



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI



Ivan Šimunić

MODELIRANJE MREŽE IEEE 802.11ac
ZA PROSTORE VISOKE KONCENTRACIJE UREĐAJA
U INSTITUCIJAMA VISOKOG OBRAZOVANJA

Zagreb, 2019.

Ovaj rad je izrađen u Laboratoriju za modeliranje i optimiranje informacijsko-komunikacijskih mreža i usluga pri Zavodu za informacijsko-komunikacijski promet pod vodstvom dr. sc. Ivana Forenbachera i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.

Sadržaj

POPIS SKRAĆENICA.....	iv
POPIS SLIKA	v
POPIS TABLICA.....	vii
POPIS GRAFOVA.....	viii
1. Uvod.....	1
2. Osvrt na dosadašnja istraživanja	3
2.1. Problem povećanja koncentracije uređaja i kapaciteta IEE 802.11 mreže u visokom obrazovanju	3
2.2. Hrvatski kontekst.....	4
2.3. Paradigme modeliranja IEEE 802.11 mreža.....	4
2.4. Razvoj simulacijskog modela IEEE 802.11ac mreža.....	6
2.5. Opći i specifični cilj, hipoteza i svrha rada	7
3. Plan rada.....	8
3.1. Definiranje pokazatelja za evaluaciju performansi IEEE 802.11 mreže	8
3.1.1. Iskorištenost zračnog sučelja	9
3.1.2. Razina snage signala.....	10
3.1.3. Preklapanje kanala.....	11
3.1.4. Odnos signala i šuma.....	12
3.1.5. Kapacitet prijenosa	13
3.2. Pregled karakteristika prostora i korisnika Fakulteta	15
3.2.1. Opis karakteristika Objekta 71 Fakulteta prometnih znanosti.....	15
3.2.2. Opis karakteristika korisnika	19
3.3. Analiza kvalitete trenutne IEEE 802.11 mreže Fakulteta prometnih znanosti	19
3.4. Validacijsko mjerenje performansi mreže	23
3.4.1. Definiranje zahtjeva mreže.....	25
3.4.2. Definiranje zahtjeva za kapacitetom prijenosa	26
3.5. Razvoj simulacijskog modela IEEE 802.11ac mreže na primjeru Objekta 71 Fakulteta prometnih znanosti	28

3.5.1.	Specifikacija modela	28
3.5.1.1.	Modeliranje objekta.....	29
3.5.1.2.	Definiranje mrežnih zahtjeva.....	31
3.5.1.3.	Definiranje zahtjeva za kapacitetom prijenosa	33
3.5.1.4.	Modeliranje arhitekture mreže.....	36
4.	Rezultati.....	45
4.1.	Usporedba performansi simulacijskog modela IEEE 802.11ac modela i postojeće mreže Objekta 71 Fakulteta prometnih znanosti.....	45
4.1.1.	Prikaz rezultata za podrum	46
4.1.2.	Prikaz rezultata za prizemlje	50
4.1.3.	Prikaz rezultata za kat.....	54
5.	Rasprava	58
5.1.	Evaluacija performansi modela 802.11ac mreže.....	58
5.2.	Razlozi problema u radu postojeće mreže.....	60
5.3.	Smjernice za unaprjeđenje mreže u okruženju visoke koncentracije uređaja	61
6.	Zaključak.....	62
	ZAHVALE	63
	POPIS LITERATURE	64
	SAŽETAK.....	68
	SUMMARY	69

POPIS SKRAĆENICA

B.Y.O.D.	Bring Your Own Device
CS/CCA	Carrier Sense/Clear Channel Assesment
CSMA/CA	Carrier-Sense Multiple Access With Collision Avoidance
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IKT	Informacijsko Komunikacijske Tehnologije
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LAN	Local Area Network
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MU-MIMO	Multi-User Multiple Input Multiple Output
NIC	Network Interface Card
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTS/CTS	Request To Send/Clear To Send
SSID	Service Set Identifier
U – UNII	Unlicensed National Information Infrastructure
VoIP	Voice Over IP
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless LAN

POPIS SLIKA

Slika 1 Prikaz Objekta 71 (označen crveno) u okruženju ostalih objekata Znanstveno-učilišnog kampusa Borongaj.	15
Slika 2 Prikaz vanjštine Objekta 71.....	16
Slika 3 Pristupna točka korištena za postojeću mrežu, Cisco 1130AG. Izvor: [28].....	21
Slika 4 Prikaz položaja pristupnih točaka u podrumu i pripadajućih kanala. Zelenim krugom su prikazane pristupne točke Eduroam mreže.....	21
Slika 5 Prikaz položaja pristupnih točaka na prizemlju i pripadajućih kanala. Zelenim krugom su prikazane pristupne točke Eduroam mreže.....	22
Slika 6 Prikaz položaja pristupnih točaka na katu i pripadajućih kanala. Zelenim krugom su prikazane pristupne točke Eduroam mreže.	23
Slika 7 Prikaz korištene opreme, na lijevoj strani prikazano je korišteno prijenosno računalo sa dodatnom antenom te dodatni monitor, dok su desno prikazani korišteni NIC-ovi.	23
Slika 8 Prikaz točaka u podrumu gdje će se obaviti mjerenja postojeće mreže.	24
Slika 9 Prikaz točaka na prizemlju gdje će se obaviti mjerenja postojeće mreže.....	24
Slika 10 Prikaz točaka na katu gdje će se obaviti mjerenja postojeće mreže.	25
Slika 11 Prikaz više-katnog 3D modela objekta.....	29
Slika 12 Prikaz modeliranih zidova i atenuacijskih područja u podrumu.	30
Slika 13 Prikaz modeliranih zidova i atenuacijskih područja na prizemlju.....	30
Slika 14 Prikaz modeliranih zidova i atenuacijskih područja na katu.	30
Slika 15 Prikaz pristupne točke korištene za prediktivni model mreže - Cisco 3802i. Izvor: [38].	37
Slika 16 Prikaz rasporeda pristupnih točaka i usmjerenja antena u podrumu (crvena strelica).	37
Slika 17 Prikaz rasporeda pristupnih točaka i usmjerenja antena na prizemlju (crvena strelica).....	39
Slika 18 Prikaz rasporeda pristupnih točaka i usmjerenja antena na katu (crvena strelica).	42
Slika 19 Usporedba iskorištenosti zračnog sučelja.....	46
Slika 20 Usporedba razine snage signala.	47
Slika 21 Usporedba preklapanja kanala.	48
Slika 22 Usporedba odnosa signala i šuma.	48
Slika 23 Usporedba realnog kapaciteta prijenosa.....	49
Slika 24 Usporedba iskorištenosti zračnog sučelja.....	50
Slika 25 Usporedba razine snage signala.	51
Slika 26 Usporedba preklapanja kanala.	52
Slika 27 Usporedba odnosa signala i šuma.	52
Slika 28 Usporedba realnog kapaciteta prijenosa.....	53
Slika 29 Usporedba iskorištenosti zračnog sučelja.....	54

Slika 30 Usporedba razine snage signala.	55
Slika 31 Usporedba preklapanja kanala.	56
Slika 32 Usporedba odnosa signala i šuma.	56
Slika 33 Usporedba realnog kapaciteta prijenosa.	57

POPIS TABLICA

Tablica 1 Pokazatelji performansi IEEE 802.11 mreže.....	8
Tablica 2 Prikaz optimalnih vrijednosti iskorištenosti zračnog sučelja za pojedine vrste aplikacija. ...	10
Tablica 3 Prikaz optimalnih razina snage signala za pojedine vrste aplikacija.	11
Tablica 4 Vrijednosti MCS faktora ovisno o korištenoj modulacijskoj shemi i broju redundantnih bitova.	14
Tablica 5 Karakteristike etaže podruma.	17
Tablica 6 Karakteristike etaže prizemlja.	18
Tablica 7 Karakteristike etaže kata.....	18
Tablica 8 Prikaz definiranih radio frekvencijskih zahtjeva.	25
Tablica 9 Zahtjevi za realni kapacitet prijenosa po područjima.	27
Tablica 10 Prikaz korištenih pregrada i atenuacijskih područja sa odgovarajućim razinama prigušenja i bojama korištenim za prikaz na tlocrtu.	31
Tablica 11 Prikaz definiranih radio frekvencijskih zahtjeva.	32
Tablica 12 Prikaz IEEE 802.11 standarda i podržanih brzina prijenosa.	32
Tablica 13 Prikaz zahtjeva za kapacitet prijenosa nekih aplikacija. Izvor: [16],[32]–[35]	34
Tablica 14 Zahtijevani realni kapacitet prijenosa po područjima.....	35
Tablica 15 Konfiguracija radio sučelja u podrumu.	38
Tablica 16 Konfiguracija radio sučelja na prizemlju.....	39
Tablica 17 Konfiguracija radio sučelja na prizemlju.....	40
Tablica 18 Konfiguracija radio sučelja na prizemlju.....	41
Tablica 19 Konfiguracija radio sučelja na katu.	42
Tablica 20 Konfiguracija radio sučelja na katu.	43
Tablica 21 Konfiguracija radio sučelja na katu.	43
Tablica 22 Sumarni prikaz ostvarenih poboljšanja po pokazateljima performansi.	58

