.3.2. Ekahau Site Survey	22
3.3.3. Acrylic Wi-Fi Professional	23
3.3.4. Cisco Wireless LAN Controller	24
3.3.5. Ubiquiti Networks	26
3.3.6. Ostali podaci	27
3.4. REZULTATI MJERENJA 2.4 GHz SPEKTRA	28
3.4.1. Broj klijenata na Wi-Fi sustavima – Cisco WLC	28
3.4.2. Broj pristupnih točaka – Cisco WLC	29
3.4.3. Broj klijenata na Wi-Fi sustavima – Chanalyzer, Acrylic i Ekahau	32
3.4.4. Snage signala pristupnih točaka	35
3.4.5. Razina šuma	35
3.4.6. Kvaliteta kanala	37

3.4.7.	Vizualni prikaz svih paketa na 2.4 GHz kanalima tokom utakmice	38
3.5.	REZULTATI MJERENJA 5 GHz SPEKTRA	42
3.6.	OTKRIVANJE I OGLAŠAVANJE BEŽIČNIH MREŽA	45
3.7.	OSVRT NA REZULTATE	48
3.8.	MOGUĆA POBOLJŠANJA	51
3.8.1.	Izmjene na 2.4 GHz	51
3.8.2.	Izmjene na 5 GHz	52
4.	ZAKLJUČAK	54
5.	LITERATURA	55

SAŽETAK

Prostori unutar i oko Gradskog stadiona Poljud u Splitu idealna su prilika da se testiraju sustavi bežičnih mreža različitih kvaliteta, osobina i generacija.

Trenutni sustavi koji se koriste plod su višegodišnjeg razvoja te se istovremeno koristi više različitih sustava različitih proizvođača koji zajedno sa signalima obližnjih zgrada te poslovnica u najmu ispod tribina stadiona stvaraju okoliš prepun različitih signala i mnogo gušenja. Kada se ovome doda 30 000 gledatelja s dodatnim stotinama dijeljenja mreže spektar 2.4 GHz postaje gotovo neiskoristiv.

Uređaji pod kontrolom kluba odašilju i na frekvencijskom opsegu na 5 GHz no zbog obližnje vojne baze i luke nautičkog turizma radarski signali su jaki i učestali te time jako ometaju rad i na ovom dijelu spektra.

Cilj ovog rada je pratiti sve odašiljače i klijente na oba spektra, simulirati mjerenja u za to pripadajućim alatima te pokušati pronaći objašnjenja i rješenja zapaženih efekata.

Ključne riječi: Stadionski Wi-Fi, Wi-Fi, Wi-Fi visoke gustoće

SUMMARY

Spectrum analysis of wireless networks at Poljud City Stadium

The spaces inside and around the Poljud City Stadium in Split are an ideal opportunity to test wireless network systems of different qualities, characteristics, and generations.

The current systems used are the result of many years of development and use several different wireless systems from different manufacturers that together with the signals of nearby buildings and outlets under the stadium stands create an environment full of different signals and a lot of interference. When 30,000 viewers are added to this, with an additional hundred hotspot shares, the 2.4 GHz spectrum becomes almost useless.

Devices under the control of the club also transmit at 5 GHz frequency band, but due to the nearby military base and nautical tourism port, radar signals are strong and frequent, thus also greatly interfering with wireless in this part of the spectrum.

The aim of this paper is to monitor all transmitters and clients on both spectrums, to simulate measurements in the appropriate tools and to try to find explanations and solutions for the observed effects.

Keywords: Stadium Wi-Fi, Wi-Fi, High density Wi-Fi

1. UVOD

Sve veće potrebe za pokrivenosti Wi-Fi signalom, kao i povećana upotreba raznih aplikacija u svakodnevnim poslovnim zadacima ukazali su na određene probleme to jest ograničenja u tome što se s Wi-Fi sustavom može postići.

Učinkovitost koju pojedini uređaji mogu ostvariti u idealnim uvjetima daleko su od onoga što je očigledno u stvarnim uvjetima. Područja s velikom gustoćom klijenata i uz to pristojnim dozama šuma (engl. interference) su veliki problem za stabilnost bežičnih mreža, te ograničavaju upotrebu potrebnih alata koji bi se oslanjali samo na bežičnu mrežu.

Razumijevanje svih ključnih komponenti i učinkovitosti svih sustava koji okružuju ciljani Wi-Fi sustav postaje jako bitno, te se alati kao što su konstantno skeniranje spektra (engl. Spectrum analyzing) i automatsko mijenjanje kanala (engl. auto channel), usmjeravanje klijenata s 2.4 GHz antene na 5 GHz (engl. band steering), više prostornih tokova (engl. spatial stream) te adaptivne antene (engl. beamforming) postale nezaobilazni alati svake pristupne točke današnje profesionalne Wi-Fi opreme.

Svi ovi alati upotpunjeni poslužiteljskim resursima (kontroleri sustava pristupnih točki) u realnom vremenu računaju idealne uvjete, izgled usmjerenog snopa signala i prilagodbu šumu za sve svoje klijente. Koristeći profesionalna Wi-Fi rješenja i ispravnom konfiguracijom istih, mogu se jamčiti maksimalne performanse za ciljane aplikacije to jest usluge i kada su uvjeti izazovni.

Gradski stadion Poljud može primiti tridesetak tisuća gledatelja te je tako ultimativni izazov za svaki Wi-Fi sustav. U ovom radu objašnjeni su sustavi, učinkovitost i ograničenja koja trenutni sustav stadiona ima.

Kako bi se testiralo kako funkcionira Wi-Fi mreža za potpune popunjenosti stadiona ovaj rad obrađuje podatke snimljene s više alata i na više pozicija za vrijeme utakmice 7. kola HT Prve lige: Hajduk - Dinamo odigrane 31.08.2019. godine.

Na temelju prikupljenih podataka objašnjeno je ponašanje Wi-Fi sustava kako bi se dobio prikaz promjena na vremenskoj crti te se moglo pratiti stanje prije, za vrijeme i nakon utakmice.

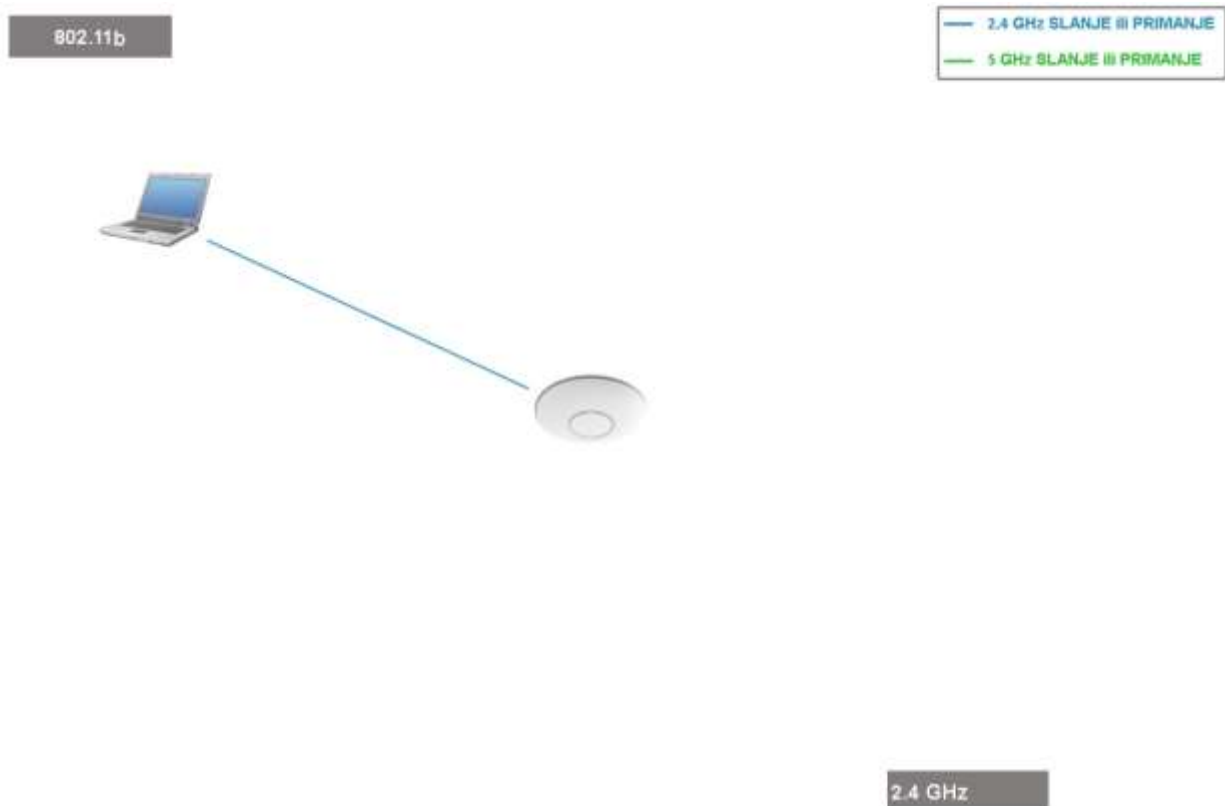
2. TEORIJSKI DIO

2.1. BEŽIČNE TEHNOLOGIJE

Kako bi se razumjelo promatrane efekte treba proučiti metode i mogućnosti komunikacije svih promatranih Wi-Fi sustava. Kako se u ovom ambijentu nalaze sve generacije Wi-Fi pristupnih točaka (engl. access points) tako su i sve generacije i mogućnosti tih uređaja u većoj ili manjoj mjeri zastupljene u krajnjem problemu. Same generacije definirane su verzijama 802.11 protokola koji su ih obilježili.

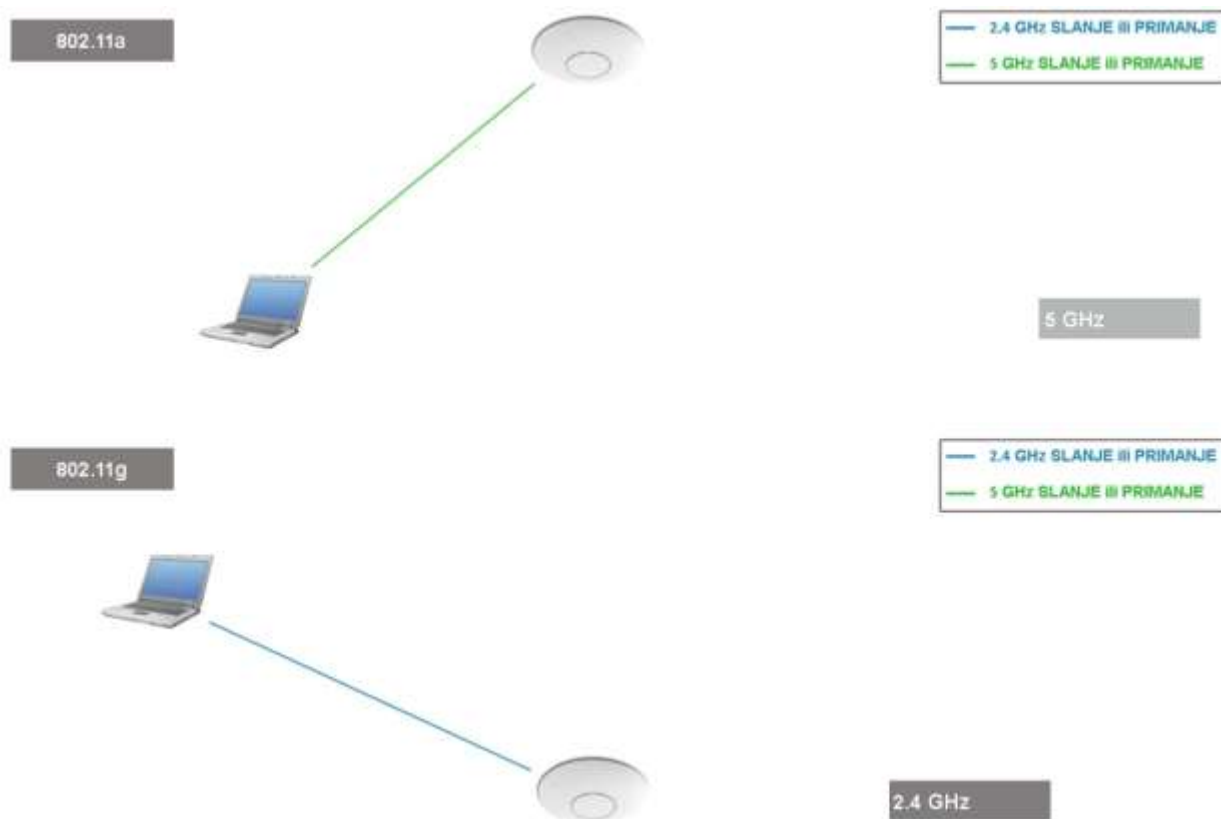
2.1.1. Generacije Wi-Fi uređaja

Prva generacija Wi-Fi uređaja **802.11b** odašiljala je samo na frekvencijama od 2,4 GHz. Podaci putuju od klijenta do pristupnih točaka putem CSMA_CA protokola. Maksimalna brzina 11 Mbps dobrim dijelom odlazi na zaglavlja i protokole pa je stvarna brzina kod najčešćeg TCP-a do 5,9 Mbps. Promet se kao na slici 1 odvija između jednog klijenta i pristupne točke.



Slika 1: 802.11b

Druga generacija **802.11a** radila je na frekvencijama 5 GHz i omogućila je brzinu do 54 Mbps. Treća generacija dolazi tek nakon par godina. **802.11g** standard brzinu na 2.4 GHz diže na 54 Mbps. Pristupne točke (slika 2) po prvi puta mogu imati i obje antene i raditi istovremeno na dva kanala te time mogu spojiti dva klijenata istovremeno. Pošto pristupna točka može imati antene na oba frekvencijska spektra (2.4 GHz i na 5 GHz) ukupna brzina pristupne točke podiže se na 108 Mbps.

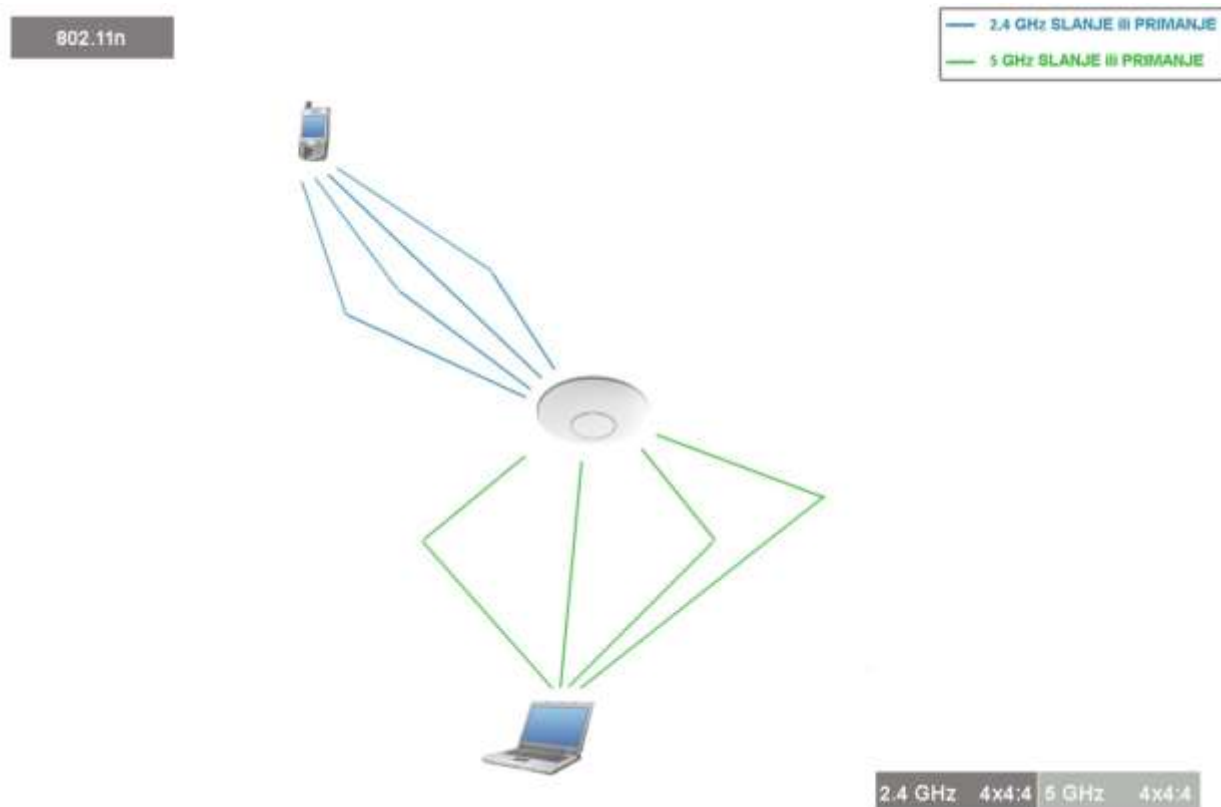


Slika 2: 802.11a i 802.11g

Četvrta generacija (slika 3), **802.11n** donosi veliko povećanje brzine. Maksimalna brzina raste na 600 Mb/s te je prvi standard koji radi i na 2.4 i na 5 GHz. Definiran 2009. godine i danas je u praksi najzastupljeniji standard.

Ovdje dolazi i do najvećeg iskoraka u tehnologiji. Uvodi se tehnologija više prostornih tokova gdje se koristi više antena za slanje i primanje podataka jednog klijenta (engl. MIMO), te ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje (engl. OFDM). Umjesto jednog signala u jedinici vremena, šalje se mnogo malih signala u kraćim vremenskim intervalima (primjena Fourierovih transformacija na signal). Ta modulacija signala će se na strani prijehvata demodulirati te se time može postići veća brzina.

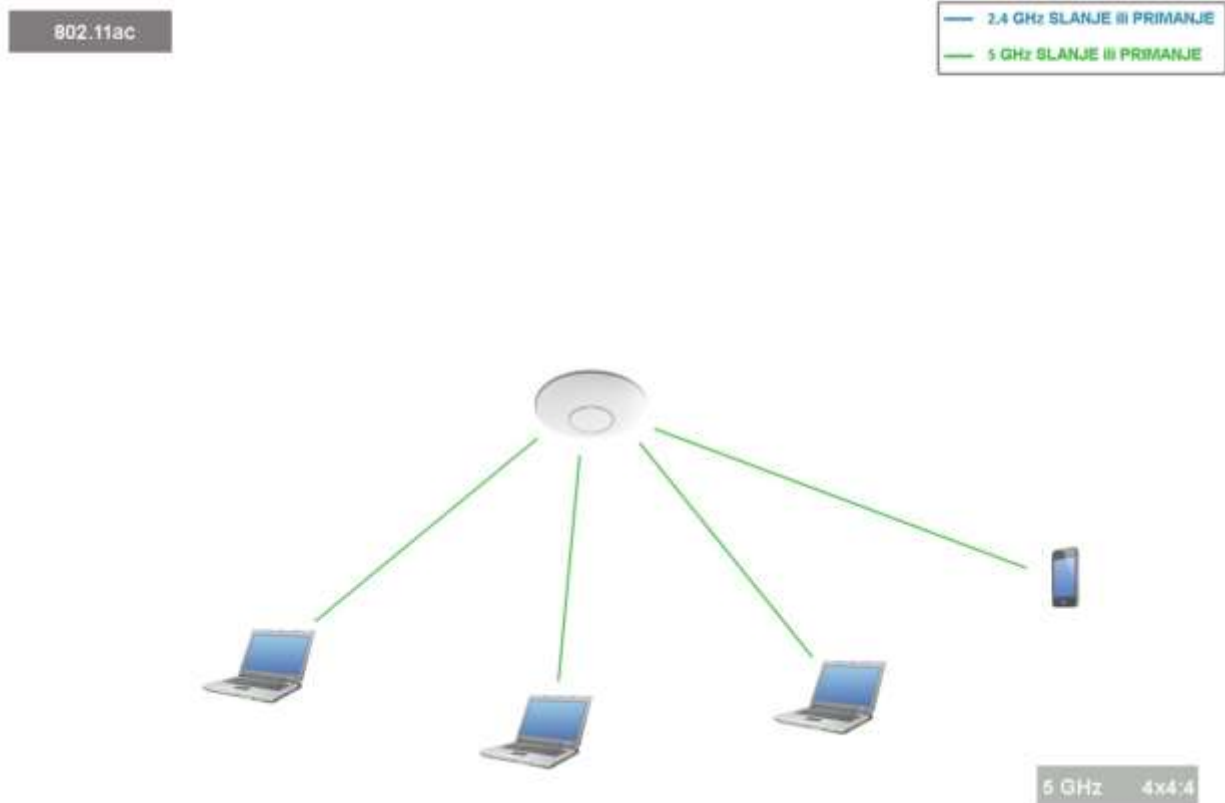
Uz ovo povećava se i moguća širina kanala na 40 MHz te se samim time po potrebi dobivaju dva puta veće brzine. Kod ovog standarda moguće je da jedan klijent ostvari četiri različite veze, prostorna toka, s pristupnom točkom te tako ostvari 4 puta veću brzinu.