POPIS GRAFOVA

Graf 1 Prikaz radio sučelja mreže fakulteta u Objektu 71 u odnosu na ukupan broj radio sučelja u okolini.	20
Graf 2 Prikaz odnosa potencijalnog broja korisnika i pristupnih točaka po katovima.	20
Graf 3 Usporedba zahtjeva za kapacitet prijenosa u trenutnoj mreži i u modelu IEEE 802.11ac.	45

1. Uvod

Suvremeno okruženje informacijsko-komunikacijskih tehnologija (IKT) i sveprisutnih pametnih uređaja i aplikacija za prijenos multimedijalnog sadržaja, društvenih mreža, dostupnosti e-informacija, odnosno kombinacija tehnoloških mogućnosti i novih društveno-medijskih običaja ima vodeću ulogu transformaciji života pojedinca.

Danas mnogi korisnici „preskaču“ mobilne komunikacijske tehnologije¹ za pristup Internetu te usvajaju Wi-Fi tehnologiju, formaliziranu pod IEEE 802.11 a, b, g, n i ac standardom. Posljedično, podaci iz 2019. godine sugeriraju da će u sedmerostrukom povećanju podatkovnog prometa u bežičnim mrežama do 2022. godine udio IEEE 802.11 prometa iznositi 80%, dok će udio prometa iz mobilnih mreža iznositi 20% [1],[2]. Drugim riječima, trend korištenja IEEE 802.11 mreža kao primarne platforme za pristupanje Internetu rezultira povećanjem koncentracije uređaja i kapaciteta prijenosa mreže [3].

Od spomenutih IEEE 802.11 standarda, IEEE 802.11ac je najnoviji koji je razvijen sa ciljem dodatnog povećanja kapaciteta mreže na preko 1 Gbit/s² [4]. Zbog toga koristi isključivo 5GHz pojas zbog veće mogućnosti kanalizacije (spajanja kanala sve do širine od 160 MHz) i manjeg utjecaja interferencije u donosu na 2.4 GHz pojas te MU-MIMO³ tehnologiju. Prema podacima od *ABI Research*, danas IEEE 802.11ac standard zauzima višestruko veći udio na tržištu u odnosu na ostale standarde vrlo vjerojatno zbog proliferacije uređaja i sve većih zahtjeva za kapacitetom prijenosa po aplikaciji.

Dok su donedavno korisnici imali samo jedan IEEE 802.11 uređaj, danas nije neobično da korisnici posjeduju i koriste dodatne uređaje poput pametnog telefona ili tableta. Dodatna istraživanja poput onog od *Cisco*-a sugeriraju da će prosječan broj uređaja po korisniku dodatno narasti na 3.9 do 2022. godine, što je posljedica i Interneta stvari (engl. *Internet of Things*) kao i nosivih elektroničkih uređaja sa mogućnošću umrežavanja (engl. *Wearable Computing*) čija se međusobna komunikacija temelji na 802.11 standardu [1], [5], [6]. Sve to će stvoriti dodatne izazove za IEEE 802.11 mreže u različitim sektorima.

Specifičan primjer je visoko obrazovanje koje se neprekidno susreće sa povećanjem koncentracije broja uređaja i kapaciteta IEEE 802.11 mreža zbog heterogene okoline poput višenamjenskih auditorija i nastavnih predavaona sa velikim kapacitetom sjedenja gdje je nerijetko koncentracija do četiri uređaja na manje od 1 m². Međutim, takvim institucijama postaje izazov odgovoriti na novonastale okolnosti,

¹ 2G/3G/4G

² Druga generacija IEEE 802.11ac standarda, odnosno *wave 2*, omogućava teoretske brzine do 6.93 Gbit/s primjenom 8x8 MIMO tehnologije i zaštitnog intervala od 400ms.

³ *Multi-user – Multiple Input Multiple Output* omogućava pristupnoj točki istovremenu komunikaciju prema većem broju uređaja.

primarno zbog pristupa modeliranju mreže temeljenog isključivo na pokrivenosti signalom, a ne na kapacitetu prijenosa. Nadalje, često se zanemaruje IEEE 802.11ac standard, za kojeg ne postoji dovoljan broj istraživanja koja bi pobudila razumijevanje o specifičnostima njegove primjene u visokom obrazovanju te se koriste a/b/g/n standardi sa nešto slabijim performansama.

Zbog toga je važno pobuditi saznanja o mogućnostima IEEE 802.11ac mreže za svaku specifičnu primjenu kao što je okruženje visoke koncentracije uređaja u institucijama visokog obrazovanja. Jedan od načina je simulacijsko modeliranje. Simulacijski model omogućava reproduciranje i proučavanje učinaka složenih uzročno-posljedičnih veza između raznih parametara mreže te optimalno dizajniranje mreže koja će zadovoljiti sve zahtjeve za funkcionalnošću i skalabilnošću.

Stoga, cilj ovog rada je izradom simulacijskog modela IEEE 802.11ac mreže korištenjem pristupa temeljenog na kapacitetu prijenosa, evaluirati njezine performanse u odnosu na često korištene a/b/g/n standarde za područja visoke koncentracije uređaja kod visoko obrazovnih ustanova. Kao eksperimentalno okruženje poslužio je Objekt 71 Fakulteta prometnih znanosti, bivši vojni objekt koji je prenamijenjen za obrazovne potrebe, koji sadrži 649 sjedećih mjesta gusto raspoređenih na ukupno 13 auditorija, znanstveno-istraživačkih laboratorija, ostalih učionica ili knjižnica. Autor je napravio validacijsko mjerenje postojeće mreže te na temelju uočenih nedostataka izradio simulacijski model IEEE 802.11ac mreže i međusobno usporedio performanse. Naposljetku, rezultati ovog istraživanja mogu poslužiti ostalim obrazovnim institucijama na svim razinama za poboljšanje mreže.

Struktura rada je podijeljena u 6 poglavlja, uključujući uvod i zaključak. U drugom poglavlju će se predstaviti saznanja iz dosadašnjih istraživanja koja su vezana za problematiku povećanja koncentracije IEEE 802.11 uređaja u obrazovanju, između ostaloga i u kontekstu Republike Hrvatske. Zatim će se objasniti pojava promjene paradigme modeliranja IEEE 802.11 mreže kao posljedica povećanja koncentracije uređaja na mreži te problem razvoja simulacijskog modela za mrežu sa naglaskom na zadovoljenje potrebnog kapaciteta prijenosa. Na kraju poglavlja, nakon utvrđene problematike i određenih saznanja, definirati će se hipoteza i opći cilj ovog rada.

U trećem poglavlju definirati će se plan rada. Prije svega, odrediti će se pokazatelji performansi mreže. Nakon toga slijedi određivanje karakteristika Objekta 71, za koji se radi simulacijski model te karakteristika korisnika mreže. Analizirati će se postojeća mreža i obaviti validacijsko mjerenje na osnovu čega će se vršiti razvoj simulacijskog modela IEEE 802.11ac mreže.

Četvrto poglavlje baviti će se usporedbom performansi simulacijskog modela IEEE 802.11ac mreže sa performansama postojeće mreže prema pokazateljima definiranim u trećem poglavlju.

U petom poglavlju slijedi interpretacija rezultata dobivenih simulacijskim modelom IEEE 802.11ac mreže te diskusija o rezultatima dobivenim validacijskom analizom postojeće mreže.

2. Osvrt na dosadašnja istraživanja

2.1. Problem povećanja koncentracije uređaja i kapaciteta IEEE 802.11 mreže u visokom obrazovanju.

Visoko obrazovanje nije imuno na učinke informacijsko-komunikacijskih tehnologija (IKT) koje rezultiraju proliferacijom uređaja u na relativno malom prostoru, poput višenamjenskih dvorana koje se koriste za nastavu, ali i održavanja događaja poput konferencija [7]. Razloga za to je nekoliko.

Prvi je fenomen koji se naziva *Bring Your Own Device* (B.Y.O.D.) koji omogućuje studentima, nastavnicima, ali i ostalim korisnicima, korištenje različitih uređaja poput pametnih telefona, tableta ili računala, koji uglavnom koriste IEEE 802.11 mrežu za pristup Internetu [8].

Prema istom autoru, obrazovne institucije su prepoznale prednosti u prenošenju i stjecanja znanja. Primjerice, u Europi se već duže vrijeme radi na tome da se koncept B.Y.O.D. uvede u obrazovne ustanove. Belgija je još 2013. započela pilot projekt uvođenja B.Y.O.D.-a u 30 škola, dok je vlada u Finskoj i Italiji odlučila da sve knjige budu dostupne u digitalnom obliku. Zemlje poput UK, Estonije i Portugala također promoviraju i osiguravaju sredstva za povećanje uporabe prijenosnih računala, pametnih telefona i tableta u srednjem i visokom obrazovanju [9].

Međutim, negativna posljedica je stvaranje okruženja visoke koncentracije heterogenih uređaja na relativno malom prostoru koji svojim različitim tehničkim karakteristikama uređaja različito utječu na performanse IEEE 802.11 mreže. IEEE 802.11 uređaji međusobno interferiraju na način da se natječu za zračno sučelje, prilikom čega će veća koncentracija uređaja utjecati i na veću interferenciju te posljedično tomu i na degradaciju performansi [3].

Drugi fenomen s kojim se visoko obrazovne institucije susreću je Wi-Fi *offloading*. Usred povećane uporabe pametnih telefona te potrebe korisnika za čestom uporabom aplikacija sa zahtjevima za kapacitetom većim od 1 Mbit/s, kao što su *cloud*, *streaming* videa i slično, dolazi do pojave migracije dijela podatkovnog prometa sa mobilnih komunikacijskih mreža na IEEE 802.11 mreže [2].

Zbog toga, potrebno je proaktivno osigurati optimalnu IEEE 802.11 komunikacijsku infrastrukturu kako bi se pravovremeno anticipirali izazovi u modeliranju mreža obrazovnih institucija koje, prvenstveno u hrvatskom slučaju, trebaju spremno dočekati novonastale okolnosti.

2.2. Hrvatski kontekst

Hrvatska se još uvijek suočava sa potrebnim značajnim promjenama koje će stvoriti temelj za uvođenje i primjenu IKT-a. Prema istraživanjima iz 2018. godine, koje je inicirala Europska komisija, Hrvatska je ispod Europskog prosjeka prema digitalnoj opremljenosti obrazovnih ustanova [10]. Također, prijenosne brzine su ispod europskog prosjeka, pri čemu je samo 18% obrazovnih ustanova opremljeno bežičnim mrežama koje nude brzine prijenosa veće od 100 Mbit/s, dok je u Norveškoj 86% takvih obrazovnih ustanova [10], [11]. Jedan od hrvatskih pokušaja napretka u ovom sektoru je kroz strateški dokument e-Hrvatska 2020.

Strategija e-Hrvatska navodi nekoliko ključnih aspekata u domeni obrazovanja. Prvi, e-obrazovanje treba biti prostor inovativnog industrijskog razvitka u Republici Hrvatskoj [12]. Drugi, hrvatsko društvo prolazi kroz duboke promjene, potaknuto civilizacijskim razvojem i rastućom važnosti Interneta i digitalnih tehnologija u društvenim interakcijama [12]. Treći, sve to stvara situaciju u kojoj država i njezina uprava mora držati korak s građanima i iskoristiti prilike koje pruža digitalizacija, kako bi mogla što učinkovitije ispunjavati svoju svrhu [12].

Zbog toga se u Strategiji identificirala potreba uvođenju IKT sustava u obrazovni sustav sa ciljem razvoja digitalno zrelih obrazovnih institucija, digitalnih kompetencija nastavnog i nenastavnog osoblja, digitalnih obrazovnih sadržaja i niza drugih usluga za kvalitetno upravljanje nastavnim i poslovnim procesima obrazovnih institucija [12]. U kontekstu visokog obrazovanja, cilj projekta je potaknut nastavnike da uvođenjem IKT-a promijene i prilagode nastavne metode u obrazovanju [12].

Međutim, implementacija pouzdane IEEE 802.11 mreže je osnovni preduvjet koji treba ispuniti prilikom projekta uvođenja IKT-a u obrazovne institucije, uključujući i one visoko obrazovne. Potrebno je modelirati mrežu koja zadovoljava stalno rastuće zahtjeve za kapacitetom mreže, različite vrste uređaja, nove usluge i ono najbitnije – svakom omogućiti pristup Internetu u svakom trenutku.

2.3. Paradigme modeliranja IEEE 802.11 mreža

Tradicionalno, modeliranje IEEE 802.11 mreža uključivalo je približno pozicioniranje pristupnih točaka ovisno o jačini emitiranog signala. Temeljem toga, postizala je se optimalna pokrivenost signalom na način da su se pristupne točke smještale u prostoru sa prethodno definiranim razmakom između njih. Međutim, takav pristup idealizira propagaciju signala te će nerijetko rezultirati neoptimalnim modeliranjem mreže koja će biti previše ili premalo pokrivena signalom i troškovno neisplativa, pogotovo ako se radi o složenom zatvorenom prostoru sa velikom koncentracijom uređaja [13], [14], [15].

Dobar primjer takvog prostora je visoko obrazovna institucija koja je heterogeno okruženje sa velikim brojem višenamjenskih auditorija i dvorana u kojima je prisutan rast koncentracije velikog broja uređaja sa različitim zahtjevima za prijenosnim brzinama [8]. Korisnička mjesta su vrlo često gusto raspoređena kako bi se postigao što veći kapacitet predavaonica. Osim toga, korisnici, koji su opremljeni sa više različitih uređaja, neravnomjerno su raspoređeni u cijelom prostoru predavaonice. Prolazi ili katedre predstavljaju određeni postotak nezauzetog prostora. Korišteni materijali poput zidova ili namještaja, ali i ljudska tijela zbog gustog rasporeda uzrok su prigušenja signala.

Zbog toga, visoko obrazovne institucije predstavljaju vrlo dobar primjer za osvjetljavanje problematike modeliranja IEEE 802.11 mreže i davanje novih spoznaja u njezinom uvođenju na takva heterogena područja velike koncentracije uređaja.

Modeliranje IEEE 802.11 mreža potrebno je temeljiti primarno na kriterijima koji su tradicionalno često zanemarivani poput zadovoljenja prijenosnih kapaciteta, a ne nužno isključivo pokrivenošću signalnom [14]. Pritom se fokus stavlja na povećanje kvalitete iskustva (engl. *Quality of Experience*) [5].

Kod takvog pristupa, pažnja se usmjerava na optimalnu iskorištenost zračnog sučelja. Ono predstavlja vrijeme potrebno uređaju za slanje/primanje podataka. Što je ono manje, kapacitet mreže će biti veći i obrnuto. Osiguravanje optimalne iskorištenosti zračnog sučelja ovisi o mnoštvu parametara koji su međusobno u uzročno-posljedičnom odnosu, kao što su morfologija područja, broj klijenata, vrsta IEEE 802.11 standarda (korištene modulacijske tehnike i upravljanje okvira), efektivna izotropna snaga zračenja i šum/interferencija [13].

Primjerice, kako bi se povećao kapacitet mreže, osim samog dodavanja pristupnih točaka, potrebno je dodijeliti odgovarajuće kanale i uređaji trebaju donositi inteligentne odluke o tome sa kojom će se pristupnom točkom povezati [15]. Štoviše, samo dodavanje pristupnih točaka može i degradirati performanse jer će rezultirati većom interferencijom [16].