Slika 3: 802.11n

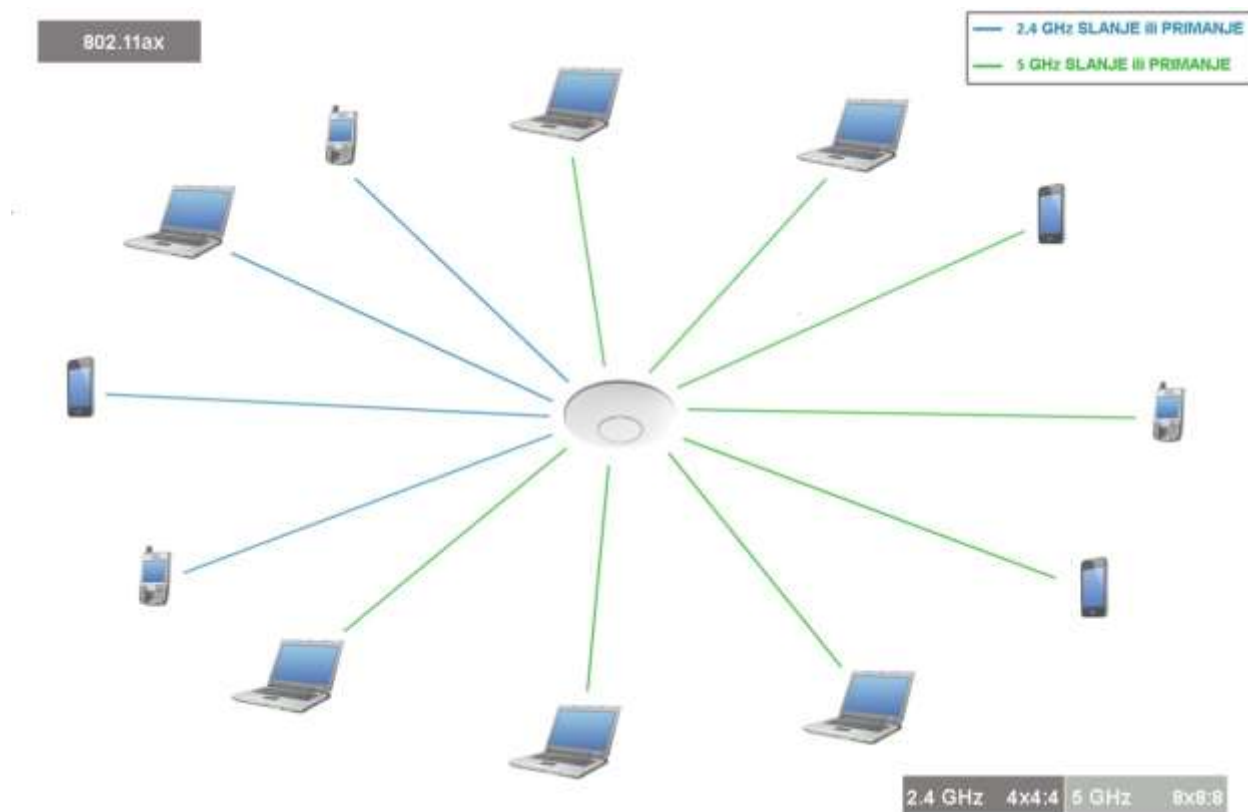
Godine 2014. izlazi i **802.11ac** standard, peta generacija Wi-Fi uređaja, no koristi se samo na 5 GHz frekvencijama. Na slici 4 se vidi maksimalan broj klijenata koji istovremeno mogu razgovarati s pristupnom točkom. Ako fizička rasprostranjenost klijenata dopušta da svaki od njih priča samo s jednom od antena koja ima oblik usmjeren u tom smjeru i ne smeta ostalim antenama iste pristupne točke, može se imati i do 4 različita korisnika koji primaju podatke u isto vrijeme na istom kanalu.

Uređaji korisnika u praksi najčešće imaju mogućnosti jednog ili dva prostorna toka tako da u slučaju da se neka od ovih veza ne koristi jedan korisnik može iskoristiti više prostornih tokova. Ukupna brzina raste na 3467 Mbps. Velikim dijelom jer se omogućava širenje kanala na 160 MHz te se samim time, ako za to postoje uvjeti, dobiva 4 puta veća brzina. Pristupne točke s ovim standardom rade u kombinaciji s n standardom na 2,4 GHz te se ukupna propusnost pristupne točke diže na 4614 Mbps.



Slika 4: 802.11ac

2019. godine dolazi i 802.11ax (slika 5) koji donosi dvostruko više prostornih tokova i MU-MIMO slanje za klijente. Pojedinačna brzina klijenta koji sada može koristiti 8 prostornih tokova na 5 GHz kanalu dolazi do 9607 Mbps. Dok će pristupna točka zajedno s 1147 Mbps na 2,4 GHz moći ukupno propustiti 10,754 Gbps. Ovakve teoretske brzine se neće pojavljivati u praksi te su moguće samo u kontroliranim uvjetima te su se iz ovog razloga svi najpoznatiji proizvođači pristupnih točaka odlučili za mrežne kartice brzine 2,5 Gbps na pristupnim točkama.



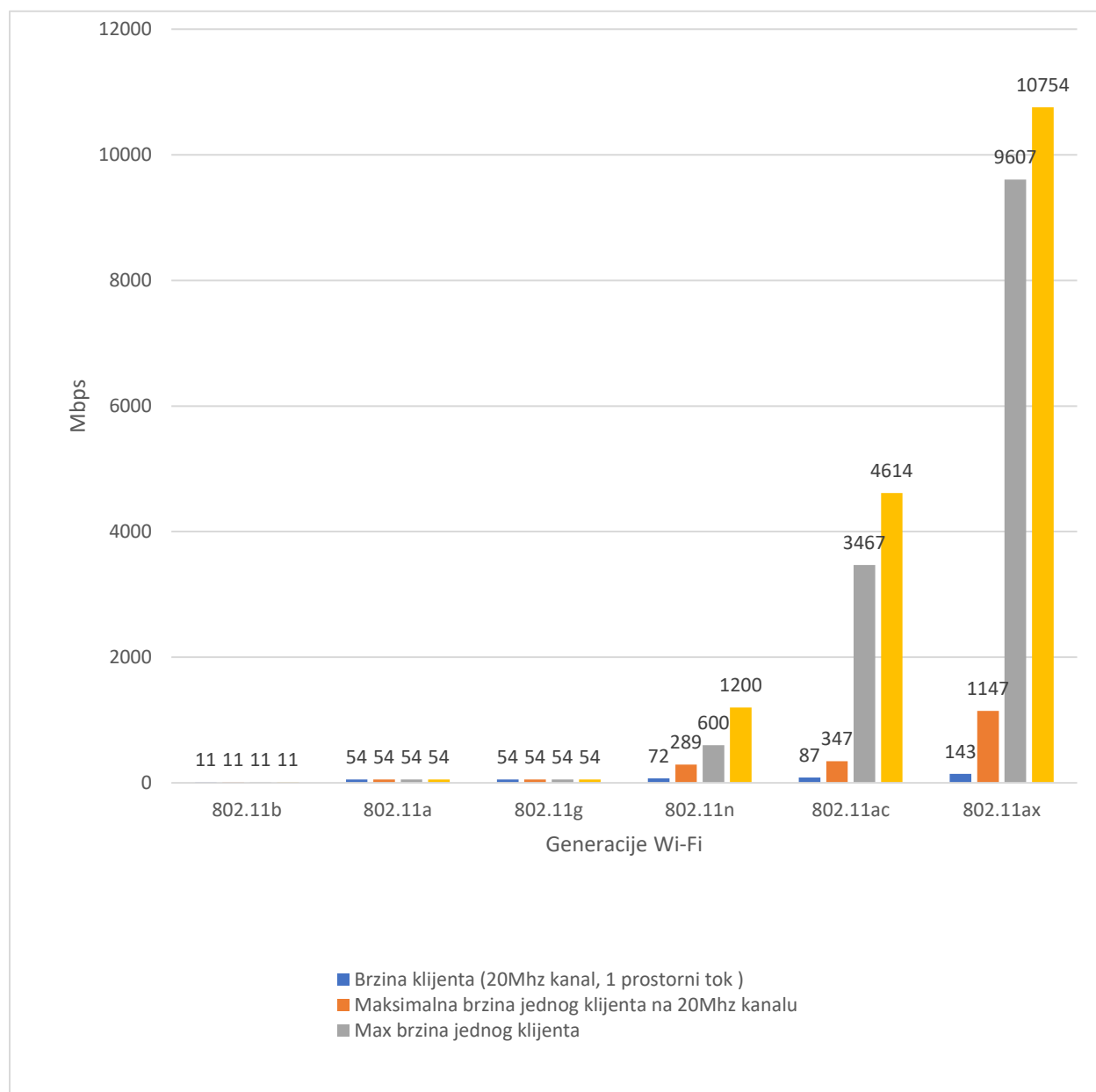
Slika 5: 802.11ax

Najveća prednost ove generacije nije u tome da će povećati ukupnu brzinu svih klijenata već je u tome što kod mogućnosti spajanja više uređaja može doći do bitnog ubrzanja mreže koja često „pati“ kod velike gustoće uređaja. U slučajevima visoke gustoće klijenata zbog boljeg iskorištavanja spektra može se očekivati ubrzanja do 40 %.

To je postignuto jer se tehnologija ortogonalnog frekvencijskog multipleksiranja koja se koristila za slanje mnogo malih signala u kraćim vremenskim intervalima umjesto jednog velikog

signala u jedinici vremena, a koristila se u ranijim protokolima za jednog klijenta, sada može koristiti za mnogo klijenata i može se rascjepkati na više malih nositelja. S dosadašnjih 52 na 234. To u praksi znači da se 20 MHz kanal kod svakog slanja dijeli na barem deset malih 2 MHz kanala. Svaki taj mali kanal će prenijeti do 14 Mbps što znači da će u slučaju da postoje klijenti koji imaju sitne podatke moći istovremeno slati. Ova funkcija će uvelike pomoći kod velikog broja IoT uređaja u budućnosti.

Na slici 6 vide se već gore spomenute generacije protokola te njihove teoretske brzine. Vidi se nagli porast brzine kod svake nove generacije kako po pojedinačnom korisniku tako i po ukupnoj brzini pristupne točke.



	Wi-Fi1 802.11b	Wi-Fi2 802.11a	Wi-Fi3 802.11g	Wi-Fi4 802.11n	Wi-Fi5 802.11ac	Wi-Fi6 802.11ax
Brzina klijenta (20 MHz kanal, 1 prostorni tok)	11	54	54	72	87	143
Maksimalna brzina jednog klijenta na 20 Mhz kanalu	11	54	54	289	347	1147
Maksimalna brzina jednog klijenta	11	54	54	600	3467	9607
Maksimalna ukupna brzina svih kliienata (2.4 GHz+ 5 GHz)	11	54	54	1200	4614	10754

Slika 6: Usporedba brzina kod svih generacija Wi-Fi sustava

3. TEHNIČKI DIO

3.1. ALATI

3.1.1. MetaGeek Chanalyzer



Slika 7: Primjer mjerenja spektra s Wi-Spy DBx antenom i Chanalyzerom

Chanalyzer zajedno s antenom Wi-Spy DBx, je analizator spektra koji mjeri Wi-Fi i slične aktivnost u oba spektra 2,4 GHz i 5 GHz. Chanalyzer koristi prikupljene podatke iz Wi-Spy DBx s ciljem pružanja vizualnog pregleda Wi-Fi mreža okruženja u stvarnom vremenu.

Štoviše, pregled se može i spremiti te se tako dobije višesatni snimak svega što se događalo u dijelu spektra koje koristi Wi-Fi. S ovim programom snimljeno je, i u ovom radu obrađeno, nešto više od 4 sata događanja na 2,4 GHz dijelu spektra te se naknadno iz te snimke kroz tablice i grafikone prikazala većina podataka u ovom radu.

3.1.2. Ekahau Site Survey

Ekahau je program koji se koristi za predikciju i mjerenje Wi-Fi sustava. U njemu se simuliraju ili pak mjere sve prepreke (zidovi, plafoni, pregrade, materijali) te se dobiva prikaz performansi Wi-Fi sustava.

Ekahau također može pregledavati cijeli spektar te prikazati sve Wi-Fi mreže, no za razliku od Chanalyzera ne može pohraniti duže vremenske periode te vidjeti drugačije signale (koji nisu Wi-Fi), a rade moguće šumove. Zbog tog razloga podatke iz ovog programa uzimalo se uzimanjem slike zaslona u pravilnim intervalima od desetak minuta.

3.1.3. Acrylic Wi-Fi Professional - TRIAL

Ovaj program radi mjerenje na oba spektra te uzima podatke o svim pristupnim točkama, vremenu pojavljivanja, kanalu, širini kanala, protokolu, proizvođaču.

U ovom slučaju nije korištena dodatna profesionalna antena, pa se nisu pratili i klijenti na svim mrežama što ovaj program može. Program je na krovu stadiona pratio sve mreže tijekom utakmice te uz popis od tristotinjak mreža snimio i protokole koje podržavaju.

3.1.4. Cisco Wireless LAN Controller

Trenutni Wi-Fi sustav na Poljudu sadrži 18 Cisco pristupnih točaka od čega su 4 uređaja na tribinama stadiona te su oni i njihovi klijenti obrađeni u ovom radu. Ostalih 14 uređaja nalazi se u zatvorenim prostorima stadiona (uredi, press saloni, hodnici, itd.) te se samo rijetki od njih detektiraju na tribinama.

Iz tog razloga je broj klijenata na istima, iz razloga što nisu u doticaju s tribinama stadiona izbačen iz krajnjeg rezultata. U unutrašnjim se prostorima zbog slabije pokrivenosti uglavnom klijenti spajaju na 2,4 GHz te tu ima dvadesetak stalnih uposlenika koji se nalaze u unutrašnjim prostorima stadiona tokom cijele utakmice. Kako bi podaci o klijentima na tribinama bili što točniji te time i podaci o korištenju 2,4 i 5 GHz spektra, ovi su klijenti izbačeni iz krajnjih rezultata broja klijenata.

Svaka Cisco pristupna točka prati zagušenje spektra na kanalu na kojem radi, te prati zabranjene kanale (zbog detektiranih radara) na 5 GHz. Kao i kod Ekahaua podaci iz ovog programa spremljeni su uzimanjem slike zaslona u pravilnim intervalima od desetak minuta.

3.1.5. Ubiquiti Networks

Trenutni Wi-Fi sustav na Poljudu sadrži i desetak Ubiquiti Networks uređaja s pripadajućim upravljačkim sučeljem no svi ti uređaji su na vanjskom obodu stadiona (ulazi) te se koriste za interne potrebe osoblja. Na samom sustavu je tokom cijele utakmice bilo desetak uređaja.

3.2. METODA MJERENJA

Kako bi izmjerili što se događa s Wi-Fi sustavima za vrijeme većih utakmica na Gradskom stadionu Poljud potrebno je snimiti što se događa na cijelom spektru frekvencija koje koriste Wi-Fi sustavi. Kako bi se to uradilo koristi se neko od profesionalnih programskih rješenja te profesionalna oprema (antenu) kako bi se prikupilo maksimalno informacija o radu svih sustava te što točnije, sa što više potvrda, utvrdili što se događa.

Kako učinkovitost opada s vremenom te brojem posjetitelja podaci koje treba skupiti moraju biti sakupljeni dugi vremenski period prije, za vrijeme i nakon utakmice.

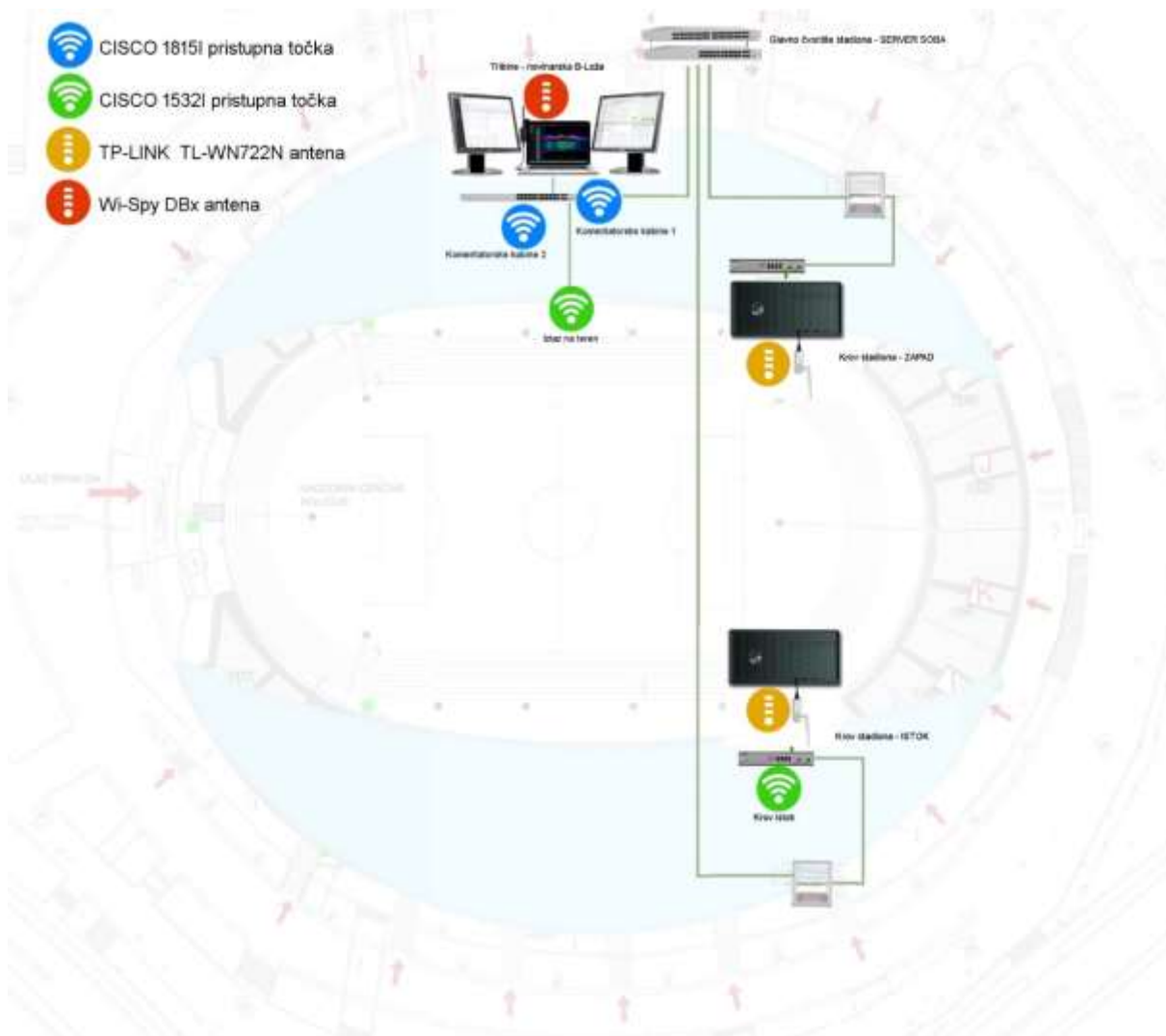
Logičke i fizičke pristupne točke, kako stalne tako i privremene (engl. hotspot), klijenti, količina podataka, šum, iskorištenost kanala i brojni drugi podaci potrebni su nam kako bi kao krajnji rezultat dobili ocjenu svakog mogućeg kanala u svakom mogućem vremenu. S takvim rezultatima mogu se predvidjeti najoptimalnije postavke za sve Wi-Fi sustave na stadionu, te podešavajući one pod kontrolom stadiona izvući najbolje performanse sustava.



Slika 8: Fotografija stadiona s lokacijama mjerenja

Za potrebe mjerenja (slika 8) na kupolu stadiona postavljene su dvije TP-LINK TL-WN722N antene (narančaste). Na zapadnoj kupoli uključen je Acrylic Wi-Fi Professional dok je na istočnoj uključen Ekahau Site Survey.

Na sredini zapadne tribine, u novinarskoj B-Loži smješteno je treće, prijenosno računalo, sa spojenom profesionalnom Wi-Spy DBx (crvena) antenom te tu mjerili „glavno mjerenje“ s MetaGeek Chanalyzer-om.



Slika 9: Shema stadiona s lokacijama mjerenja

Na ovaj laptop su, pomoću protokola udaljene radne površine (engl. remote desktop), spojena oba računala na kupolama stadiona kako bi postojao stalan uvid u mjerenja, kako bi se mogli spremati prikupljeni podaci, zamijetiti eventualni prekidi u radu i slično.

Sva računala su bila spojena preko žične infrastrukture stadiona te ni u kojem trenutku nisu koristila bežične mreže kako ne bi utjecala na mjerenja (slika 9). Stadionska infrastruktura, koja se inače koristi uglavnom za video nadzor te kontrolu pristupa gledatelja, sastoji se od gigabitnih

Allied Telesis mrežnih preklopnika s glavnim i rezervnim optičkim vezama koje su za vrijeme najvećeg opterećenja sustava iskorištene tek 3-5 % dostupne propusnosti. Trenutni monitoring sustav mrežne opreme Nagios Enterprise Monitoring Server upozorava ako se kašnjenje podataka poveća preko 100 ms za bilo koji mrežni preklopnik no za ovaj dio sustava zbog izrazito male iskorištenosti kapaciteta to se nikada do sada, pa tako ni za vrijeme ove utakmice, nije detektiralo.



Slika 10. Fotografija glavne pozicije mjerenja s udaljenim radnim površinama računala na krovu stadiona

Najbolja prigoda za mjerenja je kod potpune popunjenosti stadiona, takva prilika ukazala se 31.08.2019. godine kada su se u 7. kolu HT Prve lige na Poljudu našli domaćini Hajduk i gosti Dinamo (slika 10). Utakmicu je došlo gledati 29.359 gledatelja što je uz službeno osoblje ukupno oko 30 tisuća ljudi.

Utakmica je započela u 18:30 te završila u 20:21. Mjerenja su započeta nekih dva sata prije, u 16:40, kada na stadionu nije bilo nikog osim službenog osoblja, policije i zaštitara. Od tih 200-tinjak osoba oko tridesetak ih je, na početku mjerenja, bilo spojeno na Wi-Fi sustav stadiona.

U satima prije utakmice, oko 16:40 detektirano je stotinjak stalnih tuđih pristupnih točaka uglavnom na 2,4 GHz. Radi se o susjednim zgradama, lučici, kafićima te poslovnim prostorima ispod tribina stadiona.

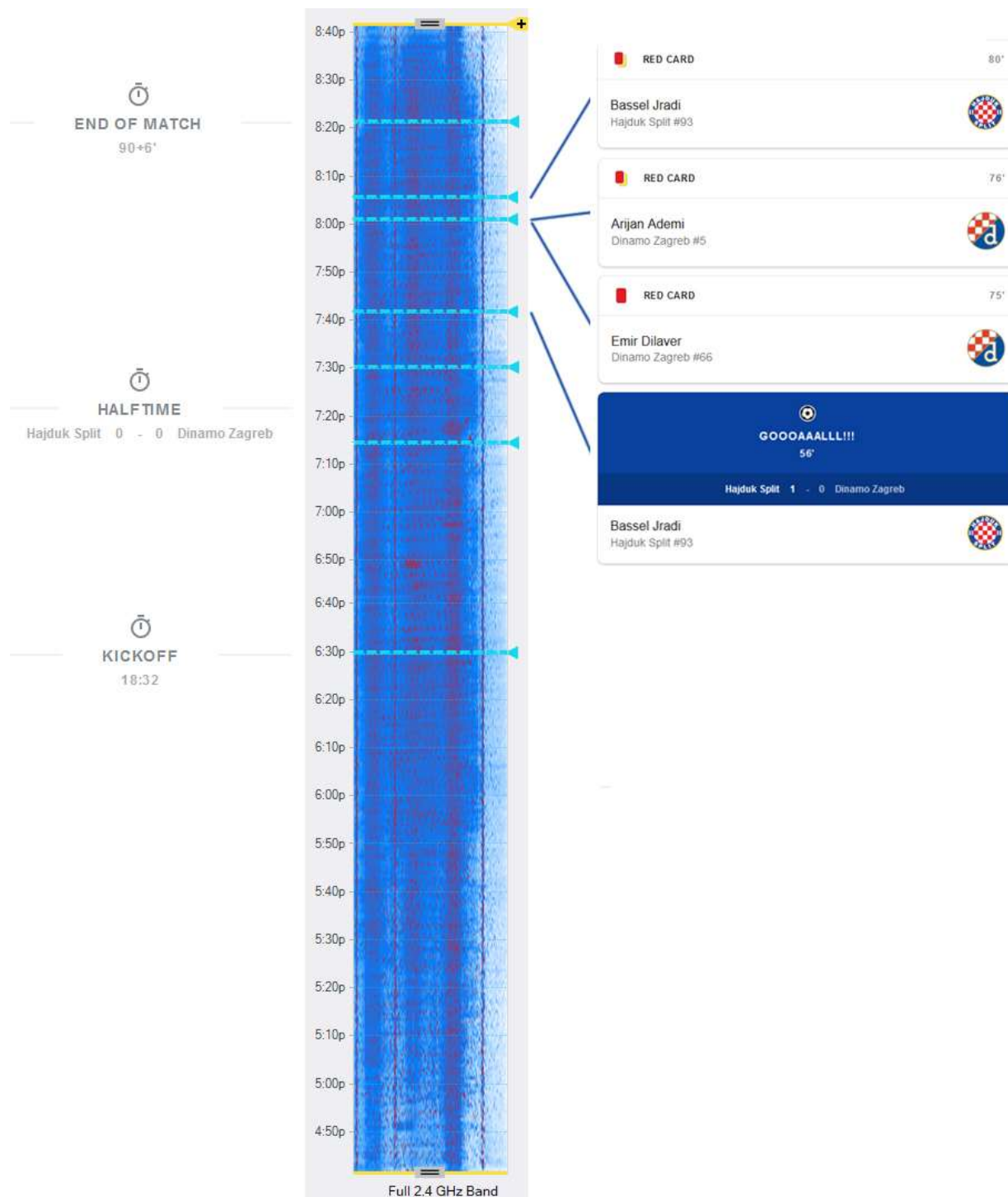
Uz njih pod kontrolom stadiona je 30 pristupnih točaka koje prema poziciji odašilju 4 logička tj. 100 fizičkih SSID-eva. Kao zadnja skupina su privremeni odašiljači takozvani hotspotovi gledatelja kojih je u trenutku početka mjerenja bilo 30-tak no svi su i dalje bili van stadiona. Broj ovakvih uređaja će s vremenom rasti te će se isti pratiti tokom cijele utakmice.

Chanalyzer i Acrylic će svoja mjerenja odraditi automatski pa osim povremenih snimanja zbog mogućnosti gubitka podataka nije bilo potrebe za stalnim monitoringom. Sve podatke iz njih može se pregledavati i izvući naknadno. Suprotno tome Cisco Wireless LAN Controller i Ekahau Site Survey nemaju mogućnost snimanja podataka u, za ovu svrhu, iskoristivom obliku te je stoga bilo potrebno konstantno snimanje sadržaja ekrana (slika 11) kako bi se naknadno prikazane vrijednosti mogle izvući u tablice i analizirati. Pošto su sva računala koja obavljaju mjerenja bila povezana na jedno (prijenosno računalo) preko udaljene radne površine snimanje se radilo u pravilnim vremenskim intervalima od 10 minuta za sve sustave istovremeno.



Slika 11: Primjer snimke ekrana s podacima s 3 različita računala

Na slici 12 prikazan je tijek utakmice s najvažnijim trenucima. Gol u 56. minuti (19:41) te tri crvena kartona u 75., 76. i 80. minuti. U sredini slike vidi se i prikaz paketa tokom cijela 4 sata snimanja prometa. Ova slika izvučena je iz MetaGeek Chanalyzer-a te se na njoj već na prvi pogled može zamijetiti da je najveći promet (tamno plava zatamnjenja) bio na 11. kanalu, na kojem su radile dvije pristupne točke koje koriste uposlenici i novinari na tribinama i pod kontrolom su stadiona. Druge pristupne točke najviše su prometa napravile na 1. i 6. kanalu no zamjetno je i da je sve između tih kanala ispunjeno malo svjetlijom nijansom plave boje, što znači prometom.



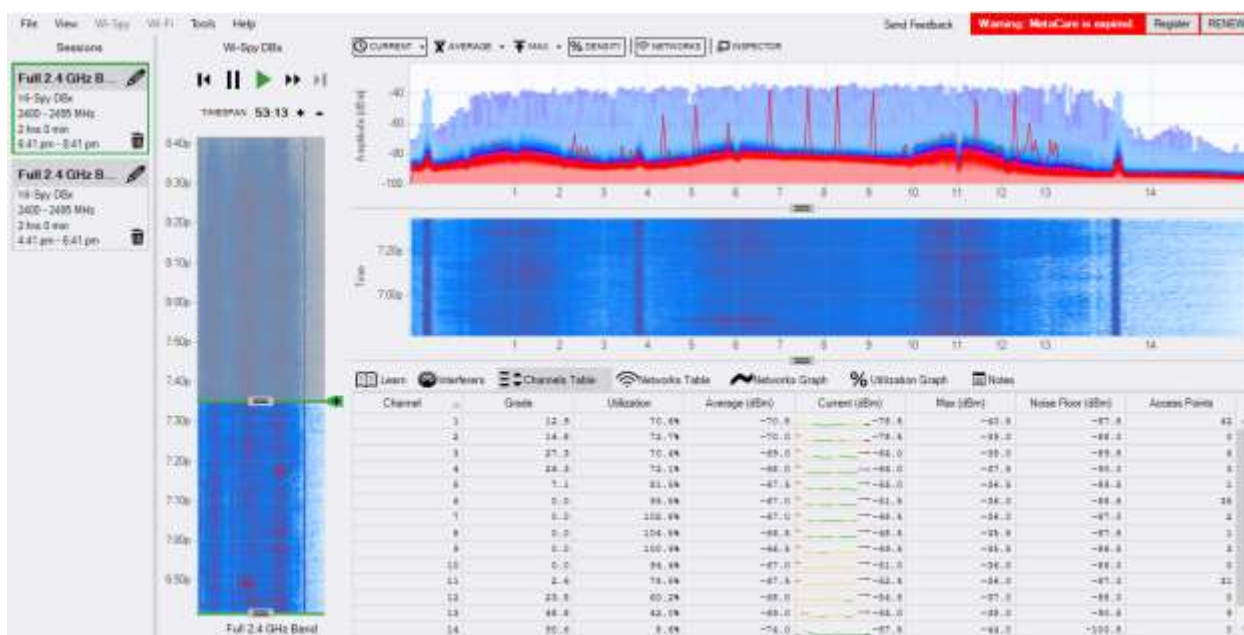
Slika 12: Tijek utakmice s najvažnijim događajima

3.3. OBRADA PODATAKA

3.3.1. MetaGeek Chanalyzer

Ovaj program, primarni je izvor podataka za ovaj rad. Uz pomoć profesionalne Wi-Spy DBx antene prikupljeni su podaci o svom prometu na cijelom 2,4 GHz spektru prije, za vrijeme i nakon utakmice. Popisani su svi detektirani SSID-evi i pripadajuće snage signala ovisno o vremenu pojavljivanja.

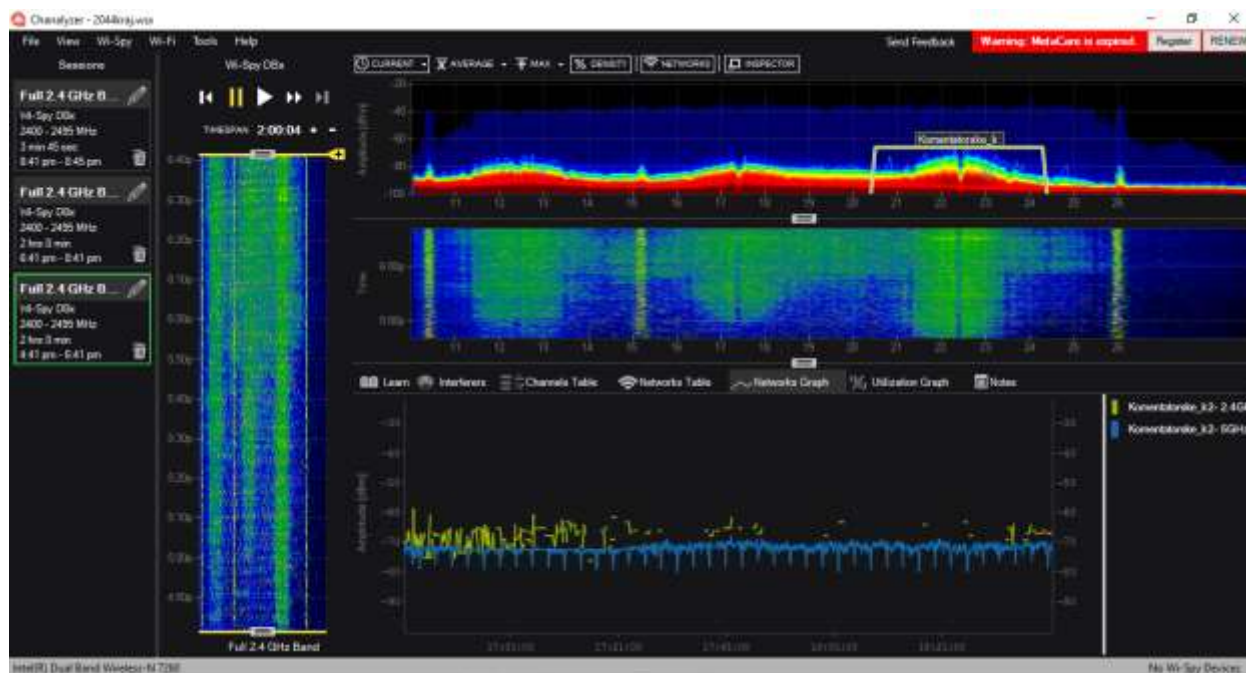
Nažalost, samo profesionalna verzija programa nudi mogućnost automatskih izvještaja, a s time i najjednostavniji način spremanja podataka, no kako se satima duga snimka može pohraniti i naknadno beskonačno pregledavati, podatke se može prema željenim intervalima izvaditi i preko snimki zaslona. Za sva 4 sati snimke uzeti su intervali do po 10 minuta te se za svaki interval napravila snimka zaslona (slika 13).



Slika 13: Primjer prikaza podataka u Chanalyzeru za određeni period utakmice

Kako u ovom slučaju ima mnogo podataka na prikazu, zanima nas 5 vrijednosti za svaki kanal, ručno prebacivanje podataka u tablicu bi bilo prevelik i mukotrpan posao. Stoga su uz pomoć programa Adobe Photoshop spojene mnoge ovakve snimke ekrana u jednu sliku, te su nakon brisanja nebitnih podataka dobivene ogoljene tablice koje se uz pomoć besplatnog online programa za optičko prepoznavanje slova prebacilo u Excel datoteku. Nakon čega se sve podatke provjerilo i ispravljene su poneke pogrešno pročitane.

Uz ove podatke u ovom programu moguće je i „pratiti“ bilo koju bežičnu mrežu tokom perioda u kojem je vidljiva našoj anteni te preko grafova prikazati snagu njenog signala.



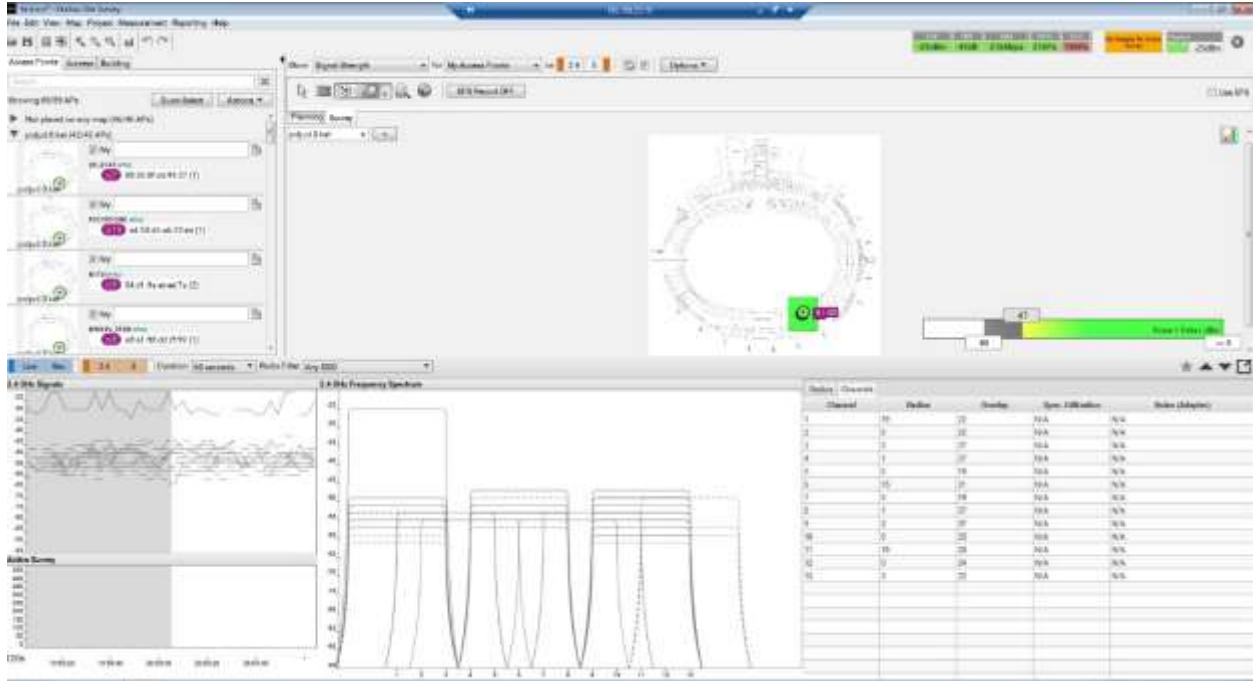
Slika 14: Prikaz signala pristupne točke Komentatorske_k2 tokom prve polovice poluvremena

Na slici 14 vidi se stabilan signal jedne pristupne točke na 5 GHz (plava boja) te nestabilan signal iste pristupne točke na 2,4 GHz (žuta boja). Iz ovakvog prikaza je jasno vidljivo da je signal ove pristupne točke na 11 kanalu 2,4 GHz skoro sat i pol prije početka utakmice postao neiskoristiv za poziciju našeg mjernog uređaja, no u isto vrijeme vidi se da je signal na 5 GHz neometan.

3.3.2. Ekahau Site Survey

Ekahau se primarno ne koristi za mjerenje koje je u ovom slučaju s njime izmjereno. Ovaj program je osmišljen kao alat u kojem se iz brojnih pozicija (šetnja prostorom) gradi višedimenzionalni prikaz pokrivenosti signalom nekog prostora. Pošto u ovom slučaju nije bilo moguće šetati po stadionu i raditi mjerenja, za što bi zbog veličine prostora bio potreban cijeli dan (za jedno mjerenje), a potrebni su intervali od maksimalnih 10 minuta u kojima se bilježi stanje zbog brzih promjena stanja spektra, ovaj alat se koristio da zbroji ukupan broj svih mreža na cijelom 2,4 GHz spektru te ponudi dodatno mjerenje za usporedbu s ostalim pozicijama.

Pošto nije potrebna osnovna funkcionalnost programa, izvještaji koje ovaj program izrađuje nisu od koristi za ovdje potrebne podatke. Iz ovog razloga su podaci iz ovog programa prikupljeni kroz 26 snimki zaslona. Prikazani podaci bili su trenutni te su se mijenjali konstantno.



Slika 15: Sučelje programa Ekahau Site Survey

Na snimci 15 iz programa vidi se trenutno stanje za krovu istočne tribine gdje se koristi ovaj program. Podaci o broju mreža na pojedinom kanalu, koje se dalje obrađuje, nalaze se u donjem desnom uglu. Podaci su kasnije ručno prepisani u tablice kako bi se mogli dalje obraditi i prikazati.

3.3.3. Acrylic Wi-Fi Professional

Ovaj program uz profesionalnu antenu može pokupiti podatke o svim SSID-ovima i njihovim klijentima no u ovom slučaju na raspolaganju je bila samo „obična“ TP-Link antena. Stoga je ovaj program prikupljao samo osnovne podatke o mrežama, protokolu, enkripciji i vremenu kada su se pojavile (slika 16). Nije bilo potrebe za prikupljanjem podataka prije kraja utakmice jer je program sve pamti do kraja. Naravno za slučaj neočekivanog prekida rada programa ili računala za svaki slučaj se napravilo spremanje podataka u desetak navrata. Podaci s

ovog računala, to jest sa zapadnog krova stadiona služe nam za usporedbu s ostalim mjerenjima na stadionu te kako bi nam otkrili da li se broj bežični mreža „slaže“ na svim pozicijama mjerenja.

Pošto se radi o probnoj verziji softvera nije bilo moguće spremiti podatke izravnim putem već su se isti spremili preko sedam snimki zaslona koje su naknadno spojene u jednu sliku sa svim podacima.

SSID	MAC Address	RSSI	Chan Width	802.11	Max Rate	WPA2	Vendor	Mgt	First	Last
HUAWEI P10 lite	14:9D:09:67:0A:CF	-65	11	20	150	PSK-CCMP	HUAWEI TECHNOLOGIES CO.,LTD	2	18:33:29	00:37:01 ago
HUAWEI Mate 20 Pro	F8:CF:96:40:57:AA	-65	11+7	40	150	PSK-CCMP	HUAWEI TECHNOLOGIES CO.,LTD	5	18:33:23	00:05:36 ago
iPhone	7E:50:49:E7:49:10	-61	6	20	72.2	PSK-CCMP	Apple, Inc.	1	18:33:26	01:30:55 ago
AndroidAP	5C:51:01:4B:19:97	-65	1	20	72.2	PSK-CCMP	Samsung Electronics Co.,Ltd	1	18:33:38	01:30:43 ago
Nokia 6.1	AC:57:75:02:CC:1F	-63	13	20	72.2	PSK-CCMP	HMD Global Oy	11	18:33:44	00:44:33 ago
HUAWEI P10 lite	8D:85:ED:EC:14:AC	-67	11	20	150	PSK-CCMP	HUAWEI TECHNOLOGIES CO.,LTD	20	18:34:20	00:51:22 ago
AndroidAP	A4:0C:F1:3C:96:E2	-55	6	20	72.2	PSK-CCMP	Samsung Electronics Co.,Ltd	3	18:34:26	00:11:19 ago
TRADOS777	6E:C7:EC:0B:9D:7A	-55	6	20	144.4	PSK-CCMP	SAMSUNG ELECTRO-MECHANICS(HAI)	35	18:34:47	00:01:45 ago
AndroidAP	44:78:3E:9A:EE:75	-65	1	20	72.2	PSK-CCMP	Samsung Electronics Co.,Ltd	98	18:35:41	00:56:08 ago
Mi Wifi	04:D1:3A:EC:EE:7A	-65	4	20	72.2	PSK-CCMP	Xiaomi Communications Co.,Ltd	1	18:35:44	01:28:37 ago
AndroidsB	2E:0E:5D:DD:C5:67	-65	6	20	144.4	PSK-CCMP	SAMSUNG ELECTRO-MECHANICS(HAI)	6	18:36:03	00:37:37 ago

Slika 16: Primjer podataka snimljenih Acrylicicom

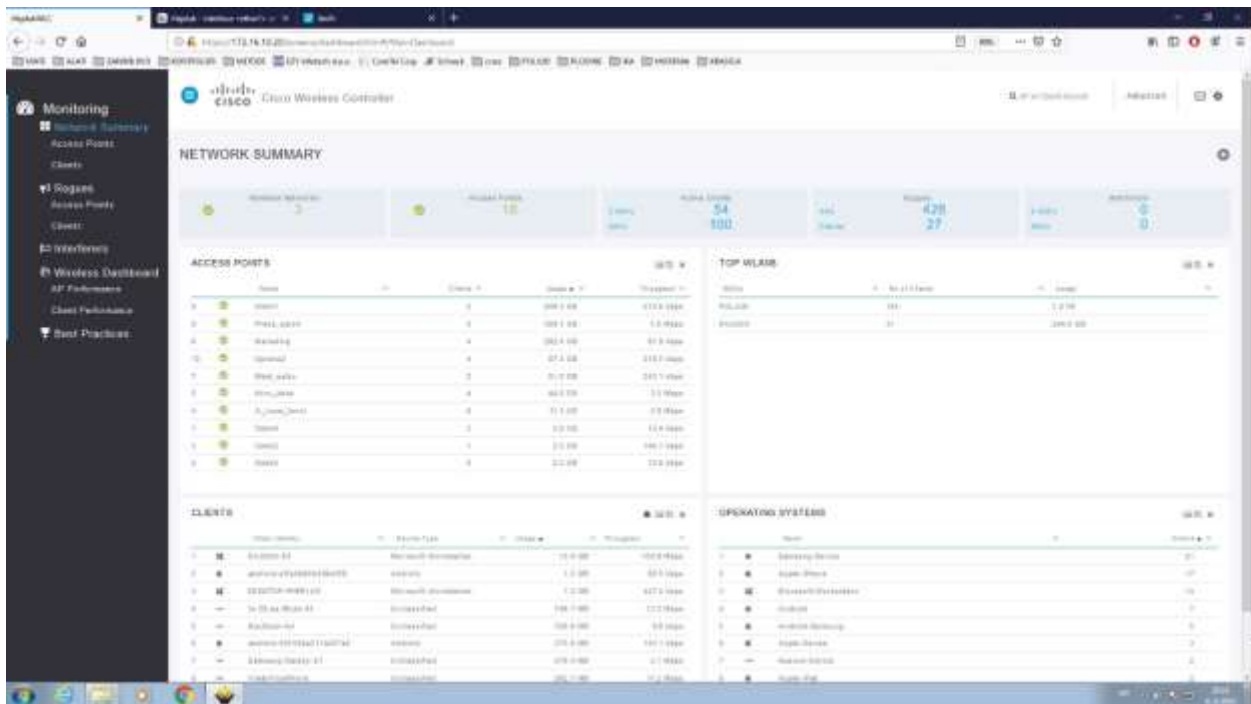
3.3.4. Cisco Wireless LAN Controller

Kod ovog upravljačkog programa podaci se prikupljaju pomoću snimke zaslona. Kao i kod Ekahaua istom snimkom zaslona se uzelo podatke s oba sustava. Stoga ima također 26 mjerenja u razmacima od desetak minuta iz kojih su podaci ručno prebačeni u tablicu.