Kako bi se pravovremeno anticipirali svi izazovi u modeliranju IEEE 802.11 mreže, neophodno je pribjeći izradi simulacijskog modela sa visokim stupnjem realnosti na nekoliko razina od fizičkog prostora do ponašanja mreža na fizičkom i podatkovnom sloju OSI⁴ modela. To je iznimno bitno kod evaluacije novih komunikacijskih standarda, poput IEEE 802.11ac [13].

Za izradu uvjerljivog simulacijskog modela neophodna je uporaba određenih softverskih alata koji će pojednostaviti i unaprijediti ljudski proces modeliranja. Danas postoji više alata koji se koriste pri implementaciji i optimizaciji IEEE 802.11 mreže. Neki poznatiji su svakako *AirMagnet Survey*, *iBwave Wi-Fi*, *TamoGraph Site Survey* i *Ekahau Site Survey*. U ovom radu koristiti će se *Ekahau Site Survey*,

⁴ OSI (engl. *Open Systems Interconnection*) referentni model je apstraktni, slojeviti model koji služi kao preporuka stručnjacima za razvoj računalnih mreža i protokola.

jedan od najčešće korištenih alata od strane znanstvene, ali i profesionalne zajednice. *EkaHau Site Survey* (ESS) je softverski alat za dizajniranje, verifikaciju, analizu, optimizaciju i otkrivanje problema na IEEE 802.11 mreži. Ovaj alat podržava IEEE 802.11a/b/g/n/ac standarde i omogućava 3D modeliranje okruženja, planiranje i analizu kapaciteta, pasivna i aktivna mjerenja, omogućuje simulaciju rada pristupnih točaka i antena raznih proizvođača, unos CAD datoteka te GPS podršku.

2.4. Razvoj simulacijskog modela IEEE 802.11ac mreža

Nekoliko istraživanja je evaluiralo performanse IEEE 802.11ac mreža u različitim okruženjima. Primjerice, istraživanje jednog autora se bavilo implementacijom IEEE 802.11ac mreže u stambenom okruženju navodeći njegove mogućnosti u područjima velike koncentracije uređaja [17]. Autor navodi kako je uporaba standarda IEEE 802.11ac pravi odgovor na povećanje koncentracije IEEE 802.11 uređaja i pojave sve zahtjevnijih aplikacija glede kapaciteta prijenosa, naglašavajući njegove prednosti pri video *streamingu* i sigurnosnoj pohrani podataka u odnosu na prethodne standarde, pri čemu je spomenuto potkrijepio mrežnom simulacijom u NS-3 simulatoru [17].

Drugo istraživanje bavilo je se pak modeliranjem IEEE 802.11ac mreže za velike događaje poput onih festivalskih sa posjećenošću od preko 80 000 ljudi na površini od 300 m² [3]. Autor posebno naglašava problematiku modeliranja mreže tih razmjera, gdje kao najznačajnije izazove navodi zahtijevani kapacitet prijenosa, veliku koncentraciju IEEE 802.11 te pojavu interferencije što od IEEE 802.11 uređaja, ali od drugih uređaja koji koriste taj frekvencijski pojas [3]. Autor navodi kako je pažljivo planiranje ključno za uspjeh te u nastavku još dodaje kako postavljanje opreme na odgovarajuća mjesta, upotreba odgovarajućih antena, korištenje 5 GHz frekvencijskog pojasa, onemogućavanje pristupa uređajima koji koriste starije standarde predstavljaju neke od bitnijih koraka za osiguravanje odgovarajućih performansi [3].

Nadalje, jedno je se istraživanje bavilo modeliranjem IEEE 802.11ac mreže u poslovnom okruženju uporabom NS-3 mrežnog simulatora [18]. Autor je se između ostaloga bavio pregledom utjecaja položaja pristupnih točaka i korisničkih uređaja na kapacitet prijenosa, što je osobito bitno ako se želi iskoristiti mogućnost korištenja viših modulacijskih tehnika kodiranja i kanala širine 80 MHz ili više, dalje je još ispitivao utjecaj razmještaja kanala te aktivnih uređaja na kapacitet prijenosa [18].

Iako je evidentno da postoji simulacijski modeli koji su evaluirali primjenu IEEE 802.11ac standarda u različitim okruženjima, postoji nedostatak takvih istraživanja za potrebe visokog obrazovanja.

2.5. Opći i specifični cilj, hipoteza i svrha rada

Pregledom literature i utvrđenih nedostataka, specifičan cilj ovog rada je, izradom simulacijskom modela 802.11ac mreže korištenjem pristupa temeljenog na kapacitetu prijenosa, evaluirati njezine performanse kao optimalno rješenje u odnosu na češće korištene 802.11a/b/g/n standarde na primjeru Objekta 71 Fakulteta prometnih znanosti, a u kontekstu velike koncentracije uređaja i povećanja zahtjeva za kapacitetom u visokom obrazovanju. Stoga, hipoteza rada je:

H: Primjenom IEEE 802.11ac standarda moguće je značajno povećati performanse trenutne mreže Fakulteta u okolnostima višestrukog povećanja informacijsko-komunikacijskog prometa.

Kako bi se testirala postavljena hipoteza, kao studija slučaja odabrana je zgrada Fakulteta prometnih znanosti naziva Objekt 71 koja se nalazi na Znanstveno-učilišnom kampusu (ZUK) Borongaj. Primarni razlog odabira leži u činjenici da se radi o adaptiranom vojnom objektu koji svojim karakteristikama, poput materijala i debljine zidova, predstavlja izazov u modeliranju IEEE 802.11 mreža.

U kontrastu sa dosadašnjim istraživanjima koja su koristila druge alate, autor je upotrijebio alat *Ekahau Site Survey*. Pomoću njega, autor je proveo validacijsko mjerenje postojeće mreže. Zatim, rezultati tog mjerenja poslužili su mu kao referentna točka u evaluaciji performansi IEEE 802.11ac mreže izrađenim simulacijskim modelom. Završno, temeljem rezultata simulacije, autor je predložio novu arhitekturu mreže koja može odgovoriti zahtjevima povećanja koncentracije uređaja na malom prostoru i kapaciteta.

Rezultati proizašli iz ovog istraživanja mogu pomoći općem cilju, a to je povećati kvalitetu iskustva u korištenju IEEE 802.11 mreže visoko obrazovnih institucija. Osim toga, ovo istraživanje predstavlja i komplement strateškim dokumentima Republike Hrvatske, poput Strategija e-Hrvatska 2020 te može poslužiti u provedbi njezinih ciljeva, ali i anticipaciji izazova prilikom njihove provedbe za područje znanosti i obrazovanja na svim razinama.

3. Plan rada

Izrada optimalnog plana mreže zahtjeva pristup po koracima. Prvo, potrebno je definirati pokazatelje prema kojima će se evaluirati performanse IEEE 802.11 mreže. Drugo, slijedi izlazak na teren te analiza karakteristika prostora, zahtjeva mreže i procjena zahtjeva za kapacitetom prijenosa. Treće, slijedi provođenje validacijskog mjerenja kvalitete postojeće mreže zbog evaluacije performansi i dijagnosticiranja potencijalnih problema. Završno, slijedi razvoj simulacijskog modela IEEE 802.11ac mreže i provođenje simulacije kako bi se dobiveni rezultati o performansama usporedili sa onima postojeće mreže.

3.1. Definiranje pokazatelja za evaluaciju performansi IEEE 802.11 mreže

Na samom početku potrebno je definirati pokazatelje za evaluaciju performansi IEEE 802.11 mreže. Alat *EkaHau Site Survey* posjeduje veliki broj pokazatelja kvalitete mreže koji prikazuju kvalitetu mreže u ovisnosti o više parametara, ali i one koji prikazuju kvalitetu mreže u određenom kontekstu. Za evaluaciju postojeće mreže upotrijebljeno je pet pokazatelja kvalitete mreže za koje se smatra da mogu opisati kvalitetu mreže dovoljno dobro.

Tablica 1 Pokazatelji performansi IEEE 802.11 mreže

	Pokazatelj	Kratki opis
1.	Iskorištenost zračnog sučelja	Udio promatranog vremena potrebnog uređajima za prijenos. Izražen u postotku [%].
2.	Razina snage signala	Prikaz zaprimljene razine snage signala na korisničkom uređaju. Izražen u decibelima relativnim miliwatima [dBm].
3.	Preklapanje kanala	Prikaz broja preklapajućih kanala na istim ili susjednim frekvencijama.
4.	Odnos signala i šuma	Prikaz odnosa zaprimljene razine snage signala i snage šuma.
5.	Kapacitet prijenosa	Prikaz ostvarive količine prenesenih podataka u jedinici vremena. Izražena u megabitima po sekundi (Mbit/s).

3.1.1. Iskorištenost zračnog sučelja

IEEE 802.11 mreže koriste *half-duplex* način prijenosa podataka, dakle samo jedan korisnik može koristiti određeni kanal u danom trenutku, što znači da je zračni medij ograničeni resurs za koji se korisnici natječu. U tu svrhu se koristi CSMA/CA (engl. *Carrier-sense multiple access with collision avoidance*) mehanizam sa slučajnim *backoff* mjeračem za pristup mediju, a koji se temelji na „slušaj prije govora“ načinu pristupa. Stanica koja inicira transmisiju okvira osluškuje kanal i određuje da li je kanal zauzet ili slobodan.

Što je više vremena potrebno za transmisiju, jedan korisnik će duže ostati na tom kanalu, a čekanje ostalih klijenata će se povećati. S tim, ako su čekanja velika, a više klijenata konkurira za jedan kanal, pojavit će se zagušenje koje može rezultirati odbacivanjem paketa.

Iskorištenost zračnog sučelja predstavlja jedan od najvažnijih pokazatelja kvalitete bežične LAN mreže, budući da je u izravnom uzročno-posljedičnom odnosu sa drugim pokazateljima performansi. Iskorištenost zračnog sučelja (engl. *Airtime Utilization*) predstavlja vrijeme koje je potrebno korisniku za prijenos zračnim sučeljem. Ona se može izmjeriti na podatkovnom sloju sa analizatorom paketa i prikazuje se postotkom.

Iskorištenost zračnog sučelja ovisi o više faktora:

- Broj korisničkih uređaja u ćeliji
- Karakteristikama korisničkog i poslužiteljskog uređaja, kao što su korišteni 802.11 standard, MIMO tehnologija, podržani frekvencijski pojas, podržana širina kanala i ostalo.
- Zahtjevima za kapacitet prijenosa aplikacije
- Radio frekvencijskim karakteristikama

Osim IEEE 802.11 uređaja, na iskorištenost zračnog sučelja mogu djelovati i neki drugi uređaji koji koriste isti taj nelicencirani frekvencijski pojas. Tada se početna definicija može preformulirati kao vrijeme za koje je energija detektirana u zraku i može se izmjeriti na fizičko sloju analizatorom spektra.

Optimalne iskorištenosti zračnog sučelja za pojedine vrste aplikacije, koje su preporučene od pojedinih autora, prikazane su u tablici 2 [19].

Tablica 2 Prikaz optimalnih vrijednosti iskorištenosti zračnog sučelja za pojedine vrste aplikacija.

Iskorištenost zračnog sučelja		Opis	Upotrebljivost
40%	Odlično	Mreža osigurava potrebni kapacitet.	Nije zahtijevana
50%	Vrlo dobro	Potrebna za stvarno-vremenske aplikacije koje se oslanjaju na dostavu paketa unutar zadanog vremena.	VoIP
60%	Dobro	Uzrokovana kašnjenja utjecat će samo na stvarno-vremenske aplikacije.	Video
70%	Loše	Većina podatkovnih aplikacija će sasvim normalno raditi, dodatna kašnjenja ne utječu pretjerano na korisničko iskustvo.	E-pošta, web
80%	Neupotrebljivo	Podkapacitiranost mreže.	Nije primjenjivo

Iskorištenost zračnog sučelja se može dobiti i kao omjer zahtijevanog *bandwidtha* mreže koji se dobije zbrojem pojedinačnih zahtjeva korisničkih uređaja/aplikacija za prijenosnim kapacitetom i brzine linka bežičnog sučelja (formula 1).

$$AU [\%] = \frac{\text{zahtjevani bandwidth}}{\text{brzina linka}} \times 100 \quad (1)$$

3.1.2. Razina snage signala

Potrebna je određena razina snage signala kako bi uređaj pouzdano zaprimio dolazeću transmisiju. Razina snage signala izravno utječe na brzinu prijenosa podataka, naposljetku i na iskorištenost zračnog sučelja. Aplikacije koje zahtijevaju bolji QoS imaju nešto strože zahtjeve u pogledu razine snage signala. Zahtijevane razine snage signala preporučene od stručnjaka za pojedine aplikacije prikazane su tablicom 3 [20].

Razina snage signala najpreciznije se prikazuje u miliwatima [mW], no zbog praktičnosti se koriste decibeli relativni miliwatima [dBm]. Odnos je prikazan formulom 2.

$$P [\text{dBm}] = 10 \log_{10} \frac{P [\text{mW}]}{1 \text{ mW}} \quad (2)$$

Indikator zaprimljene razine snage signala na nekom uređaju je RSSI (engl. *Received Signal Strength Indicator*). RSSI se koristi za mjerenje relativne kvalitete zaprimljenog signala i posjeduje apsolutne vrijednosti. Obično se ravna prema određenoj ljestvici. Ne postoji jedna standardizirana ljestvica, obično ona varira ovisno od proizvođača [20].

Tablica 3 Prikaz optimalnih razina snage signala za pojedine vrste aplikacija.

Razina snage signala		Opis	Upotrebljivost
-30 dBm	Odlično	Najveća ostvariva razina snage signala. Korisnik mora biti jako blizu pristupne točke.	Nije zahtijevana
-67 dBm	Vrlo dobro	Minimalna razina snage signala za aplikacije koje zahtijevaju pouzdan i pravovremen prijenos.	VoIP, Live stream
-70 dBm	Dobro	Minimalna razina snage signala potrebna za pouzdan prijenos paketa.	E-pošta, web
-80 dBm	Loše	Minimalna razina snage signala za omogućavanje povezivanja na mrežu. Prijenos paketa je nepouzdan.	Povezivanje na mrežu
-90 dBm	Neupotrebljivo	Svaka funkcionalnost upitna.	Nije primjenjivo

3.1.3. Preklapanje kanala

Preklapanje kanala je fenomen kada dvije ili više pristupnih točaka koriste komunikacijske kanale koji se mogu preklapati u određenom omjeru što utječe na iskorištenost zračnog sučelja i brzinu prijenosa.

O preklapanju kanala ovisi broj i gustoća razmještaja pristupnih točaka kao i korišteni frekvencijski spektar. Primjerice, u 2.4 GHz spektru od ukupno 13 raspoloživih kanala, samo se tri ne preklapaju uopće (1, 6 i 11) dok je najveće preklapanje od 75% prisutno kod susjednih kanala (npr. 1 i 2, 2 i 3, itd.). To znači da pristupne točke koje koriste preklapajuće kanale trebaju biti dovoljno odmaknute ili trebaju biti smanjene razine snage signala. S druge strane, u 5 GHz spektru je raspoloživo ukupno 24 kanal od kojih su svi nepreklapajući.

Zbog toga postoji:

- Preklapanje kanala na istom kanalu (istokanalna interferencija, preklapanje 100%)

- Preklapanje kanala po susjednim kanalima u određenom omjeru (susjedno-kanalna interferencija, parcijalno preklapanje, < 100%).

Prvi oblik preklapanja kanala nastaje u slučaju da dvije ili više pristupnih točaka koriste isti kanal (npr. 1 kanal kod 2.4 GHz ili 36 kod 5GHz). IEEE 802.11 standard koristi fizičku provjeru nositelja, poznatu i kao CCA (engl. *Clear Channel Assessment*) mehanizam, koji osigurava da samo jedna stanica koristi kanala u bilo kojem trenutku. CCA mehanizam osluškuje medij i određuje da li je količina radio frekvencijske energije na mediju veća od neke unaprijed određene vrijednosti [21]. Kao donja granica obično se koristi razina snage signala od -85 dBm [22]. Ako neki uređaj odašilje na određenom kanalu, svi poslužiteljski i korisnički uređaji koje koriste isti taj kanal će odbaciti planiranu transmisiju. Ovo nepotrebno natjecanje za pristup mediju naziva se istokanalna interferencija, dok je u teoriji to više kooperacijski mehanizam. Obično istokanalna interferencija nije problem dok se ne pojavi velik broj stanica koji koriste isti kanal. Prema nekim istraživanjima, optimalna je granica do najviše tri preklapajuća kanala [23].