Podaci prikupljeni s ovog sustava su broj klijenata na Cisco pristupnim točkama, broj tuđih pristupnih točaka te njihovi klijenti, odvojeno za 2,4 i 5 GHz. Ovaj sustav sa svoje 4 pristupne točke na tribinama stadiona snima i sve tuđe pristupne točke i njihove klijente. Na ovaj način napravljeno je još jedno mjerenje broja pristupnih točki iako je u ovom slučaju prikupljena samo ukupna brojka uređaja bez detaljnih pojedinačnih imena.

Ovaj sustav s ostalih 14 pristupnih točaka proteže se unutar uredskih prostora stadiona te na vanjskoj strani prema lučici na zapadnoj strani što nam dodaje određenu brojku detektiranih pristupnih točaka koja nije predmet ovog mjerenja te će se ove brojke uzeti s oprezom.

Također mora se uzeti u obzir da se kod broja korisnika izbaci one koji su na ovom sustavu, a nisu na tribinama stadiona, to jest čije signale i promet nije vidljiv s tribina pa s time i ne utječu na rad sustava. Kako se radi o minimalnoj pokrivenosti unutarnjih prostora s pristupnim točkama gotovo svi klijenti u unutrašnjim prostorima su spojeni na neki kanal na 2,4 GHz. Stoga, kako je i od ranije poznato radi se o nekih dvadesetak klijentskih uređaja koji su spojeni na ovaj sustav, ali za vrijeme utakmice ne izlaze na tribine. Radi se o spremačicama, poslužici, kuharima i zaštitarima koji brinu o gostima svečanih loža na stadionu (slika 17).



Slika 17: Primjer podataka snimljenih Cisco Wireless LAN Controllerom

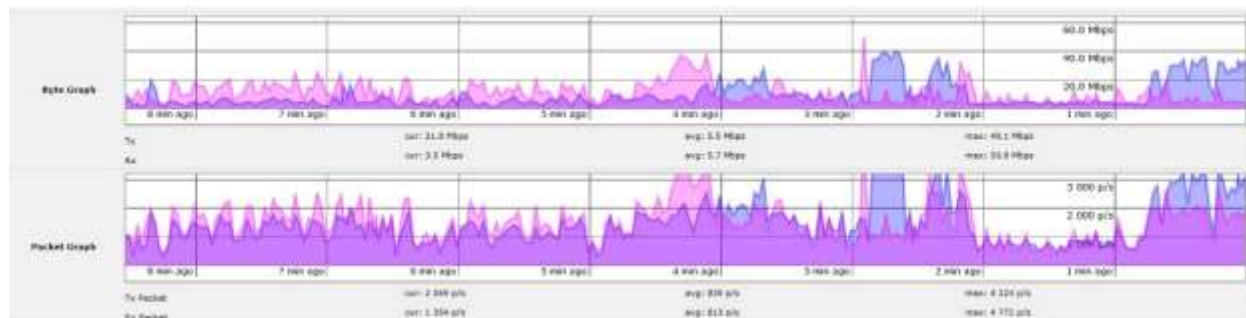
3.3.6. Ostali podaci

Broj zabranjenih frekvencija, nakon otkrivanja radara, na 5 GHz dobivao se izravno s Cisco vanjskih pristupnih točaka te se izravno ručno upisivao u tablicu. Kasnije se podatke usporedilo i potvrdilo s mjerenjem iz Chanalyzera gdje se najpreglednije vide iz snimke signala dvije vanjske pristupne točke Cisco 1532I koje se „trude“ raditi na ovim kanalima.

Neke informacije koje se spominju u ovom radu nisu izravno izmjerene za vrijeme ove utakmice jer imaju standardne vrijednosti dugi niz godina. Naprimjer ukupan maksimalni promet svih Wi-Fi klijenata na Cisco sustavu, što se iz mjerenja vidi da je oko 150 klijenata, može se neizravno iščitati iz ukupne potrošnje interneta na stadionu.

Naime prosječna potrošnja interneta stadionskih sustava za vrijeme ovakve utakmice je do 30 Mbps. Pošto novinari na tribinama za glavni način komunikacije koriste žičane veze poznato je da je samo dio ovog prometa zapravo Wi-Fi sustav, no ove brojke nam govore koliko maksimalna potrošnja uopće može biti. Poznato je i da je 80 % novinara i uposlenika spojeno na 5 GHz te tu koriste većinu prometa na bežičnom sustavu. Iako nije poznato izravno koliko na kraju koriste bežični klijenti ovog sustava na 2.4 GHz može se pretpostaviti da je to samo nekoliko Mbps.

Na kraju se može zaključiti da je stvarnog „korisnog“ prometa na Wi-Fi sustavu jako malo prema onome što bi pristupne točke trebale moći pružiti. Na primjer za prvu polovicu poluvremena promet u oba smjera je u prosjeku 6 Mbps (slika 19).

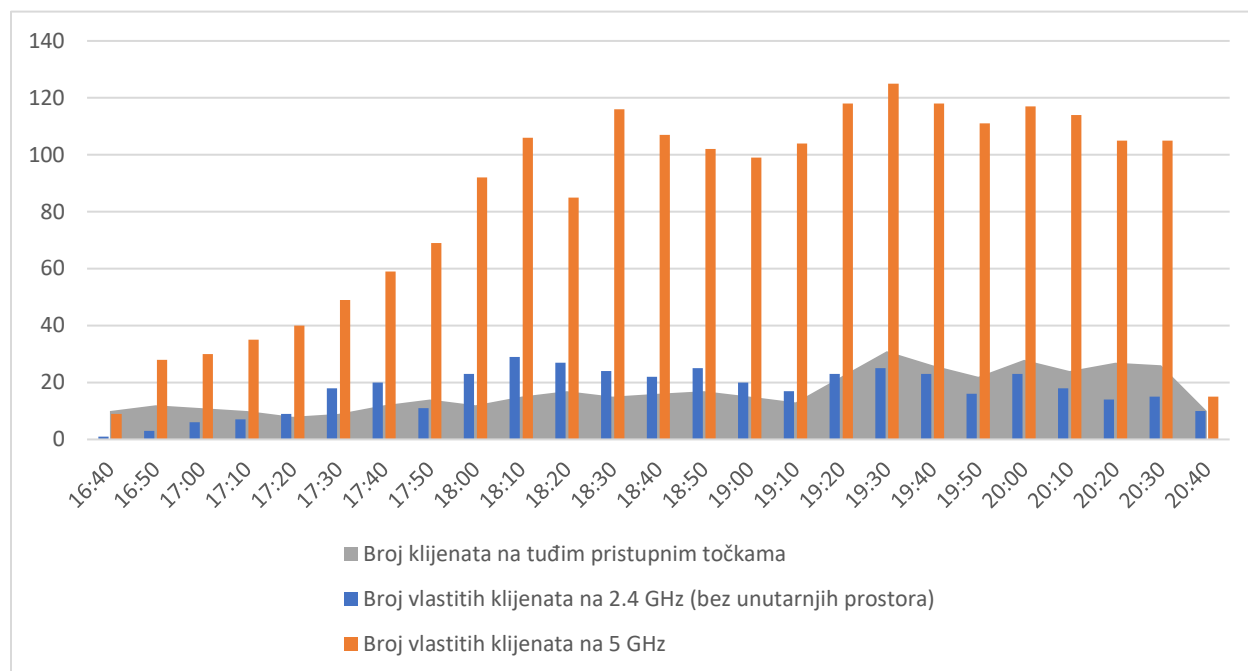


Slika 19: Snimka prometa stadiona za prvih 8 minuta poluvremena

3.4. REZULTATI MJERENJA 2.4 GHz SPEKTRA

3.4.1. Broj klijenata na Wi-Fi sustavima – Cisco WLC

Od 30 000 gledatelja i osoblja na stadionu samo se mali dio koristi Wi-Fi signalima. Istovremenih korisnika je oko 200 što ne bi trebalo biti nikakav problem za Wi-Fi sustave.

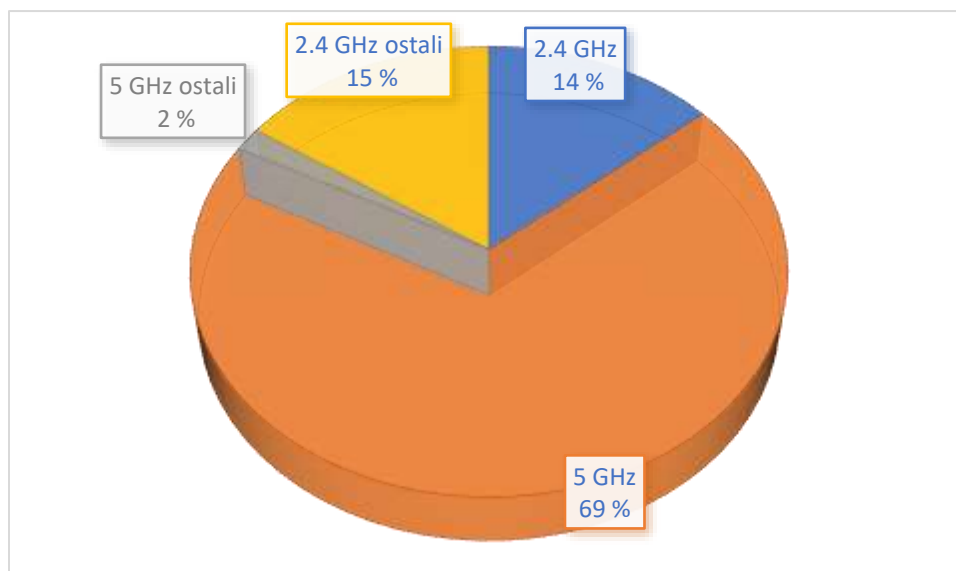


Slika 20: Klijenti spojeni na pristupne točke tokom utakmice

Iz gornjeg prikaza (slika 20) vidljivo je da je većina klijenata spojena na frekvencijama na 5 GHz. Pošto se radi o sustavu pod kontrolom stadiona poznato je da su svi oni spojeni na dvije pristupne točke na tribinama (komentatorske kabine 1 i komentatorske kabine 2). Pošto su smetnje pri radu Wi-Fi sustava na 2.4 GHz poznate od ranije, ova dva uređaja su podešena da spajaju prioritarno klijente na 5GHz te samo one koji nemaju tu mogućnost da spoje na 2.4 GHz. Radi se o pristupnim točkama za spajanje novinara (koji imaju primarno žične veze za laptope) te djelatnika kluba koji se nalaze uglavnom u A i B loži stadiona.

Uz stotinjak uređaja na 5 GHz postoji i dvadesetak uređaja na 2.4 GHz. Kako je ranije spomenuto to su uglavnom uređaji koji ne podržavaju spajanje na 5 GHz. No dio su i uređaji u komentatorskim kabinama obješenim na zapadni krov stadiona unutar kojih je jedna pristupna točka te su zbog svoje metalne konstrukcije dobro zaštićeni od utjecaja ostalih signala na stadionu.

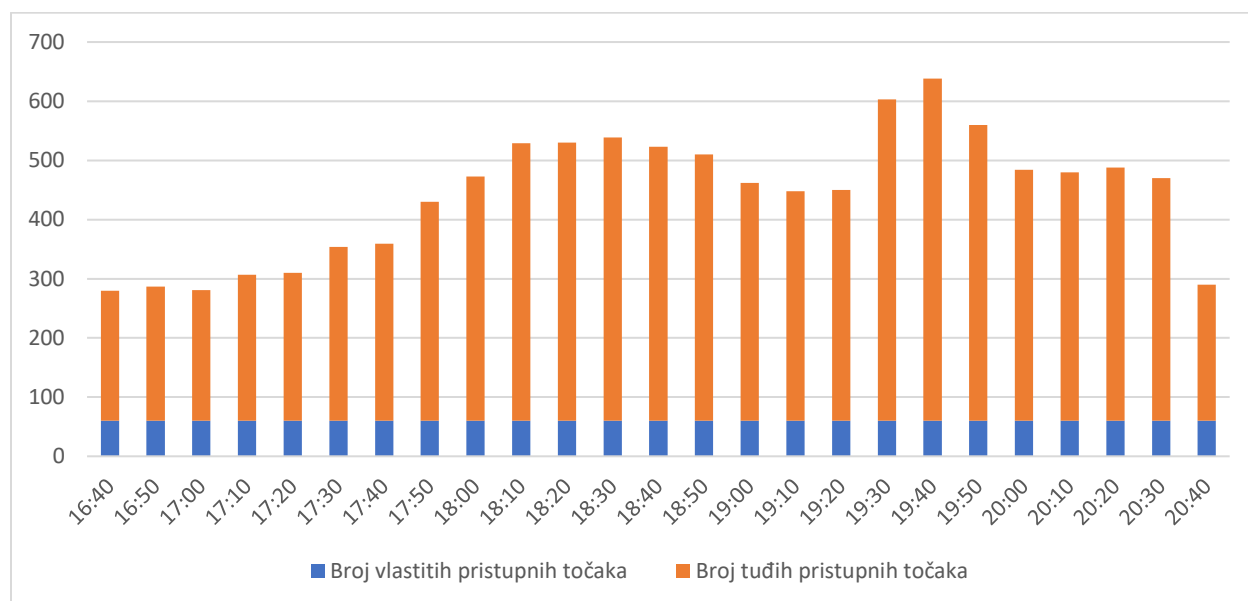
Uz klijente spojene na uređaje pod nadzorom stadiona ima i „samo dvadesetak“ klijenata na ostalim pristupnim točkama.



Slika 21: Klijenti spojeni na pristupne točke tokom utakmice prema frekvencijama

3.4.2. Broj pristupnih točaka – Cisco WLC

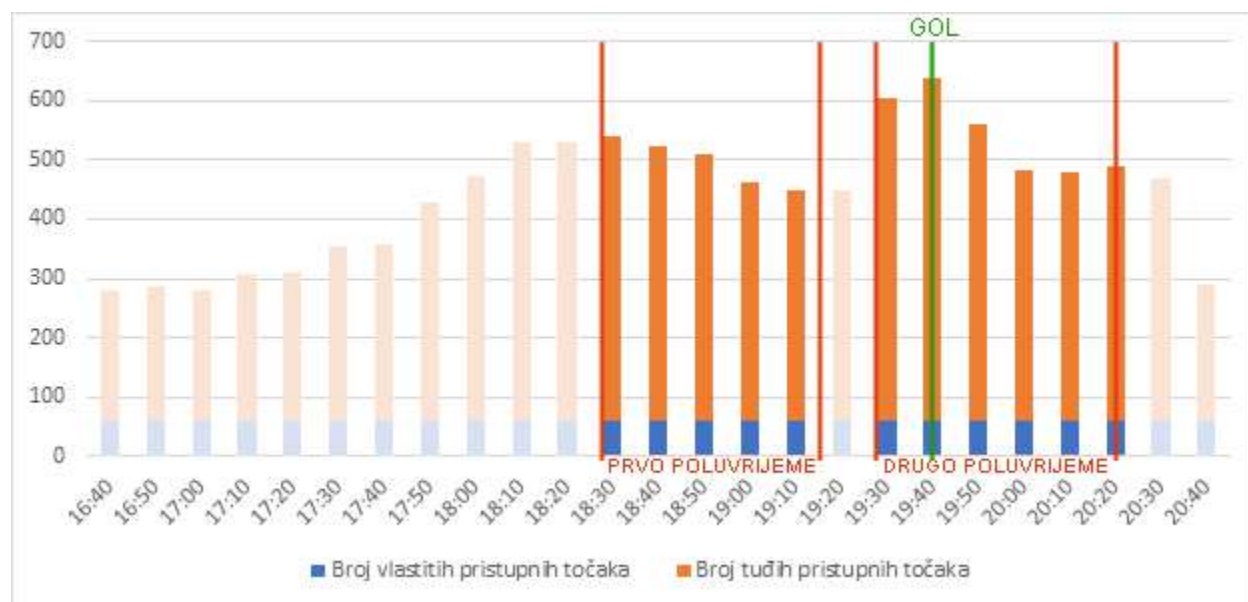
Nakon što je poznato koliko klijenata koristi bežične sustave za vrijeme utakmice može se pogledati na koliko pristupnih točaka se ti klijenti spajaju (slika 22).



Slika 22: Pristupne točke tokom utakmice (kroz posljednjih 20 minuta)

Iz slike 22 se vidi da broj pristupnih točaka polako raste do početka utakmice u 18:30 zatim polagano pada do poluvremena te onda ponovno raste na početku drugog poluvremena u 19:30 te se lagani pad nastavlja. Ovo je i za očekivati jer ove sve dodatne pristupne točke su dijeljenje internet veze među mobitelima za koju je očekivano da se događa prije utakmice, za vrijeme poluvremena te u slučaju izvanrednih događaja na terenu.

Prvo poluvrijeme nije imalo spektakularnih događaja, Dinamo je imao dosta prilika no to nije nešto što bi splitska publika odmah željela podijeliti na društvenim mrežama. Rezultat je ostao 0:0 te stoga graf dodatnih mreža ima očekivani blago padajući oblik. No kod drugog poluvremena situacija je drugačija, gol za Hajduk te nakon toga crveni kartoni za Dinamo su nešto za što bi očekivali dodatne pristupne točke i baš se to i događa.

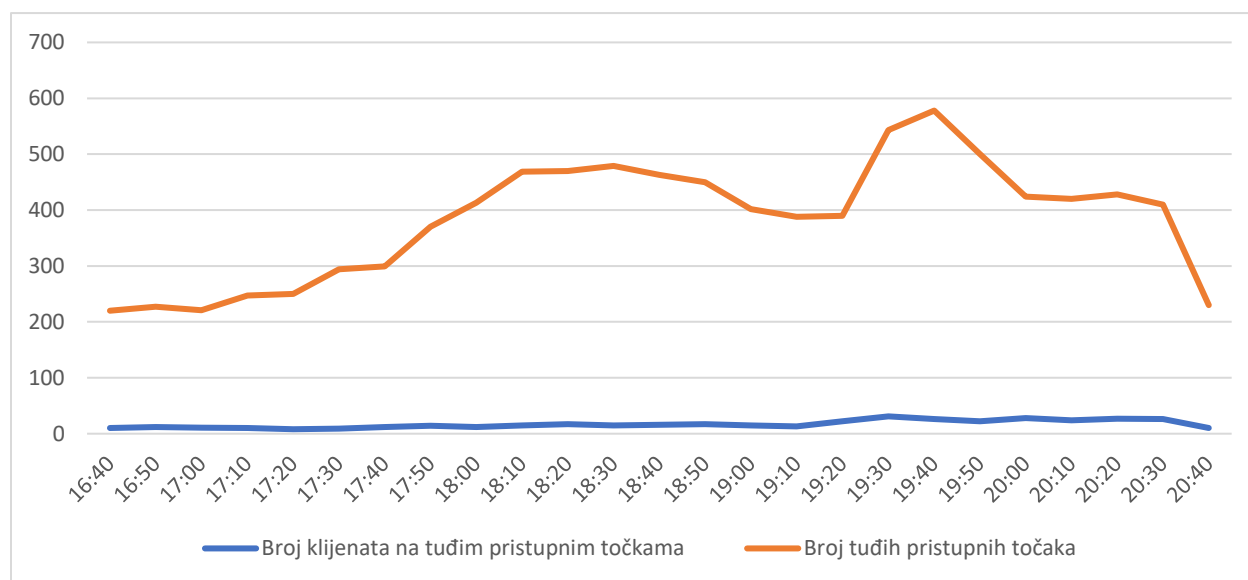


Slika 23: Pristupne točke tokom utakmice s naglašenim ključnim trenucima

Uz uvijek prisutnih 60 SSID-eva koje se koriste za potrebe stadiona, postoji i 220 SSID-eva koje odašilju brojne okolne zgrade (slika 23), poslovni prostoru u najmu ispod tribina, obližnja lučica, samostan i slično. Za vrijeme utakmice pojavljuje se dodatnih 358 novih privremenih pristupnih točki gdje gledatelji jedni drugima dijele internet.

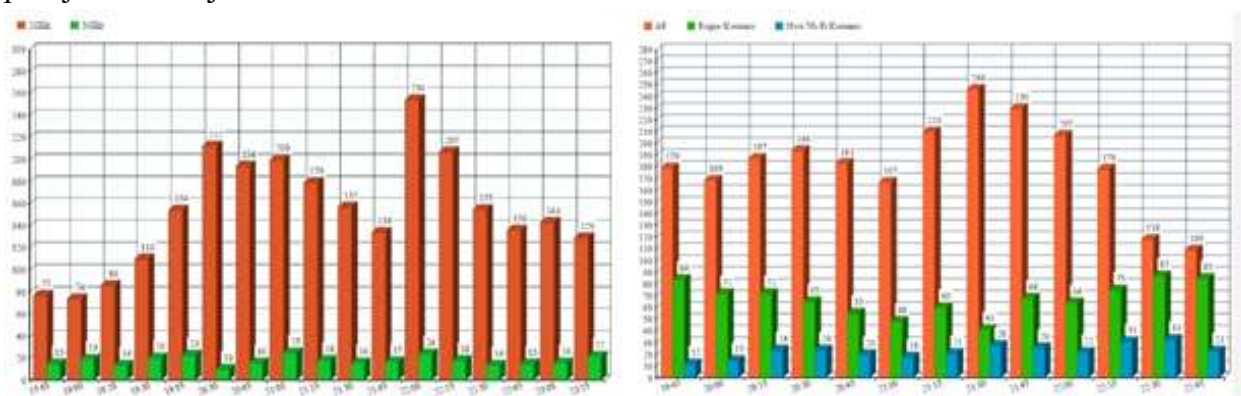
Tu je važno napomenuti da je 97.2 % ovih novih pristupnih točaka na nekom od kanala na 2.4 GHz dok je samo zanemariv broj na 5 GHz.