Postoji još jedna podvrsta istokanalne interferencije, a to je interferencija kao posljedica bežičnih uređaja koji se ne temelje na IEEE 802.11 standardu. U te uređaju spadaju bežične kamere, mikrofoni, *Bluetooth* uređaji, mikrovalne pećnice i ostalo. Ovakvi uređaji ne surađuju sa IEEE 802.11 uređajima, zbog čega je moguće znatno smanjenje kapaciteta prijenosa. Signali ovih uređaja mogu zauzimati jedan ili pak više kanala što može uzrokovati odstupanje IEEE 802.11 uređaja od transmisije u najgorem slučaju [24].

Drugi oblik preklapanja kanala se pojavljuje usred uporabe susjednih kanala koji se jednim dijelom preklapaju. Umjesto da stanice međusobno surađuju kao što je slučaj pri istokanalnoj interferenciji, pri susjedno-kanalnoj interferenciji nastaje šum uzrokujući pojavu retransmisija, povećan broj CRC (engl. *Cyclic Redundancy Check*⁵) grešaka te smanjenu brzinu prijenosa [23]. Istraživanja su pokazala da se ovaj oblik interferencije treba u cijelosti izbjevati [23], [16].

3.1.4. Odnos signala i šuma

Šum je spontana anomalija u radiokomunikacijskom sustavu, odnosno u kontekstu WLAN-a, šum je bilo koji signal koji WLAN uređaji ne mogu demodulirati te on kao takav otežava WLAN uređajima da se međusobno čuju. Izvori šuma mogu biti bežične kamere, mikrovalne pećnice, *Bluetooth* uređaji i ostalo.

⁵ Najčešća korištena metoda za detekciju grešaka u modernim računalnim mrežama

Odnos signala i šuma uspoređuje snagu signala i srednju snagu šuma u nekom dijelu radiokomunikacijskog sustava. Signal treba biti jači od šuma kako bi prijenos podataka bio moguć. Obično se kao donja granica prihvaća omjer od oko 20 dB [25]. Odnos signala i šuma je bezdimenzijska veličina te se obično izražava u logaritamskoj ljestvici u decibelima [dB]. Također, lošiji odnos signala i šuma izravno utječe i na povećanje iskorištenost zračnog sučelja.

3.1.5. Kapacitet prijenosa

Kapacitet prijenosa predstavlja brzinu kojom komuniciraju dva uređaja. Izražava se u bitima po sekundi [bit/s], no zbog praktičnosti se upotrebljavaju megabiti po sekundi [Mbit/s]. Kapacitet prijenosa vezan je za konjecijske mogućnosti fizičkog sloja, odnosno za modulacijske tehnike, prijenosni opseg kanala, kodnu brzinu, broj prostornih tokova, zaštitni interval i ostalo. Različiti standardi imaju različite kapacitete prijenosa, ovisno o dostupnim tehnologijama.

Na primjer, 802.11ac standard ima teoretski kapacitet prijenosa od 6993 Mbit/s sa 8 dostupnih prostornih tokova, 256-QAM modulacijom, kodnom brzinom od 5/6, širinom kanala od 160 MHz i 400 ns dugim zaštitnim intervalom. No, taj kapacitet nije ostvariv u stvarnosti zbog raznih utjecaja iz okoline.

Formulom 3 je prikazan postupak izračuna nominalnog kapaciteta prijenosa s obzirom na definirane parametre. Bitno je istaknuti da kapacitet izračunat formulom 3 označava nominalni maksimalni kapacitet, a da je onaj realni obično oko 50% manji, od čega otprilike 30% otpada na mrežni *overhead*, ovisno da li se koristi VoIP, pristup Internetu i slično. [26].

$$\text{Nominalni kapacitet prijenosa} = \frac{\text{Broj prostornih tokova} \times \text{Faktor širine kanala} \times \text{MSC faktor}}{\text{Trajanje simbola [s]}} \quad (3)$$

Broj prostornih tokova oslanja se na MIMO tehnologiji, odnosno na upotrebi više antena za odašiljanje i primanje jednog toka podataka. Drugim riječima, to omogućava podjelu prijenosa na više signalnih tokova, od kojih se svaki odašilje na posebnom prostornom toku. IEEE 802.11ac podržava do 8 prostornih tokova [27].

Širina kanala može utjecati na kapacitet prijenosa spajanjem kanala i povećanjem prijenosnog opsega. 802.11ac može raditi sa širinama kanala od 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 160 MHz. Faktori širine kanala su: 52 (za kanal širine 20 MHz), 108 (za kanal širine 40 MHz), 234 (za kanal širine 80 MHz), 468 (za kanal širine 160 MHz) [27].

MCS faktor određuje koliko se podatkovnih bitova može prenijeti po signalu nosiocu. Uzima u obzir dvije stvari. Prva je modulacijska shema kodiranja određuje koliko se bitova može prenijeti po simbolu upotrebom M -arnih fazno amplitudnih modulacijskih tehnika. Što je veći M , veća je spektralna učinkovitost, povećava se kapacitet prijenosa, ali i vjerojatnost pogreške uzrokovanu šumom. Druga je broj redundantnih bitova u ukupnom broju bitova po simbolu koji služe u svrhu detekcije grešaka. Označava se k/n gdje je k broj korisnih (podatkovnih) bitova, n ukupna duljina simbola u bitovima, a $n-k$ broj redundantnih bitova.

Tablicom 4 su prikazane vrijednosti MCS faktora za IEEE 802.11ac [27].

Tablica 4 Vrijednosti MCS faktora ovisno o korištenoj modulacijskoj shemi i broju redundantnih bitova.

Indeks modulacijske sheme kodiranja (MCS)	Modulacijska shema (k/n)	Ukupan broj bita po simbolu (r)	Faktor indeksa modulacijske sheme kodiranja (MCS faktor)
			$\frac{k}{n} \cdot r$
0	BPSK ($1/2$)	1	0.5
1	QPSK ($1/2$)	2	1
2	QPSK ($3/4$)	2	1.5
3	16-QAM ($1/2$)	4	2
4	16-QAM ($3/4$)	4	3
5	64-QAM ($2/3$)	6	4
6	64-QAM ($3/4$)	6	4.5
7	64-QAM ($5/6$)	6	5
8	256-QAM ($3/4$)	8	6
9	256-QAM ($5/6$)	8	6.67

Trajanje simbola je izraženo u sekundama i ovisi o trajanju zaštitnog intervalu koji djeluje na kapacitet prijenosa tako da se sa smanjenjem vremena čekanja između simbola povećava kapacitet prijenosa, ali i mogućnost pogreške zbog manje zaštite od posljedica višestazne propagacije. U 802.11ac standardu postoje dva zaštitna intervala: dugi (engl. *Long Guard Interval*) u trajanju od 0.8 μ s te kratki (engl. *Short Guard Interval*) u trajanju od 0.4 μ s što rezultira sa ukupnim trajanjem simbola od 4 μ s, odnosno 3.6 μ s [27].

Na kraju, značajan faktor ima interferencija, odnosno odnos signala i šuma. Šum može štetno utjecati posebno na modulacijske sheme višeg reda zbog čega je potrebno osigurati odgovarajuću razinu snage signala, a pri tome paziti na pojavu interferencije.

3.2. Pregled karakteristika prostora i korisnika Fakulteta

Prvi korak modeliranja mreže predstavlja izlazak na teren i sakupljanje informacija koje opisuju problematičnu situaciju. Općenito to podrazumijeva proučavanje morfologije područja za koje se izrađuje simulacijski model. Prije svega, sagledati će se položaj objekta Fakulteta u prostoru te njegova okolica. Nakon toga će se odrediti tehničke karakteristike objekta, odnosno konstrukcijska struktura i upotrijebljeni građevinski materijali. Zatim slijedi proučavanje plana objekta, lokalizacija prostora velike koncentracije studenata te potom i određivanje kapaciteta takvih područja. Važan korak predstavlja identifikacija i karakterizacija dionika, određivanje njihovih navika, potreba i želja. Naposljetku će slijediti opis zatečenog stanja bežične IEEE 802.11 mreže, a to podrazumijeva identifikaciju korištene opreme, određivanje broja pristupnih točaka i njihove lokacije te korišteni frekvencijski plan.

3.2.1. Opis karakteristika Objekta 71 Fakulteta prometnih znanosti

Objekt 71 jedan je od objekata Fakulteta prometnih znanosti, a nalazi se na Znanstveno-učilišnom kampusu (ZUK) Borongaj (slika 1). ZUK Borongaj predstavlja prenamijenjeni kompleks. Objekti koji su danas sastavni dio znanstveno učilišnog kampusa, nekada su bili dio vojnog kompleksa. Devet relativno blizu smještenih objekata preuređeno je za edukacijske svrhe i te objekte koriste razni fakulteti, između ostalih i Fakultet prometnih znanosti.



Slika 1 Prikaz Objekta 71 (označen crveno) u okruženju ostalih objekata Znanstveno-učilišnog kampusa Borongaj.

Objekt 71 je površine od oko 1000 m² i načinjen je od tri etaže (slika 2):

1. Podrum
2. Prizemlje
3. Kat

Vanjski zidovi su načinjeni od pečene opeke i relativno su debeli, također i noseći zidovi unutar objekta su od pečene opeke. Nekadašnji prostrani prazni prostori kasnije su pregrađeni gipsanim pločama kako bi nastali uredi i dvorane. Etažne ploče među etažama su relativno tanke. Visina stropova varira ovisno o etaži, u podrumu i prizemlju visina od poda do stropa iznosi 2.50 m, a dok je ta visina na katu 3.50 m. Korištena vrata unutar objekta su uglavnom drvena uredska vrata.



Slika 2 Prikaz vanjštine Objekta 71.

Naime, poznavanje korištenih materijala koji čine objekt predstavlja jako bitnu stavku pri planiranju bežične mreže. Prigušenje signala ovisi o vrsti korištenog materijala što u konačnici rezultira varijacijom u propagaciji signala.

Objekt 71 čine podrum, prizemlje i kat. Podrum je etaža gdje se nalaze uglavnom istraživački laboratoriji, od kojih su dva dostupna i studentima, a to su PTV i željeznički laboratorij. U tim laboratorijima se ne očekuje da će biti velika koncentracija studenata, u najgorem slučaju do 20 njih. S druge strane nalazi se PC učionica kapaciteta 27 sjedećih mjesta i knjižnica kapaciteta do 20 sjedećih mjesta (tablica 5). U knjižnici i PC učionici se već nalaze računala sa pristupom na Internet putem Etherneta. Međutim, za očekivati je da će studenti svakako koristiti i svoje bežične mrežne uređaje kao

pomagala pri učenju. U podrumu se nalaze još neke prostorije korištene u razne svrhe, no nisu zahvaćene ovim radom zbog nemogućnosti pristupa i vršenja mjerenja.

Tablica 5 Karakteristike etaže podruma.

Etaža - Podrum			
Prostorija	Površina (m ²)	Sjedeća mjesta	Namjena
Željeznički laboratorij	70.9	20	Istraživački laboratorij
PTV	70.9	20	Istraživački laboratorij
Knjižnica	99.5	20	Knjižnica
PC učionica	76.7	27	Dvorana sa računalima

Na etaži prizemlja se očekuje mnogo veća koncentracija studenata zbog četiri predavaone koje se nalaze na toj etaži (tablica 6). Pored četiri predavaone na prizemlju se nalaze i mnogobrojni nastavnički uredi koji ovim radom nisu obuhvaćeni zbog nemogućnosti pristupa i izvršavanja mjerenja u istim. Kapaciteti dvorana su 55 pa do 97 sjedećih mjesta.

Etaža kata posjeduje dvije predavaone kapaciteta 97 sjedećih mjesta, ali i tri PC učionice nešto manjeg kapaciteta, od 19 do 21 sjedeće mjesto (tablica 7). PC učionice su opremljene računalima čiji broj odgovara broju sjedećih mjesta u dvorani, sva računala imaju pristup Internetu putem Ethernet, ali neka računala posjeduju i WLAN karticu što znači da će i ta računala koristiti IEEE 802.11 mrežu Fakulteta za pristup Internetu. Na katu se također nalazi velik broj nastavničkih ureda koji nisu obuhvaćeni ovim radom zbog nemogućnosti pristupa i vršenja mjerenja u istim.

Tablica 6 Karakteristike etaže prizemlja.

Etaža - Prizemlje			
Prostorija	Površina (m ²)	Sjedeća mjesta	Namjena
Dvorana D1	65.1	55	Predavaona
Dvorana D2	102.9	97	Predavaona
Dvorana D3	63.7	55	Predavaona
Dvorana D4	103.7	97	Predavaona

The floor plan shows a central corridor (P=101.4) connecting several lecture halls and smaller rooms. Lecture halls D1 (P=65.1), D2 (P=102.9), D3 (P=63.7), and D4 (P=103.7) are arranged around the perimeter. Smaller rooms include 'Muški' (P=15.7), 'Ženski' (P=17), 'PORTA' (P=19.9), 'CARNET' (P=19), and various offices and service areas. Stairwells and elevators are also indicated.

Tablica 7 Karakteristike etaže kata.

Etaža - Kat			
Prostorija	Površina (m ²)	Sjedeća mjesta	Namjena
Dvorana D5	103.9	97	Predavaona
Dvorana D6	103.7	97	Predavaona
Dvorana D7	44.2	19	Dvorana sa računalima
Dvorana D8	58	24	Dvorana sa računalima
Dvorana D9	58	21	Dvorana sa računalima

The floor plan shows a central corridor (P=89.9) connecting several lecture halls and smaller rooms. Lecture halls D5 (P=103.9), D6 (P=103.7), D7 (P=44.2), D8 (P=58), and D9 (P=58) are arranged around the perimeter. Smaller rooms include 'Muški' (P=14.9), 'Ženski' (P=16.7), 'PORTA' (P=19.9), 'CARNET' (P=19), and various offices and service areas. Stairwells and elevators are also indicated.

3.2.2. Opis karakteristika korisnika

Fakultet je mjesto gdje se stječu nova znanja i omogućuje studentima da ostvare svoj puni potencijal. Zbog toga je neophodno studentima omogućiti sve potrebne resurse. A upravo je pristup Internetu omogućio lakše stjecanje ili pak produbljivanje već stečenih znanja. Evolucija tehnologije na fakultetu omogućila je i jedan potpuno novi koncept nastave koji uključuje holističko iskustvo za studente i nastavnike. Nastavnici u sklopu predavanja sve više koriste multimedijalni sadržaj kako bi se gradivo približilo studentima, studenti u sklopu predavanja koriste vlastite tablete i pametne telefone pri istraživanju.