Ako se uspoređi broj klijenata na 2.4 GHz i broj pristupnih točaka dolazi do prvih naznaka da nešto nije u redu.



Slika 24. Tuđe pristupne točke i pripadajući klijenti

Ovdje je vidljivo da je broj klijenata koji se spajaju na ove nove pristupne točke izrazito mali (slika 24). Ovdje se može zaključiti i da možda postoji problem u mjernim instrumentima koji jednostavno ne registriraju klijente. No kako postoje 4 Cisco pristupne točke koje mjere ove podatke i već se ranije za ovakve utakmice mjerilo poznato je da su ovo stvarni podaci. Evo par primjera od ranije.



Slika 25: Hajduk – Everton (2017) i Hajduk Bronby (2017)

Kod primjera utakmice s Bronbyem (slika 25) čak se vidi i očiti pad broja klijenata sa povećanjem broja pristupnih točki. Tu je vidljivo da klijenata koji nisu spojeni na sustav stadiona

(zeleno) ima i do stotinu, što govori da sustav može otkriti ostale klijente za vrijeme utakmice, kada je stadion pun.

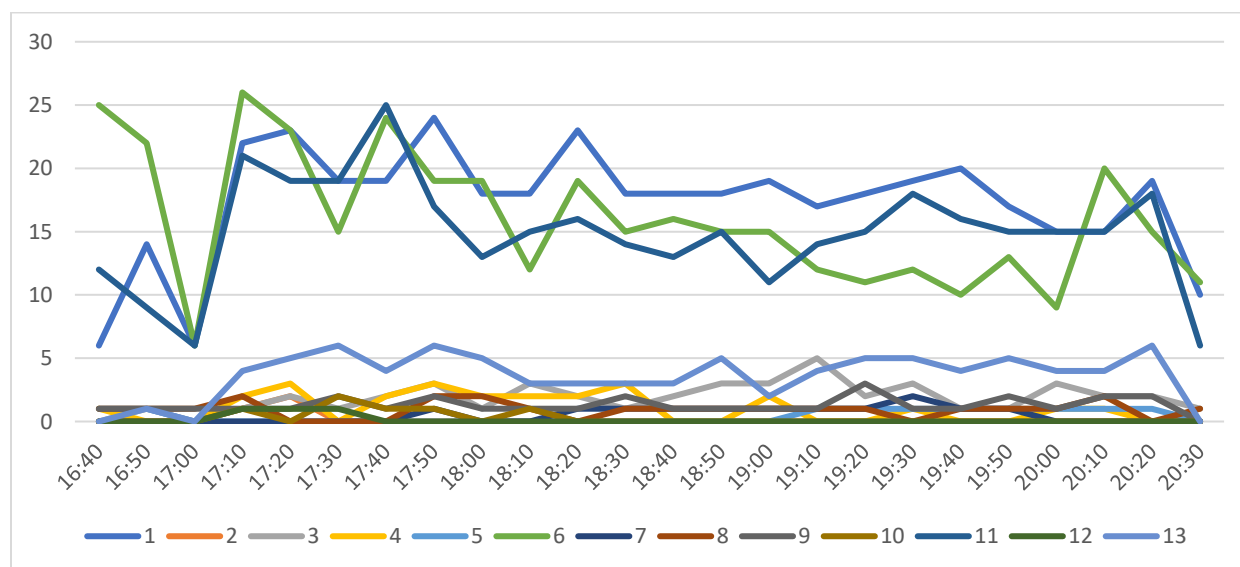
Primjer utakmice s Evertonom nam daje identičnu snimku stanja kao i kod promatrane utakmice Hajduk-Dinamo samo s manjim brojem otkrivenih tuđih pristupnih točaka.

Sve tri utakmice nam potvrđuju da broj pristupnih točaka prati pravilnu krivulju te se može predvidjeti. Ovaj sustav pamti tuđe pristupne točke i njihove klijente 20 minuta što znači da su ovi podaci dobar ukupan pregled, ali nisu dobar pokazatelj trenutnog stanja za neko točno vrijeme.

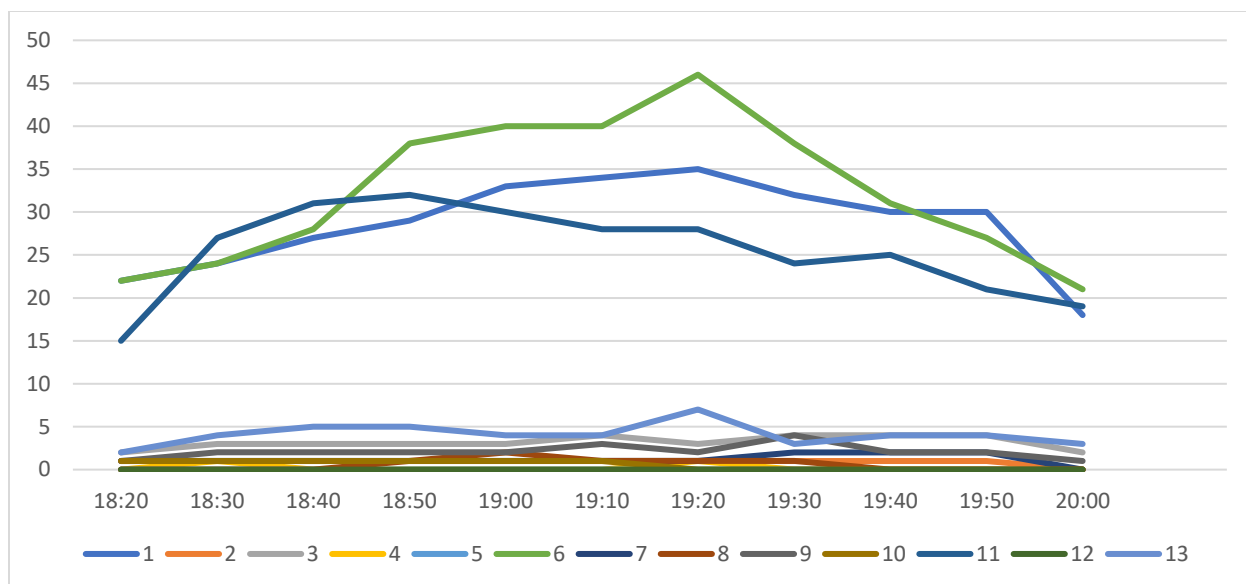
Ovi grafovi nam za razliku od trenutnih govore koliko je različitih pristupnih točaka postojalo, jer bi se po trenutnom stanju moglo misliti da se radi o dvadesetak istih, a ne stotinama različitih uređaja.

3.4.3. Broj klijenata na Wi-Fi sustavima – Chanalyzer, Acrylic i Ekahau

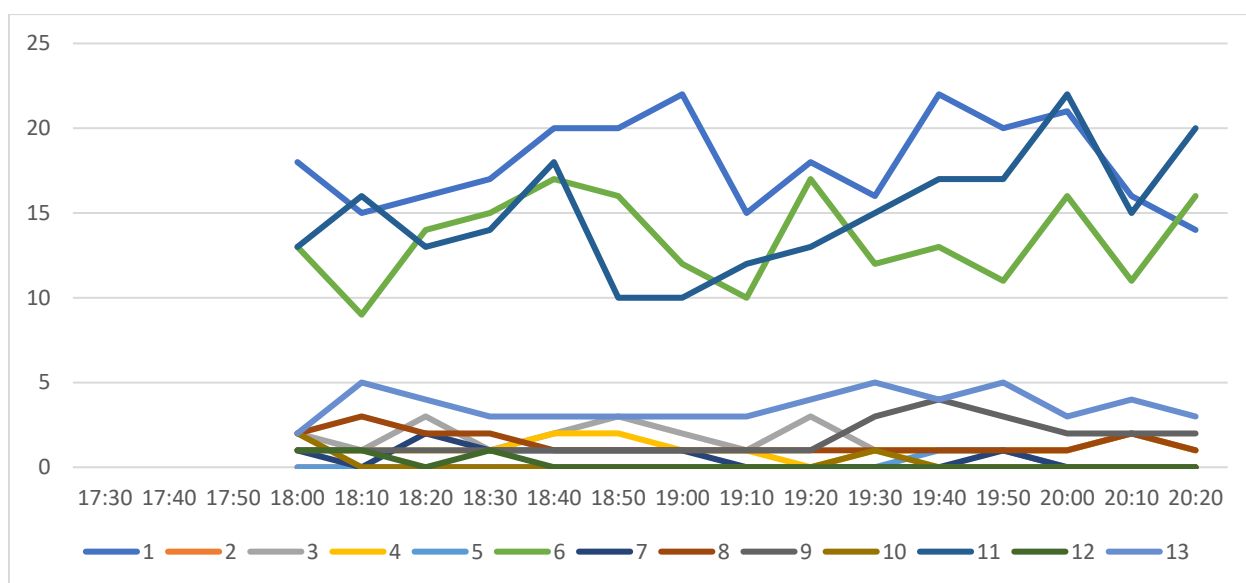
Kako nam Cisco sustav nudi brojke kroz 20 minuta unatrag, one nam nisu dobar pokazatelj trenutnog stanja. No zato nam podaci iz ostalih mjernih programa nude baš to. Točne brojke u svakom trenutku. Niže su uspoređena sva tri programa, na tri različite pozicije, te se tu može vidjeti koje su količine istovremenih pristupnih točaka po pojedinim kanalima.



Slika 26: Broj pristupnih točaka 2.4 GHz - Chanalyzer



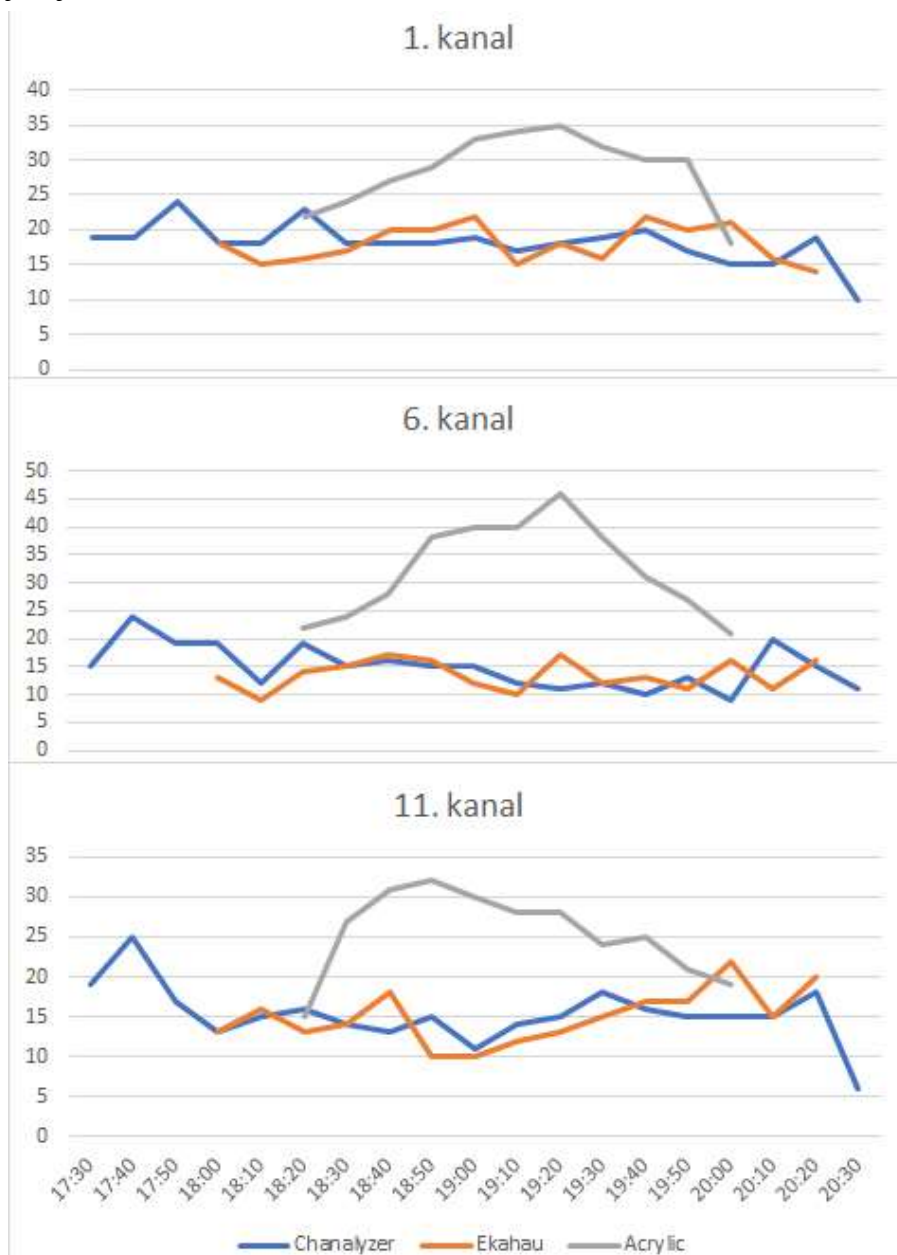
Slika 27: Broj pristupnih točaka 2.4 GHz – Acrylic



Slika 28: Broj pristupnih točaka 2.4 GHz – Ekahau

Na podacima iz Acrylica (slika 27) može se vidjeti odstupanje od druga dva grafa. Razlog tomu je što nam ovaj program nudi samo vrijeme kada se nova pristupna točka pojavila te kada je ista nestala. Ovaj graf napravljen je sa pretpostavkom da su sve točke cijelo vrijeme nakon prvog pojavljivanja bile aktivne. Što je vidljivo iz druga dva detaljnija mjerenja ovdje nije slučaj.

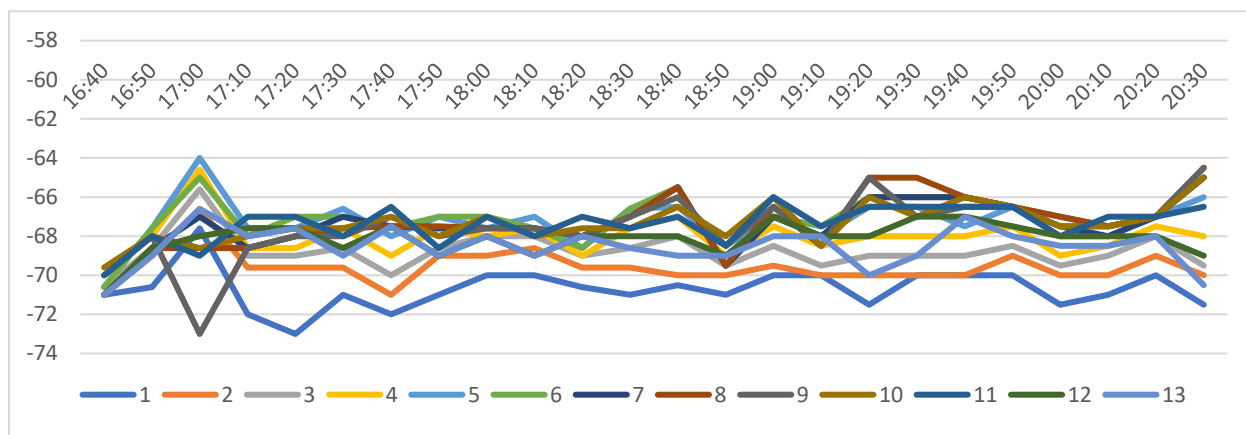
Kako se vidi na grafu usporedbe sva tri mjerenja (Slika 29) na tri osnovna, najiskorištenija, kanala 1., 6. i 11., Ekahau i Chanalyzer, koji mjere trenutnu situaciju, dali su identične podatke i njihovi se podaci preklapaju. Ako se uzme u obzir da su ova dva računala imala različite antene i nalazile su se na dvije različite strane stadiona. Ovdje se već može naslutiti da su zbog veličine stadiona i maksimalne udaljenosti od 200 metara između bilo kojeg klijenta i najudaljenije pristupne točke sve bežične mreže mogu detektirati bilo gdje na stadionu. Iz tog razloga i međusobni utjecaj bežičnih mreža će biti maksimalan.



Slika 29: Usporedba različitih mjerenja – trenutni broj pristupnih točaka na 2.4 GHz

3.4.4. Snage signala pristupnih točaka

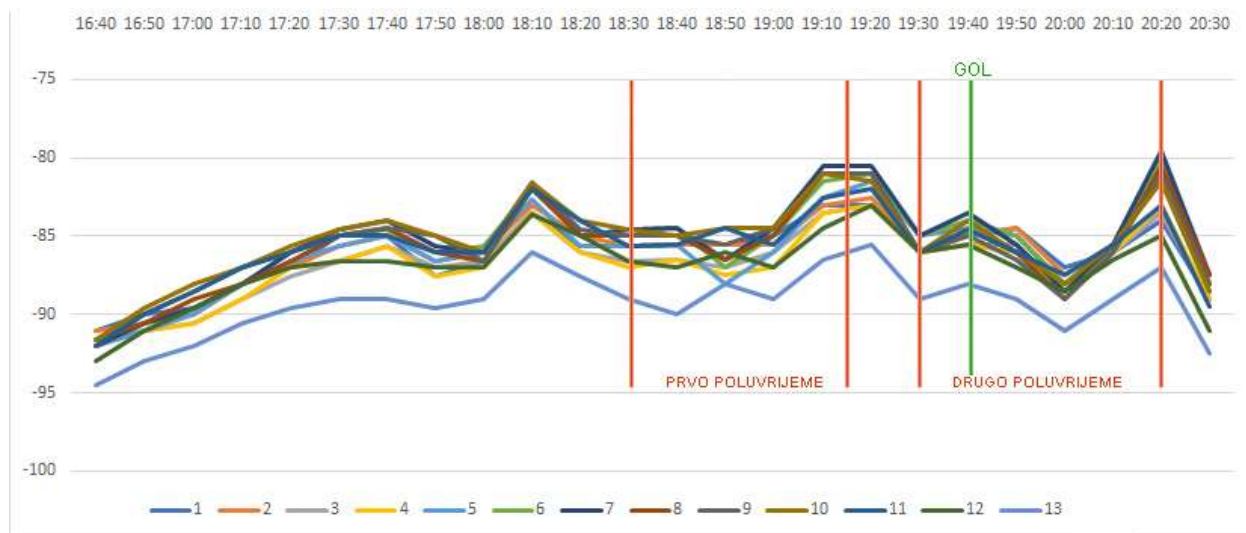
Mjerenje u Chanalyzeru nam otkriva prosječnu snagu signala pristupnih točaka koje detektira. Pošto su pristupne točke raspoređene posvuda po stadionu može se pretpostaviti da su ovi signali jako slični onome što vidi svaki klijent koji se spaja na pripadajuću mrežu.



Slika 30: Prosječna snaga signala pristupnih točaka 2.4GHz

Može se zaključiti da će za svakog klijenta, a to vrijedi i za pristupnu točku, sve druge pristupne točke i klijenti u prosjeku biti na snagama signala -70 do -65 dB (slika 30). Što nam govori da će s njima dijeliti propusnost kanala u slučaju da se nađu na istom kanalu, to jest da će stvarati bitan šum ako se radi o preklapajućim kanalima.

3.4.5. Razina šuma

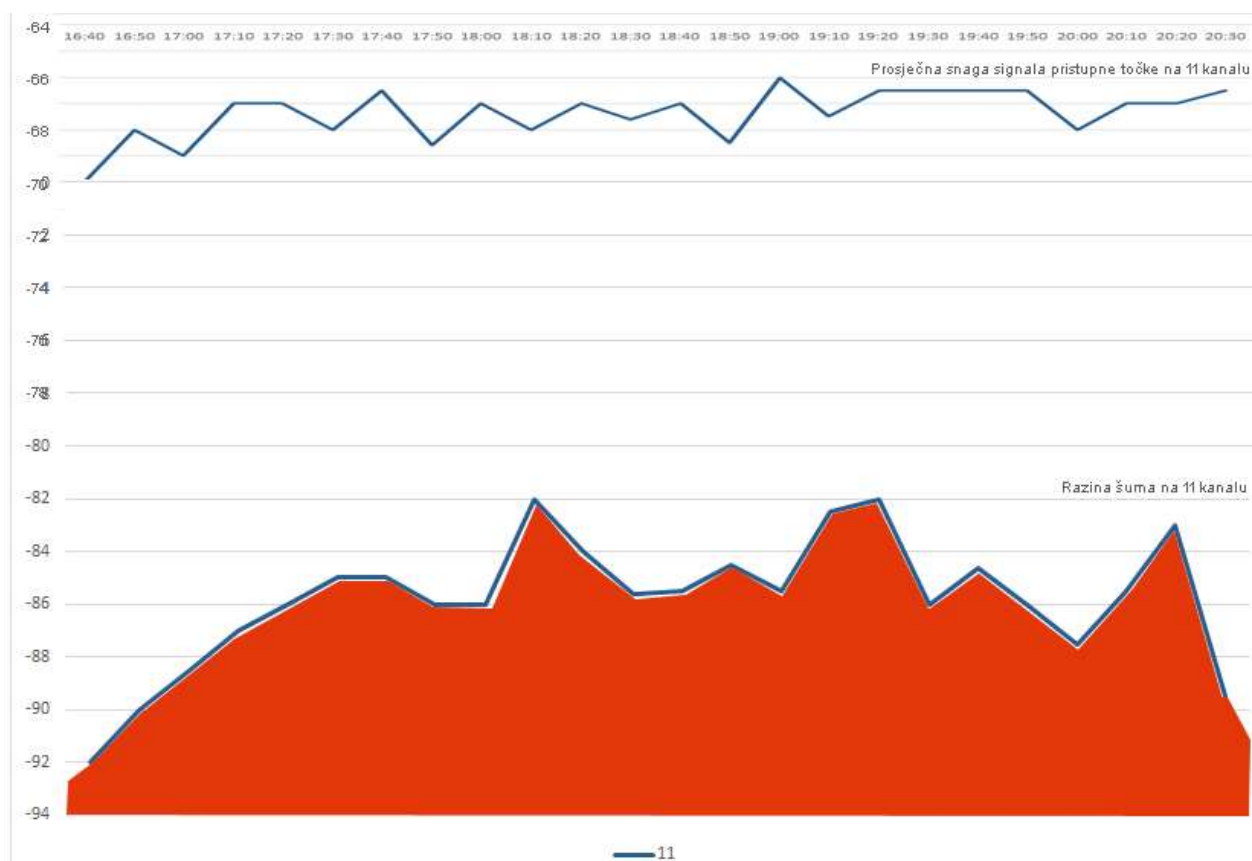


Slika 31: Šum po kanalima 2.4 GHz

Iz prikaza razine šuma (slika 31) može se vidjeti da je stalni šum (kada nije utakmica) negdje između -95 i -90 dB što je normalno za gradske uvjete.

Iz grafa se vidi i da se već sat vremena prije utakmice gušenje povećava na -85 dB, te na krajevima oba poluvremena dostiže maksimum od -80 dB. Može se primijetiti i da postoji malo povećanje interferencije u trenutku gola.

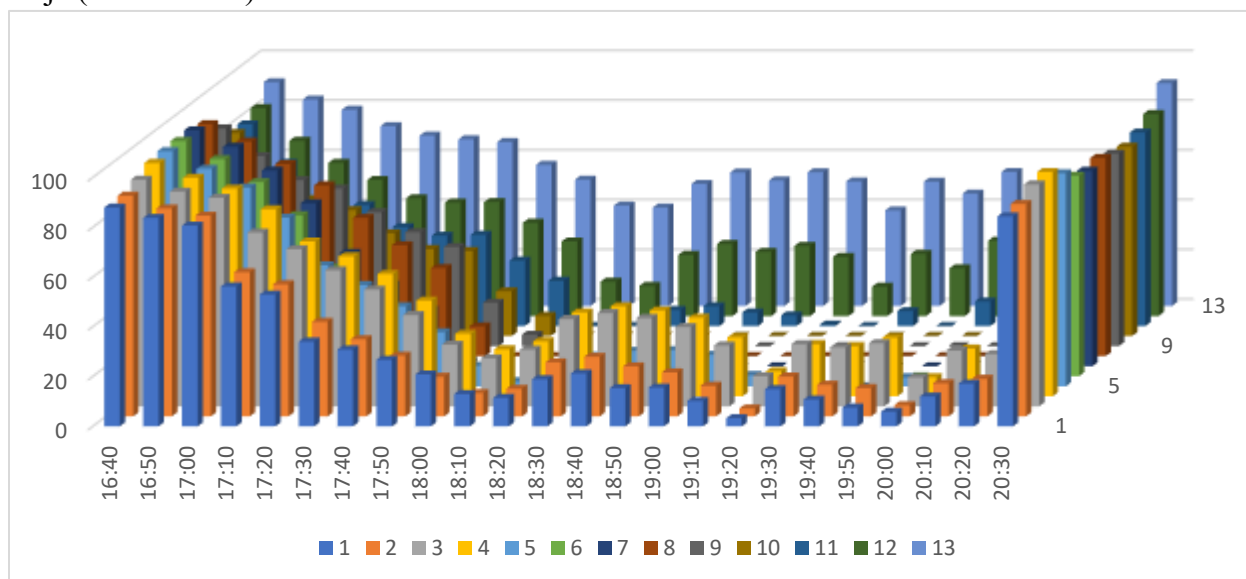
Uzrok šuma izgleda nije nešto što utječe na snagu signala ostalih pristupnih točaka i grafovi se ne poklapaju. Na slici 32 vidljiv je i prosječno dostupan omjer signala i šuma (engl. SNR) za 11. kanal (područje između dva grafa).



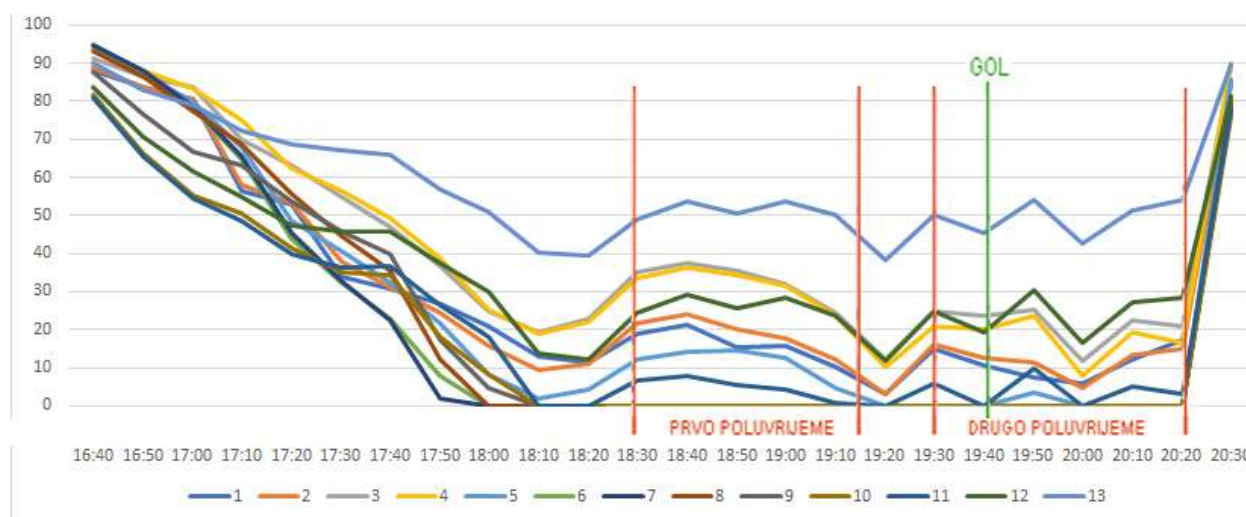
Slika 32: Šum i snaga prosječne pristupne točke tijekom utakmice

3.4.6. Kvaliteta kanala

Chanalyzer nam uz sve ostale podatke daje i ocjenu za svaki kanal. Svaka ocjena se dobiva tako da se uzme u obzir broj uređaja koji dijele kanal i susjedne preklapajuće kanale. Za svaki signal se uzima u obzir snaga njegova signala te se tako povećava ili smanjuje njegov utjecaj na promatrani kanal. U ovom se proračunu koristi cijela širina od 20 MHz Wi-Fi kanala. Više razine snage u blizini središta kanala negativno će utjecati na ocjenu. Visoka ocjena od 90 ili viša može se protumačiti kao "5", a 80 ili viša je "4." Sve što je ispod 70 ne preporučuje se za upotrebu Wi-Fi-ja (slike 33 i 34).



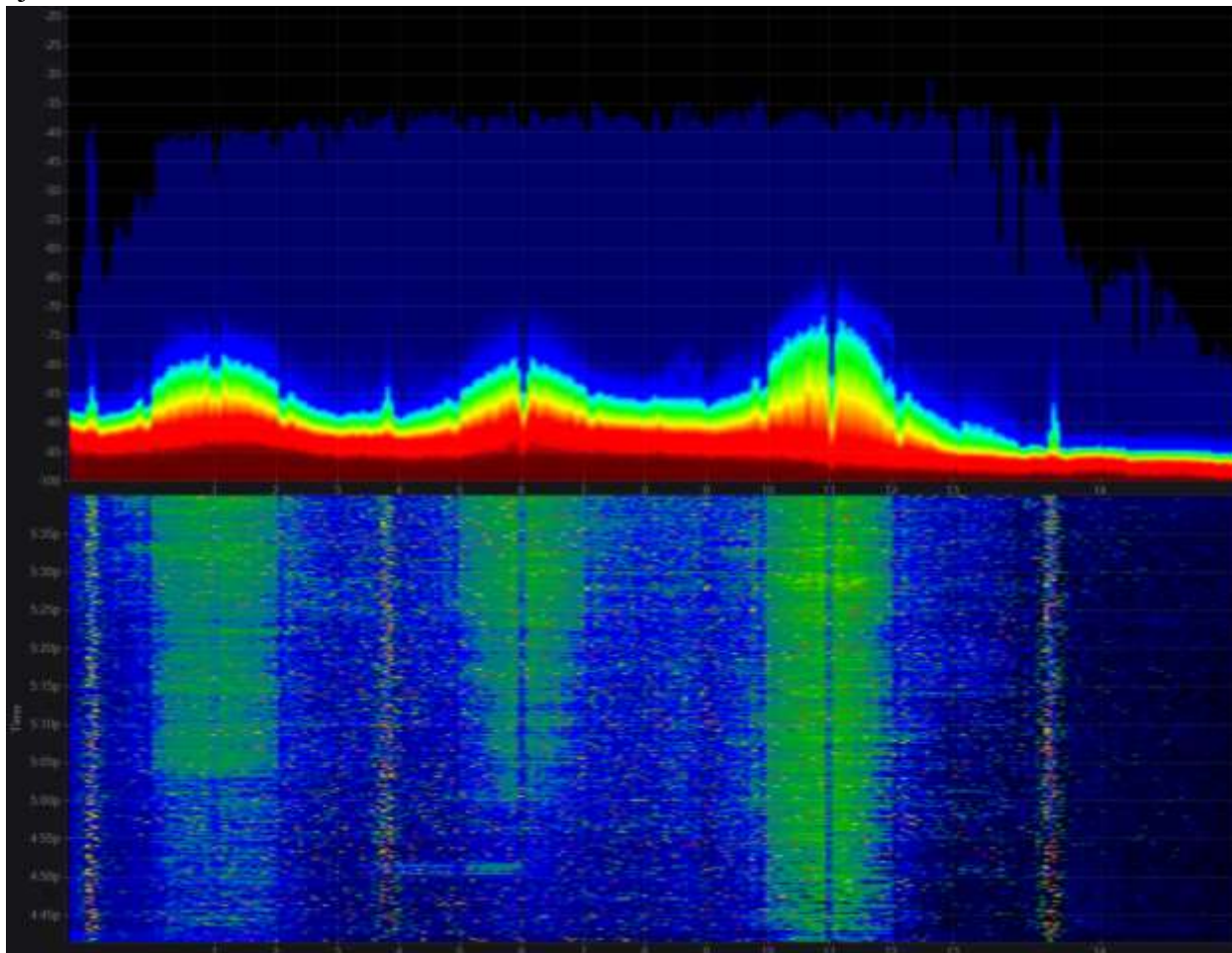
Slika 33: Ocjena za sve kanale tijekom utakmice



Slika 34: Ocjena za sve kanale tijekom utakmice s glavnim događajima

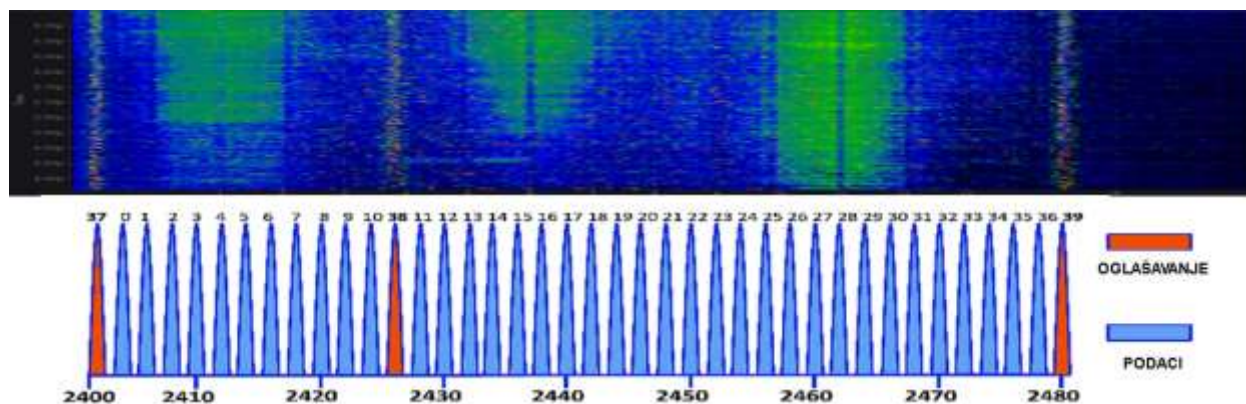
3.4.7. Vizualni prikaz svih paketa na 2.4 GHz kanalima tokom utakmice

Grafički prikaz podataka nam prikazuje kako se promet na pojedinim kanalima povećava s dolaskom gledatelja na stadion. Kako se radi o skoro 4 sata snimke mjerenje je prikazano u 4 dijela.



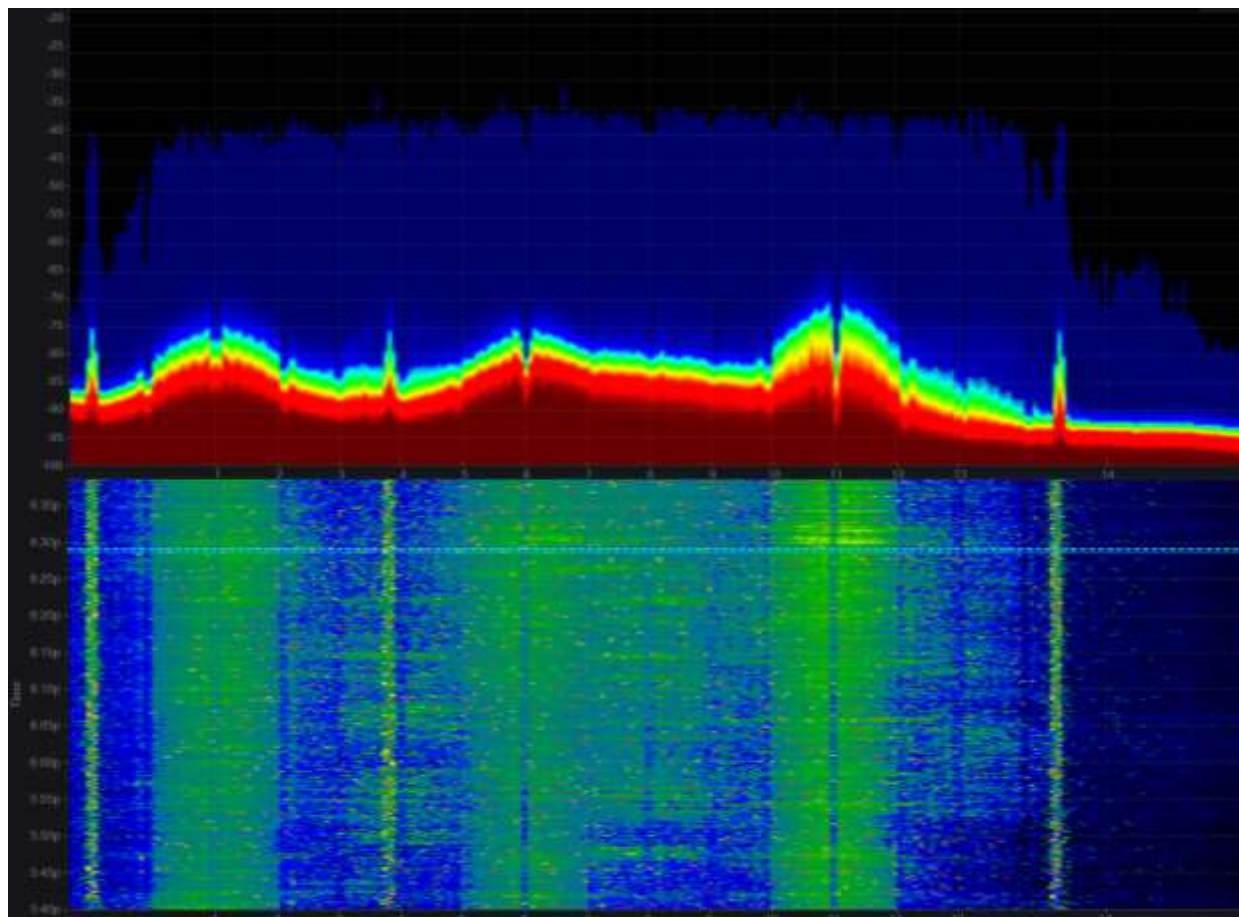
Slika 35: Paketi tijekom prvog sata mjerenja

Na slici 35 je vidljiv prvi sat mjerenja od 16:40-17:40. Kako su na jedanaestom kanalu službene pristupne točke promet na njima prvi započinje. Radi se zaštitarima koji prvi dolaze na stadion i dežuraju dok policija pregledava cijeli prostor te stalni uposlenici kluba koji rade na zadnjim pripremama. U ovom vremenskom periodu broj klijenata na svim ovim kanalima podiže se s 10 na 100. Kako postoje i uređaji između 1., 6. i 11. kanala pojavljuje se po svugdje sve više plave boje. Krajnje desno vidljiva je tamno plava boja koja nam pokazuje kako izgleda dio spektra bez prometa. Može se primijetiti i tri uska signala koja nisu Wi-Fi kako također pojačavaju intenzitet. Po izgledu njihova signala može se pronaći o kakvim se uređajima radi.



Slika 36: Paketi tijekom prvog sata mjerenja

Bluetooth niske razine energije (BLE) je vrsta Bluetootha koja odašilje s 10-50 % snage običnog Bluetootha te se koristi kod mnogih svakodnevnih uređaja. Kao što je vidljivo po slici 36 kanali na kojima se šalju kontrolni signali i oglašava prisutnost Bluetooth uređaja su točno ono što se vidi na snimci.



Slika 37: Paketi tijekom drugog sata mjerenja

U drugom satu (slika 37) mjerenja vidi se vrijeme neposredno pred utakmicu (plava crta označava početak). Bluetooth signali dobivaju na intenzitetu ali samo minimalno ometaju 1., 6. i 11. kanal koji se konstantno koriste. Raste potrošnja i na ostalim kanalima, na 4. kanalu raste potrošnja usprkos velikoj smetnji sa strane preklapajućeg Bluetooth kanala. Također 8. i 13. kanal imaju povećanje prometa i stvaraju veliku interferenciju 11. kanalu. Naravno i 11. kanal sa svim svojim prometom postaje smetnja njima.

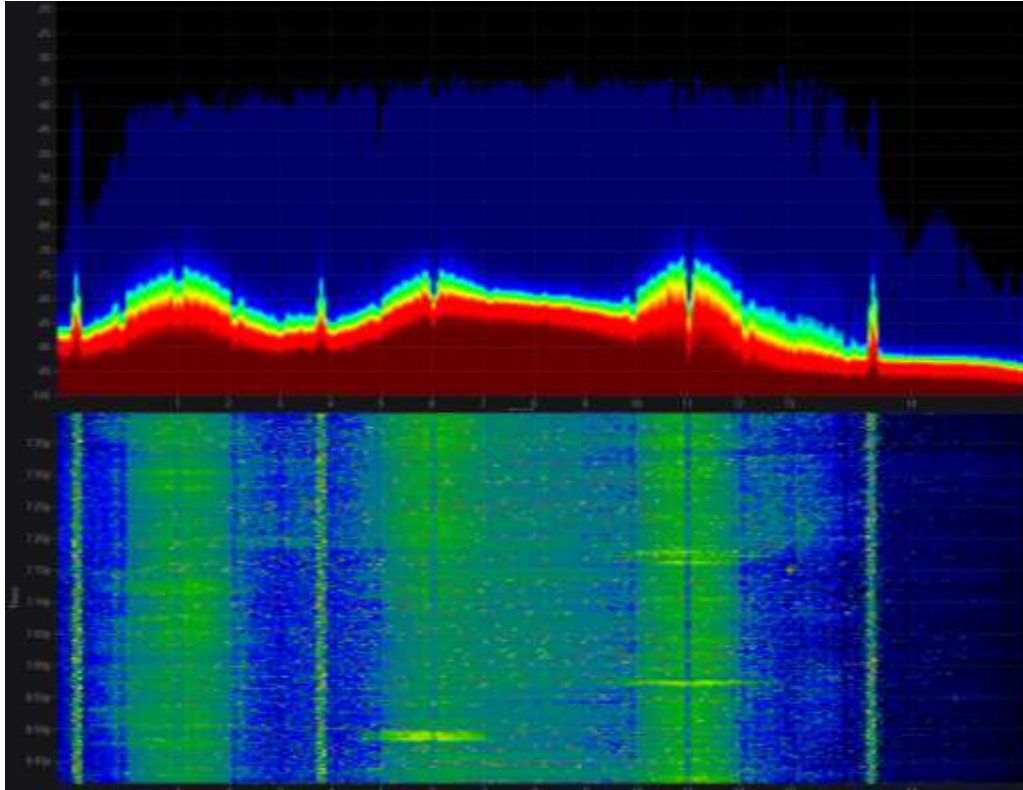


Slika 38: Signali svih uređaja na 6. kanalu kroz pola sata prije utakmice

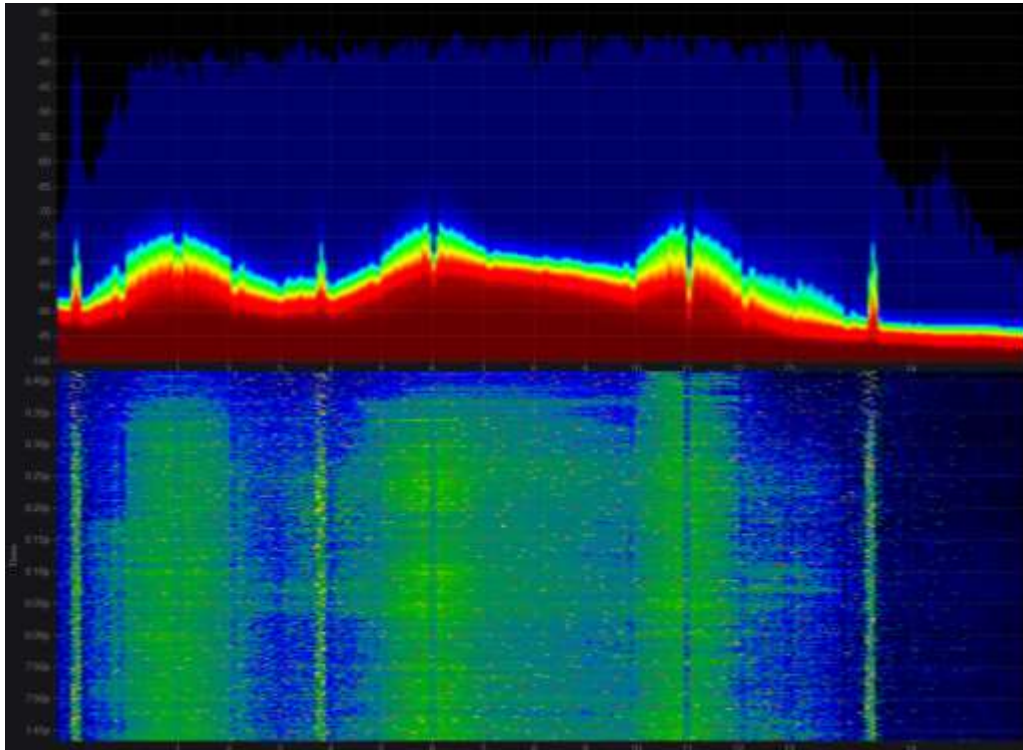
Na 6. kanalu najviše je preklapanja, prema prijašnjim podacima i ocjeni kanala slika 38 predstavlja signale kada je ocjena 0. U ovih pola sata na ovoj frekvenciju pokušala su raditi 43 uređaja dok se na susjednim, preklapajućim kanalima nalazi još desetak uređaja. Zanimljivo je da su svi ovi signali poprilično jaki (oko -60 dB) te bi u trenucima kada rade mogli pružiti i maksimalnu brzinu. No kako je teško pronaći da je i jedan signal stabilan, vidljivo je da ima samo par signala koji su „izdržali“ duže od minute bez dužeg prekida.

Na trećem satu (Slika 39) vidi se prvo poluvrijeme te stanku u 19:15. Na poluvremenu ima malo povećanje prometa. Može se vidjeti i da je interferencija (crveno) na sva tri kanala na -80 što je već velika razlika od -95 prije ili poslije utakmice.

Na četvrtom satu snimke (Slika 40) vidi se kraj same utakmice. 1. i 6. kanal se naglo čiste, 10 do 15 minuta nakon utakmice, dok 11 kanal ostaje u funkciji. Istoga koriste novinari koji nakon utakmice ostaju na tribinama napisati i poslati izvještaje o utakmici.



Slika 39: Paketi tijekom trećeg sata mjerenja



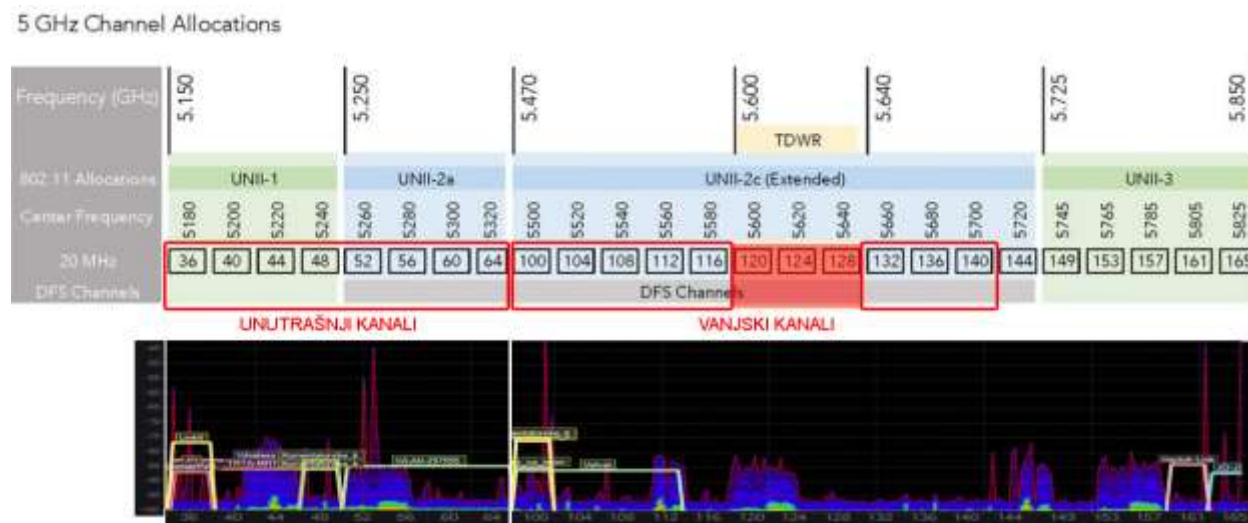
Slika 40: Paketi tijekom četvrtog sata mjerenja

3.5. REZULTATI MJERENJA 5 GHz SPEKTRA

5 GHz spektar je u današnje vrijeme glavni oslonac pri rješavanju problema velikog broja klijenata na istom mjestu ili pak u slučaju zagušenog 2.4 GHz spektra. U našem slučaju na ovim frekvencijama ima stotinjak klijenata, no svi su oni pod kontrolom stadiona te na najoptimalnijim kanalima.

Pristupnih točaka koje nisu pod kontrolom stadiona zajedno s par PTP linkova ima samo 5 te za vrijeme utakmice bude još desetak pristupnih točaka na ovim frekvencijama. S obzirom na dostupne kanale tu ne bi trebalo očekivati probleme, a ni iskorištenost kanala ne bi trebala biti zamjetna.

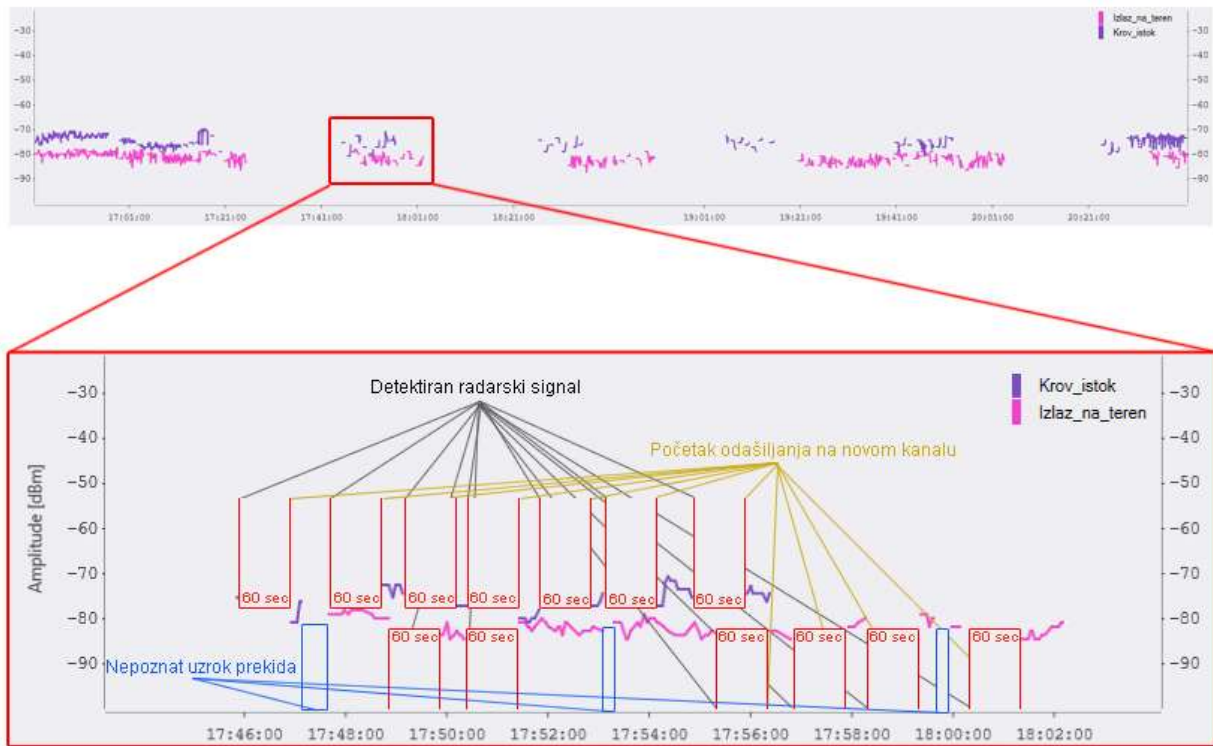
No u našem slučaju problemi postoje i na ovim frekvencijama. Dostupni kanali i snimka prometa (Slika 41) prikazuju kanale koji se koriste na stadionu.



Slika 41: Dostupni kanali na 5 GHz

Situacija na 5 GHz spektru je problematična najvjerojatnije jer se stadion nalazi u blizini vojne baze i nautičke luke u kojoj ima dosta prometa te se u ljetno doba može vidjeti dosta radara koji sile pristupne točke na promjenu kanala. Kako se vidi na slici polovica unutarnjih i svi vanjski kanali su obavezni biti podešeni na dinamički odabir frekvencije (engl. DFS). To jest svaka pristupna točka će u slučaju otkrivanja radara na kanalu na kojem radi, isti zabraniti na 30 minuta, testirati sljedeći kanal jednu minutu te ako na njemu ne postoji neki drugi radar, prijeći na taj kanal.

Za vrijeme utakmice se događa da se na svim dostupnim kanalima otkriva radarski signal te se pristupne točke, sukladno pravilima, nakon što se potroše svi dostupni kanali ugase.



Slika 42: Signali dvije pristupne točke na vanjskim kanalima na 5 GHz

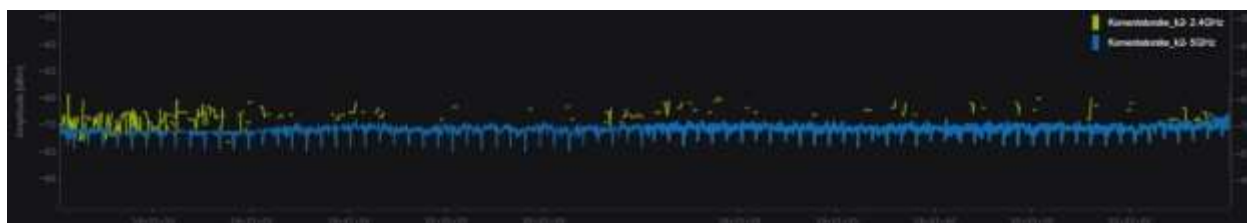
Na prikazu signala dvije vanjske pristupne točke pod upravljanjem stadiona (slika 42) vidljivo je da gotovo polovicu vremena nisu odašiljali zbog otkrivanja radara. Čak i ovo vrijeme kada su radili bilo je konstantno prekidano dok bi se testirao novi kanal. Kako se zasigurno ne radi uvijek o stvarnim radarskim signalima, može se pretpostaviti da su oni lažni, jer u vremenu kada nije utakmica može se naći najviše dva, tri kanala koja bi bila zabranjena, ali nikada svih osam kao za vrijeme utakmice.

Ovom problem se u praksi doskočilo tako da se, kako se radi o natkrivenom prostoru, vani postave dva unutarnja uređaja, koji tada mogu neometano raditi na unutarnjim kanalima koji nisu pod obvezom dinamičkog odabira frekvencije (slika 43).



Slika 43: Signali dvije pristupne točke na unutarnjim kanalima na 5 GHz

Signal obje pristupne točke zbog toga je stabilan i svi klijenti koji su na njih spojeni mogu neometano raditi. Za usporedbu ako se pogledaju iste pristupne točke ali ovaj puta pojedinačno zajedno sa signalom koji odašilje 2.4 GHz antena iste pristupne točke (slike 44 i 45).



Slika 44: Signali pristupne točke Komentatorske_k2 na 2.4 GHz i 5 GHz



Slika 45: Signali pristupne točke Komentatorske_k1 na 2.4 GHz i 5 GHz

Ovdje se treba napomenuti da je točka Komentatorske_k2 udaljenija i nekoliko pregrada dalje dok je pristupna točka Komentatorske_k1 udaljena desetak metara od našeg mjernog uređaja i nema nikakvih zapreka između njih. Iz grafova se vidi da je signal, na 2.4 GHz, na početku mjerenja, 2 sata prije početka utakmice, poprilično stabilan. No jako brzo počinje jako varirati u snazi te nestajati kompletno. Važno je i da su obje pristupne točke radile na istom 11. kanalu te je na njima bilo spojeno maksimalno dvadesetak uređaja. Za isto vrijeme signal na 5 GHz je stabilan i neometan, no zbog svoje prirode i unutrašnjeg kanala uvijek malo slabiji.

3.6. OTKRIVANJE I OGLAŠAVANJE BEŽIČNIH MREŽA

Kako je poznato o kojem se broju bežičnih mreža radi, te o kojem se broju klijenata radi, moguće je izračunati i koliko se „beskorisnog“ prometa stvara na kanalima. Bežični klijenti otkrivaju susjedne pristupne točke tako da aktivno (šaljuci) ili pasivno (samo slušajući) skeniraju spektar. Aktivno otkrivanje šalje kratke poruke na svim kanalima, na najmanjoj mogućoj brzini sa zahtjevom za otkrivanje bežičnih mreža (engl. probe request) te time utječe na brzinu mreže. A pristupne točke, također najmanjom mogućom brzinom šalju svoje signale u kojima oglašavaju svoje podatke za svaku bežičnu mrežu (engl. beacon).

Kako je za većinu bežičnih mreža najmanja brzina 1 Mbps zbog podržavanja 802.11b standarda, oko 90 % današnjih pristupnih točaka svoje oglašavanje radi pri ovoj brzini na 2.4 GHz kanalima. Na 5 GHz kanalima minimalna brzina je 6 Mbps te se oglašavanje bežične mreže radi tom brzinom. Ovo oglašavanje se također u 90 % slučajeva odrađuje svakih 100 ms te je najčešća veličina tog paketa 150 - 300 bajtova. Kada se to pretvori u promet na bežičnoj mreži dolazi se do prosječne brojke od 0.018 Mbps. Ta brojka se množi s brojem SSID-eva koje oglašava pristupna točka (uključujući skrivene) te naravno sa brojem pristupnih točaka na tom i preklapajućim kanalima.

Number of APs on Channel*	Number of SSIDs									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.46%	0.91%	1.37%	1.82%	2.28%	2.74%	3.19%	3.65%	4.10%	4.56%
2	0.91%	1.82%	2.74%	3.65%	4.56%	5.47%	6.38%	7.30%	8.21%	9.12%
3	1.37%	2.74%	4.10%	5.47%	6.84%	8.21%	9.58%	10.95%	12.31%	13.68%
4	1.82%	3.65%	5.47%	7.30%	9.12%	10.95%	12.77%	14.59%	16.42%	18.24%
5	2.28%	4.56%	6.84%	9.12%	11.40%	13.68%	15.96%	18.24%	20.52%	22.80%
6	2.74%	5.47%	8.21%	10.95%	13.68%	16.42%	19.15%	21.89%	24.63%	27.36%
7	3.19%	6.38%	9.58%	12.77%	15.96%	19.15%	22.35%	25.54%	28.73%	31.92%
8	3.65%	7.30%	10.95%	14.59%	18.24%	21.89%	25.54%	29.19%	32.84%	36.48%
9	4.10%	8.21%	12.31%	16.42%	20.52%	24.63%	28.73%	32.84%	36.94%	41.04%
10	4.56%	9.12%	13.68%	18.24%	22.80%	27.36%	31.92%	36.48%	41.04%	45.61%
11	5.02%	10.03%	15.05%	20.07%	25.08%	30.10%	35.12%	40.13%	45.15%	50.17%
12	5.47%	10.95%	16.42%	21.89%	27.36%	32.84%	38.31%	43.78%	49.25%	54.73%
13	5.93%	11.86%	17.79%	23.71%	29.64%	35.57%	41.50%	47.43%	53.36%	59.29%
14	6.38%	12.77%	19.15%	25.54%	31.92%	38.31%	44.69%	51.08%	57.46%	63.85%
15	6.84%	13.68%	20.52%	27.36%	34.20%	41.04%	47.89%	54.73%	61.57%	68.41%
16	7.30%	14.59%	21.89%	29.19%	36.48%					
17	7.75%	15.51%	23.26%	31.01%	38.78%					
18	8.21%	16.42%	24.63%	32.84%	41.04%					
19	8.67%	17.33%	26.00%	34.66%	43.33%					
20	9.12%	18.24%	27.36%	36.48%	45.61%					
21	9.58%	19.15%	28.73%	38.31%	47.89%	57.46%	67.04%	76.62%	86.19%	95.77%

VARIABLES:

Beacon Data Rate (Mbps) 802.11a 6 Mbps

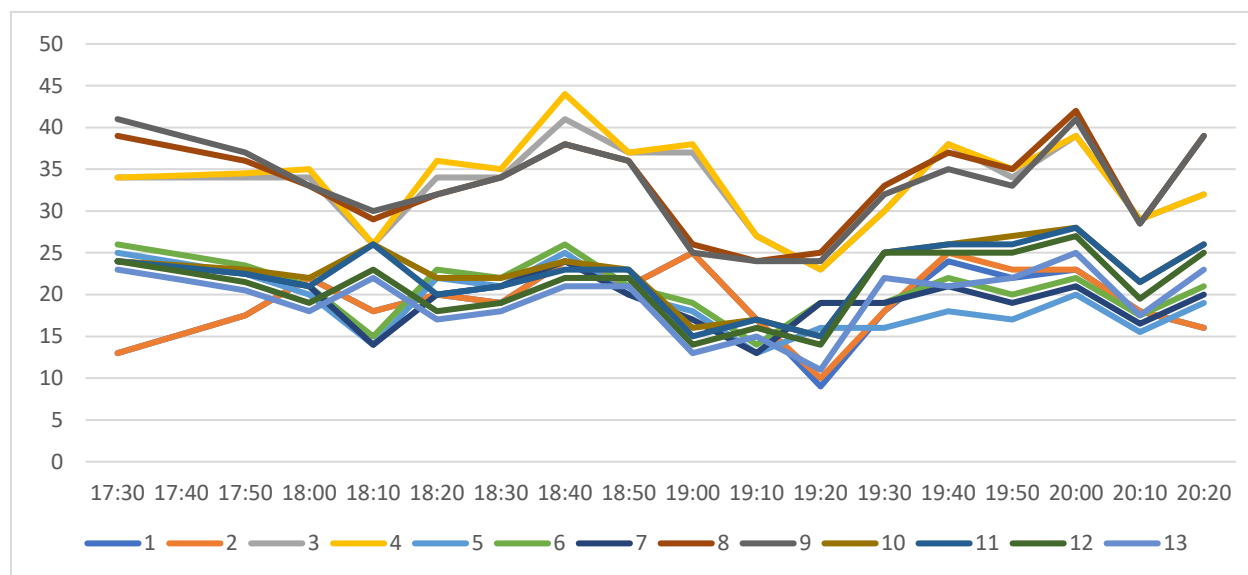
Beacon Frame Size (Byte) 300

Beacon Interval (ms) 102.4

Slika 46: Izračun potrošnje brzine zbog oglašavanja bežičnih mreža pri brzini 6 Mbps

Za slučaj stadiona poznata je i točna veličina paketa za pristupne točke pod upravljanjem stadiona, a to je 300 bajtova te je poznato da se na 15 pristupnih točaka vidljivih na tribinama odašilje 39 SSID-eva, što bi značilo 13 po kanalu (1., 6. i 11.) no kako se konfiguracija radila s prije spomenutim na umu, iako je b standard ostao podržan zabranjene su brzine ispod 6 Mbps te se time minimalna brzina povećala i bitno smanjio negativan utjecaj. Samo ovaj sustav koristi 5,93 % svakog od tri osnovna kanala za oglašavanje svojih mreža.

Za sve ostale pristupne točke na kanalima 1., 6. i 11. brojka pristupnih točaka se kreće oko 20, dok je za kanale koji su između njih ta brojka duplo veća i kreće se oko 35 (slika 47).



Slika 47: Broj preklapajućih kanala na 2.4 GHz

Za ove pristupne točke, pošto nije poznata stvarna veličina oglašavajućih paketa, uzet je prosjek od 225 bajtova, te pošto sve oglašavaju b standard može se pretpostaviti i da odašilju brzinom 1 Mbps što znači da se „bespotrebno“ troši 40,27% spektra bilo kojeg kanala.

Kada se ovim 40,27 % doda 5,93 % iz ranijeg izračuna vidljivo je da je gotovo 50 % kanala zauzeto prometom oglašavanja pristupnih točaka pri brzini 1Mbps.

Na stadionu za vrijeme utakmice ima i 30 000 ljudi, što u praksi znači i 30 000 uređaja koji po potrebi detektiraju bežične mreže. Kako uređaji uglavnom pasivno „slušaju“ oglašavanje bežičnih mreža, a samo u određenim slučajevima pokušavaju aktivno otkriti iste, mora se pretpostaviti koliko od ovih uređaja uopće aktivno koristi Wi-Fi za vrijeme utakmice, a koliko ga ne upotrebljava.

Prosječni interval u kojem prosječni mobilni uređaj korisnika, dok mu je ekran upaljen, skenira bežične mreže je oko 1 minute dok se isti ubrzava na 10 sekunda ako korisnik uđe u postavke bežične mreže. Podaci koji se generiraju su oko 100 bajtova. Testiraju se svi kanali i čeka odgovor od svih uređaja na njima.

Ovdje ćemo se pozvati na ranije istraživanje („Is There WiFi Yet? How Aggressive Probe Requests Deteriorate Energy and Throughput“, Xueheng Hu, Lixing Song, Dirk Van Bruggen, Aaron Striegel. University of Notre Dame) na većem stadionu Notre Dame, Indiana. Kapacitet ovog stadiona je 80 000 gledatelja i također nema javni Wi-Fi. Mjerenja pokazuju da „samo“ 16 % uređaja posjetitelja (ako se pretpostavi da svaki gledatelj ima jedan uređaj) odašilje zahtjeve za otkrivanjem bežičnih mreža na 2.4 GHz. U prosjeku svaki taj uređaj pošalje desetak zahtjeva tijekom utakmice što proizvede u prosjeku 2500 zahtjeva u minuti. U 92 % slučajeva podaci se šalju brzinom od 1 Mbps, ostali u pravilu 6 Mbps pa se može izračunati da ukupno troše 3.111 % propusnosti kanala.

U svakom slučaju kada se ove brojke podijele na kanale, pošto se zahtjev za otkrivanjem šalje redom na sve kanale 1, 2, 3, ... 13, a prvi kanal je rubni pa će i utjecaj biti manji, omjer se dijeli 0.72 % za prvi kanal, te 1. 20 % za 6. i 11. kanal.

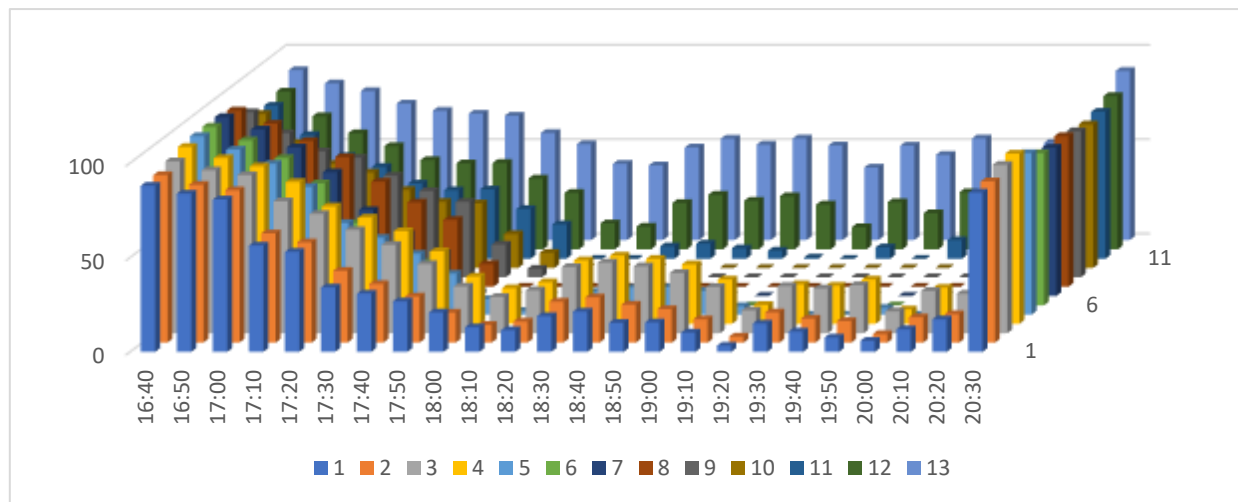
Notre Dame		80 000 gledatelja		Poljud		30 000 gledatelja	
	6Mbps	1Mbps		6Mbps	1Mbps		
zahtjeva u minuti	200	2300	zahtjeva u minuti	75	863		
iskorištenost kanala	0.044 %	3.067 %	iskorištenost kanala	0.017 %	1.151 %		

Slika 48: Izračun iskorištenosti kanala zbog zahtjeva za otkrivanjem bežičnih mreža

Ako se primijene ove brojke na stadion Poljud dobiva se 0.27 % za prvi kanal, te 0.45 % za 6. i 11. kanal. Kako vidimo utjecaj nije velik te se može reći da iako su izvorni podaci o količini ovih paketa sa drugog stadiona nema razloga vjerovati da je stvarna situacija različita od one na Poljudu.

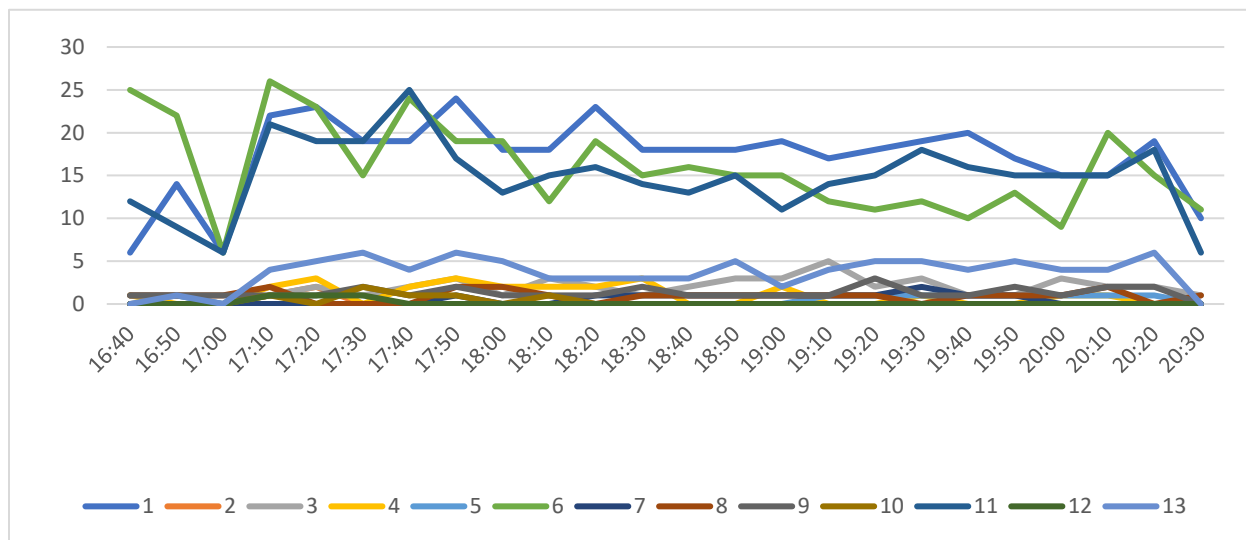
3.7. OSVRT NA REZULTATE

Kako je dosad uočeno prema signalu na 2.4 GHz učinkovitost je vrlo lošu. Kako bi se definiralo sve uzročnike potrebno je proučiti najvažnije podatke.



Slika 49: Ocjena za sve kanale tijekom utakmice

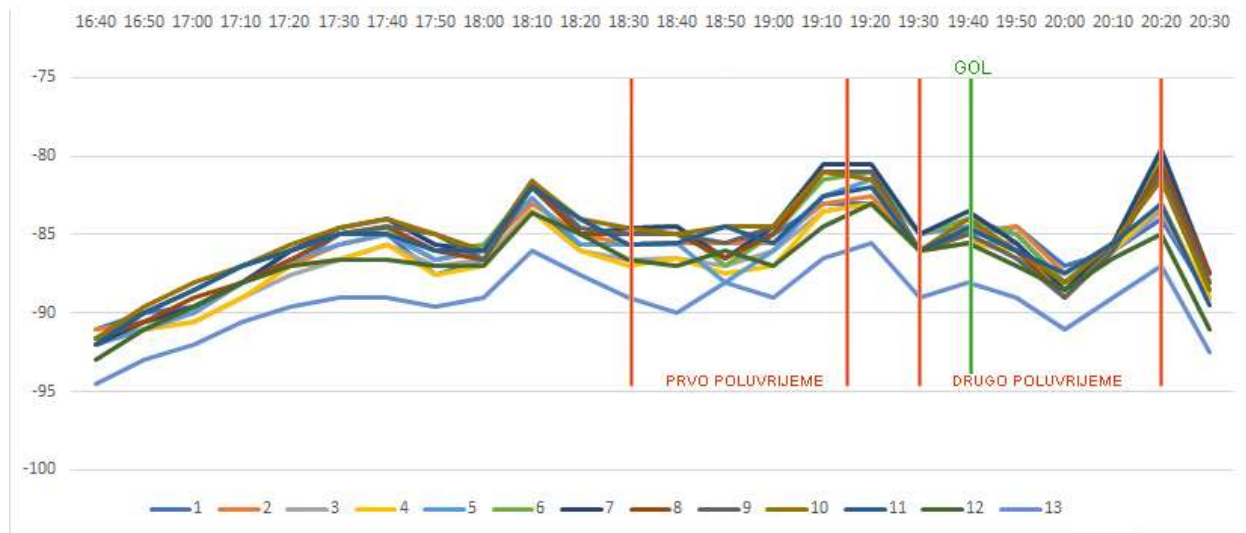
Iz ocjene kvalitete svih kanala (slika 49) vidljivo je da je sredina spektra oko 6. kanala kompletno van funkcije s ocjenom 0, dok su kanali 1 i 11 na oko 20 tijekom utakmice. Kako nam Chanalyzer ne preporuča postavljanje pristupne točke na vrijednosti ispod ocjene 70 može se reći da je situacija poprilično loša. Već dva sata prije utakmice spektar je toliko zagušen da se ne može jamčiti stabilan signal na nijednom kanalu 2.4 GHz spektra. Svi snimljeni signali imaju ogromne prekide i nestabilan signal. Najočitiiji razlog je sama količina istovremenih pristupnih točaka (slika 50).



Slika 50: Broj pristupnih točaka 2.4 GHz - Chanalyzer

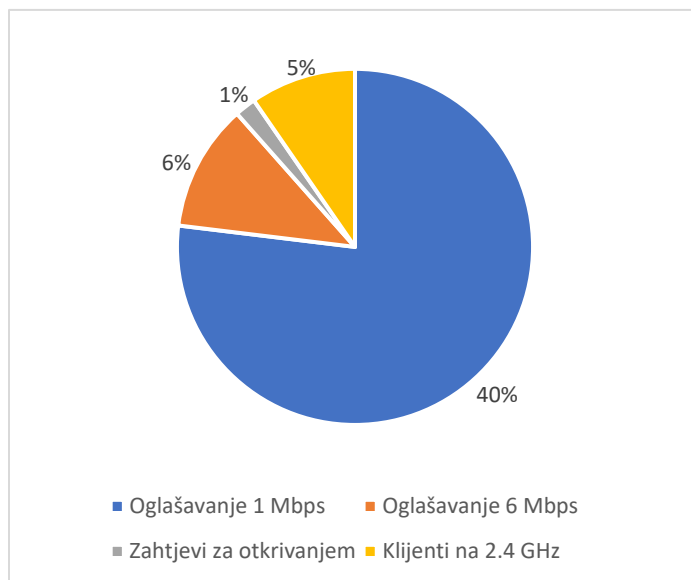
Na kojem god kanalu pokušali komunicirati, dijelit će se s bar 15 drugih uređaja te sa još 3 uređaja i bluetoothom koji se preklapaju s tim kanalom.

Uz ovo treba uzeti u obzir da i signal mora biti dovoljno jak jer se razina potpunog šuma podiže tijekom utakmice (slika 51).



Slika 51: Šum po kanalima 2.4 GHz

Sada kada je poznato da je dobar dio prometa potrošen na oglašavanje kanala sa strane pristupnih točaka, oko 46 % te se još 1 % potroši za zahtjeve uređaja za otkrivanjem bežičnih mreža, vidljivo je da je skoro polovica propusnosti kanala izgubljena uglavnom na kontrolne signale na minimalnoj brzini od 1 Mbps (slika 52).



Slika 52: Udio prometa prema uzroku

Kako kod izračuna nije uračunato ni najmanje retransmisija uzrokovane šumom, pa su ove brojke sigurno još daleko veće. Kako je poznato i da je broj korisnika na 2.4 GHz tijekom utakmice malen, tek nekih 50, od kojih je polovica pod nadzorom stadiona pa je znano i da je njihov promet samo par Mbps može se zaključiti da je gotovo sav snimljen promet zapravo oglašavanje i zahtjevi za otkrivanje pristupnih točaka.

3.8. MOGUĆA POBOLJŠANJA

Kako su s popriličnom sigurnošću utvrđeni uzroci „raspadanja spektra“ na 2.4 GHz, te izvori smetnji prekida na 5 GHz, mogu se definirati smjernice koje bi pomogle pri podešavanju i upravljanju trenutnim i budućim stadionskim sustavima.

3.8.1. Izmjene na 2.4 GHz

Na 2.4 GHz spektru može se zaključiti da su kanali koji su najmanje opterećeni 1. i 13. jer su krajnji te će utjecaj oglašavanja pristupnih točaka, koje prolazi kroz sve kanale, biti 40 % manji nego na srednjim kanalima. Širina kanala naravno mora biti 20 MHz. Samim time će utjecaj oglašavanja pristupnih točaka i zahtjevi za otkrivanjem pasti s 47 % na 32 %.

Kako je pod nadzorom stadiona tridesetak pristupnih točaka (60 SSID-eva) od kojih je samo dio vidljiv na tribinama stadiona. Potrebno je sve pristupne točke koje se ne planira koristiti na tribinama pomaknuti na kanale koje ne koristi na tribinama. Sve pristupne točke na ulazima stadiona ili pak u unutrašnjim prostorima mogu raditi na 6. kanalu koji na tim pozicijama nije toliko zagušen, te time osloboditi 1. i 13. kanal za tribine stadiona. Trenutna konfiguracija da svi ovi uređaji (osim 2 najvažnija na 11. kanalu) mogu birati između 1., 6. i 11. kanala nije najoptimalnija za vrijeme velikih utakmica. Preporuka bi bila da se definiraju izmjene (profil) odašiljanja koje bi se podesio samo za najveće utakmice.

Kako su na istom sustavu već zabranjene brzine ispod 6 Mbps te se trenutno troši oko 6 % propusnosti ostaje podignuti period oglašavanja bežičnih mreža s 100 ms na 1 s. S ovim bi smanjili ovaj utjecaj za 10 puta. No dobit će se malo gore performanse kod prebacivanja klijenta s jedne na drugu pristupnu točku.

S ovih par izmjena smanjio bi se broj „nepotrebnih“ paketa i oslobodio spektar na željenim kanalima za oko 20 %.

3.8.2. Izmjene na 5 GHz

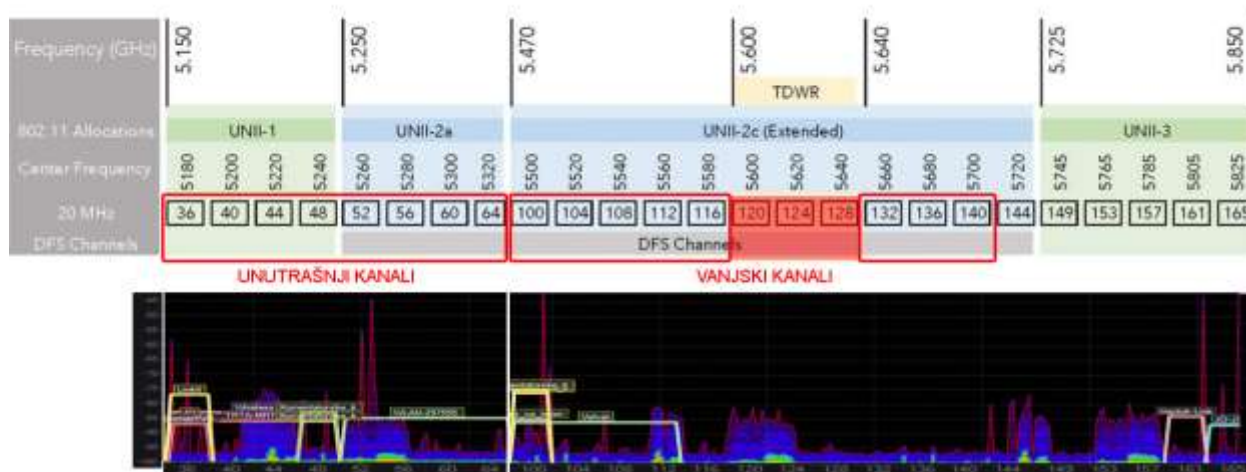
Na vanjskim frekvencijama (kanali od 100 do 140) zbog radarskih signala, bili oni stvarni ili uzrokovani šumom, trenutna Cisco oprema ne može funkcionirati na njima. Osjetljivost uređaja je već postavljena na minimum te ova oprema ne može koristiti unutarnje kanale ili kanale iza 140 koji bi bili izvan obveze dinamičkog odabira frekvencije što oprema nekih drugih proizvođača može. Periodi u kojima ova oprema radi ispravno su kratki i nepouzdani.

Na unutarnjim kanalima postoje samo dva unutarnja uređaja koja su oba radila bez problema na kanalima koji nisu pod obvezom dinamičkog odabira frekvencije, iako isti nisu detektirali radare ni na unutarnjim kanalima koji jesu pod obvezom dinamičkog odabira frekvencije. Najvjerojatnije jer su slabije osjetljivi, ali moguće je da istih nije ni bilo.

U ovom trenutku ne može se znati bi li oprema drugog proizvođača (vanjski uređaji koji mogu raditi na unutarnjim kanalima) otkrila radare i ugasila i ove frekvencije no poznato je da su kanali 36-48 jedini stabilni s tim da kanal 44 ima stalnu smetnju nepoznatog podrijetla.

Kanali od 52-64 bi također mogli biti stabilni no to može ovisiti o pojedinom uređaju i njegovoj osjetljivosti. Svi kanali koji su pod obvezom dinamičkog odabira frekvencije će se kasnije zabraniti ako su širine 20 MHz, a ne šire, pa je ta širina logičan odabir u ovom slučaju za sve kanale.

5 GHz Channel Allocations



Slika 53: Dostupni kanali na 5 GHz

Kako su poznati mogući kanali (slika 53) i njihova zagušenost može se napraviti i izračun najvećeg broja klijenata i njihove brzine. Naravno da tu ima mnogo nesigurnih varijabli, ali će ove brojke otkriti otprilike što će se moći napraviti u budućnosti.

Za ovu preporuku, to jest izračun, će se koristiti najnovije Wi-Fi 6 modele, kako bi se dobile maksimalne vrijednosti za trenutnu tehnologiju.

Pošto je ranije pokazano da je prosječna snaga signala koja je detektirana od uređaja -70 te da je zbog veličine stadiona (oko 200 m) „nemoguće“ sakriti ili izolirati neke pristupne točke i klijente te se svi uređaji na stadionu „vide“ može se pretpostaviti da se propusnost jednog kanala može iskoristiti samo jednom, no računat će se da se može iskoristiti maksimalno prostornih tokova.

Na 1. i 13. kanalu, ako se podesi opremu prema gornjim preporukama, može se maksimalno iskoristiti do 70 % propusnosti kanala dok se na 6. kanalu može iskoristiti 60 %. 802.11ax omogućava po 4 prostorna toka za slanje i primanje te brzinu od 1147 Mbps. Ova tri kanala će u ovim uvjetima imati propusnost od 2300 Mbps.

Na 5 GHz računa se da se može iskoristiti svih 160 MHz spektra unutarnjih kanala i da nema smetnji, uz 8 prostornih tokova za slanje i primanje brzina nam raste na 9608 Mbps. Ukupna brzina koja se može ponuditi klijentima na stadionu Poljud iznosila bi nešto manje od 12 Gbps.

Broj klijenata koji se u praksi može spojiti na pristupne točke, to jest na jedan kanal na nekoj pristupnoj točki je 100 te kako imamo 11 funkcionalnih kanala od 20 MHz može se očekivati da bi mogli aktivno spojiti oko 1100 uređaja. Ovdje treba napomenuti i da je, ako isključimo enkripciju, teoretski moguće spojiti do 250 korisnika te bi ova brojka teoretski narasla do 2750.

Ako bi postojala oprema koja bi radila na vanjskim kanalima bez otkrivanja radara i iskoristila sve dostupne kanale na 5 GHz teoretski bi mogli doći do brzina od 30 Gbps, dok bi na takvu mrežu tada mogli spojiti 6250 klijenata.

4. ZAKLJUČAK

Analiza spektra bežičnih mreža je potrebna kod svih prostora velike gustoće klijenata jer, kako smo vidjeli kod Poljuda, situacija je jedinstvena i u mnogome ovisi o lokaciji. Bez dobre snimke stanja prije postavljanja sustava te testiranja rada pojedine pristupne točke na toj lokaciji nemoguće je predvidjeti sve eventualne smetnje, a time i potreban broj uređaja i ukupnu učinkovitost sustava.

Rezultati govore i da uređaji koji rade samo na vanjskim kanalima 5 GHz koji su pod obvezom dinamičkog odabira frekvencija, kao što su dva vanjska Cisco 1532I obuhvaćena ovim mjerenjima, ne mogu biti model kojim bi se nadograđivao sustav do pune učinkovitosti.

S informacijama prikupljenim samo ovim mjerenjem mogu se povećati učinkovitost postojećeg sustava do 20 %. Štoviše ukazalo se na nedostatke 2.4 GHz spektra te se može zaključiti da uza sve napore nikada neće biti dovoljno pouzdan da bi neki vitalan sustav o njemu ovisio. Svi bežični sustavi koji se koriste na stadionu trebaju se odvijati na frekvencijama koje nisu pod obvezom dinamičkog odabira frekvencija, te s time maksimalno osloboditi spektar 2.4 GHz za sustave koji to ne mogu.

Ovi rezultati zasigurno će biti najvažnije smjernice bilo kakve buduće nadogradnje Wi-Fi sustava gradskog stadiona Poljud.

5. LITERATURA

1. <https://www.metageek.com/support/downloads/> , 30.08.2019. -
download Chanalyzer
2. <https://www.acrylicwifi.com/en/downloads-free-license-wifi-wireless-network-software-tools/download-wifi-scanner-windows/> , 30.08.2019. -
download Acrylic Wi-Fi Professional – TRIAL
3. <https://www.ui.com/download/unifi/> , 2019.
UniFi Network Controller 5.14.22 for Windows - ranije instaliran
4. <https://software.cisco.com/download/home/284464214/type/280926587/release/8.5.103.0> , 2018.
Cisco Virtual Wireless Controller – ranije instaliran
5. Ekahau Site Survey Pro 9.0.3.221 – program i licenca ustupljeni od Smartnet d.o.o.
6. https://www.arubanetworks.com/assets/wp/WP_80211acInDepth.pdf , 20.07.2020
7. Is There WiFi Yet? How Aggressive Probe Requests Deteriorate Energy and Throughput, *Xueheng Hu, Lixing Song, Dirk Van Bruggen, Aaron Striegel*
University of Notre Dame
8. Realtime detection of degradation in WiFi network's goodput due to probe traffic, *Dheryta Jaisinghani, Sumit Roy, Vinayak Naik, srpanj 2015*
9. <https://r1ch.net/blog/wifi-beacon-pollution> , 01.08.2020
10. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/spatial-stream> , 20.07.2020