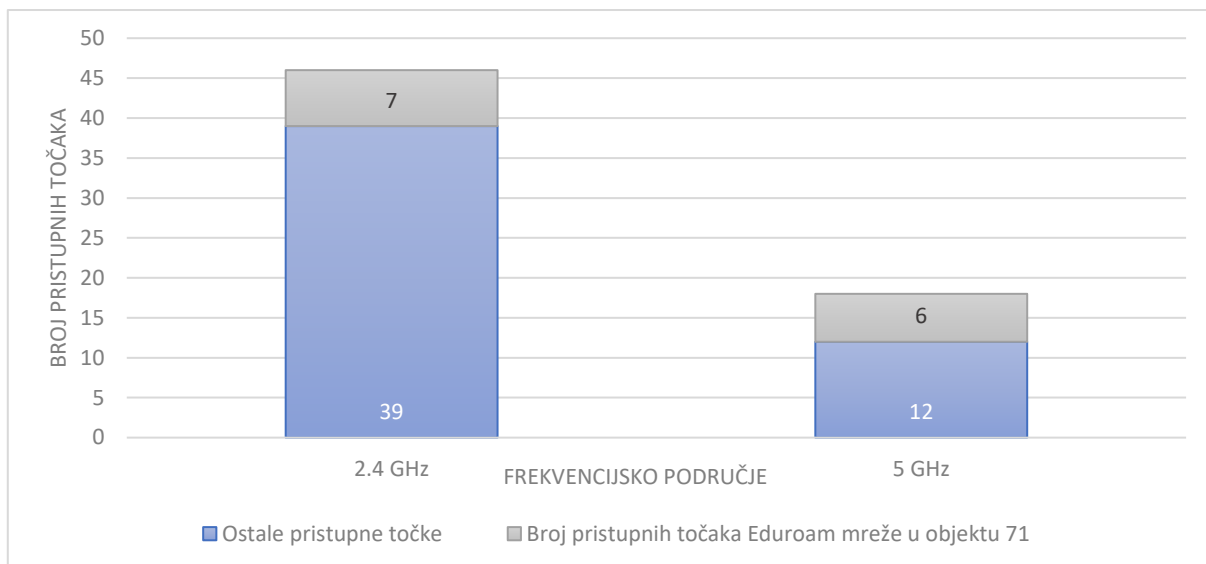
Karakterističan problem pri implementaciji mreže u obrazovnim institucijama je iznimno velika koncentracija korisnika na jednom prostoru relativno male površine te uz to poprilično rigorozni aplikacijski zahtjevi za kapacitet prijenosa. Iako takvi uvjeti i potražnja nisu stalni, nego poklapaju u samo određenim razdobljima tijekom, mreža je bitno planirati da podrži najveće moguće opterećenje, ali također uzeti i u obzir i skalabilnost mreže jer zahtjevi i broj uređaja po korisniku rastu.

Studenti na fakultetu još uvijek ne primjenjuju IKT u značajnoj mjeri. Obično sa sobom nose mrežni jedan uređaj, uglavnom mobitel. Ponekad se pregledava edukativni video sadržaj, obavlja se preuzimanje ili postavljanje materijala na *cloud*, ostvaruje pristup društvenim mrežama, pretražuju po webu, koriste *instant messaging* aplikacije za slanje poruka, fotografija ili video sadržaja. Nastavnici sa sobom nose obično dva pametna telefona i prijenosno računalo. Nastavnici koriste mrežne uređaje za obavljanje video konferencija, pripremu za nastavu, što bi podrazumijevalo preuzimanje različitog sadržaja sa Interneta, zatim postavljanje materijala na Internet kako bi bili dostupni studentima, vrše istraživanja za projekte i slično.

3.3. Analiza kvalitete trenutne IEEE 802.11 mreže Fakulteta prometnih znanosti

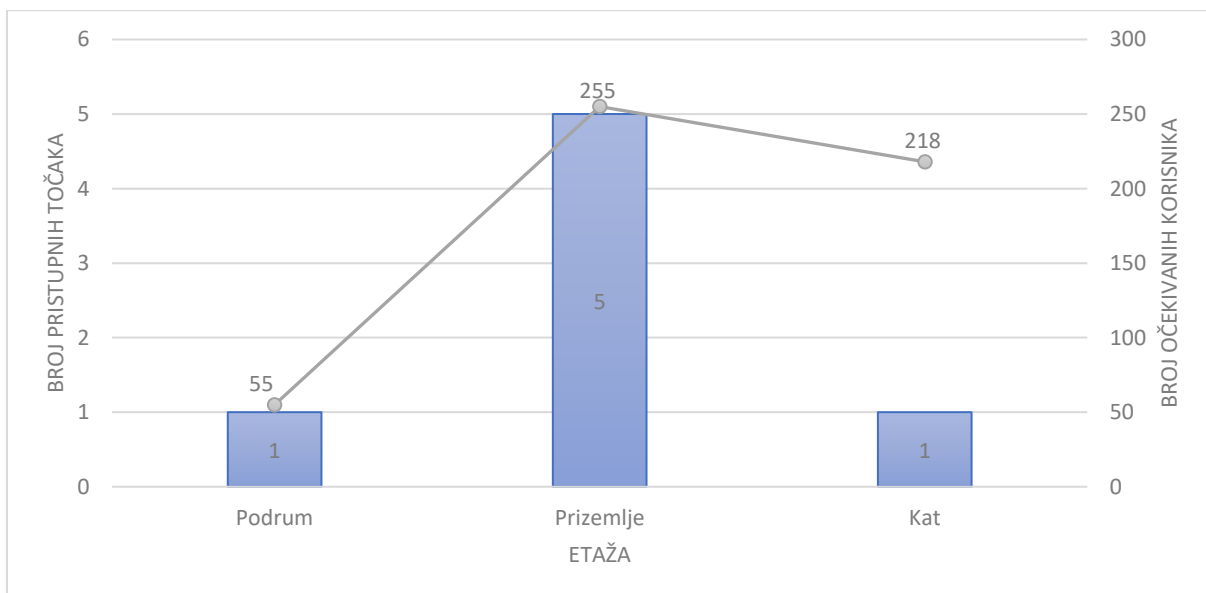
Kao što je prikazano na slici 1 (vidjeti potpoglavlje 3.2.1.), Objekt 71 nalazi se na Sveučilišnom kampusu i okružen je drugim zgradama fakulteta. Pri tome svaka zgrada fakulteta ima vlastitu mrežu što predstavlja potencijalnu interferenciju sa mrežom Objekta 71. Alat je osluškiavao pakete iz okruženja i prikazao MAC adrese SSID-ova, pri čemu je identificirano 68 radio sučelja sveukupno. Iako je uglavnom razina snage očitnog signala jako mala i dalje može uzrokovati interferenciju. Prikaz broja pristupnih točaka *Eduroam*⁶ mreže u odnosu na broj pristupnih točaka u okolini po korištenom frekvencijskom pojasu se nalazi na grafu 1.

⁶ *Eduroam* (engl. *education roaming*) je usluga namijenjena korisnicima iz sustava znanosti i visokog obrazovanja.



Graf 1 Prikaz radio sučelja mreže fakulteta u Objektu 71 u odnosu na ukupan broj radio sučelja u okolini.

Pregledom postavljene opreme utvrđeno je da su pristupne točke poprilično nerazmjerno postavljene (graf 2), pri čemu je jedna pristupna točka postavljena u podrumu i na katu, gdje se prema tablici 5 i 7 (vidjeti potpoglavlje 3.2.1.) te pri popunjenosti od 80%, u podrumu očekuje 55 korisnika, dok se na katu očekuje njih 218. Na prizemlju se nalazi pet pristupnih točaka, dok je očekivani broj korisnika, prema tablici 6 (vidjeti potpoglavlje 3.2.1.) i pri popunjenosti od 80%, njih 255.



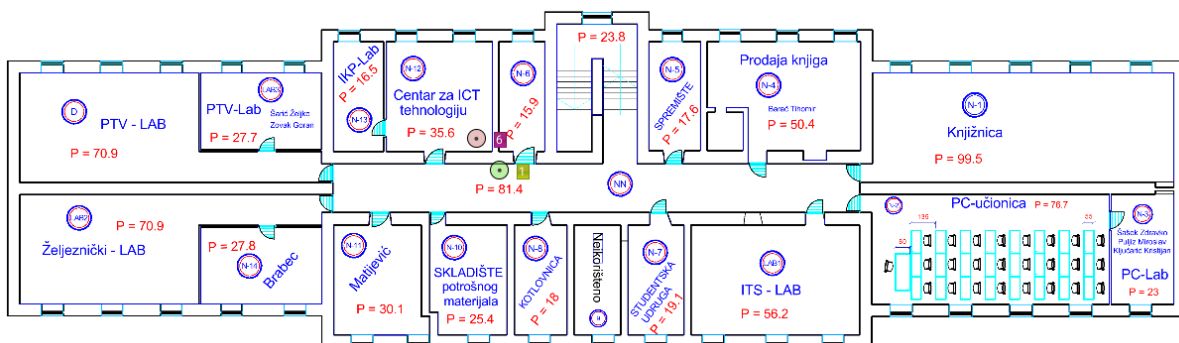
Graf 2 Prikaz odnosa potencijalnog broja korisnika i pristupnih točaka po katovima.

Postojeće pristupne točke u objektu 71 su proizvođača *Cisco Systems, Inc.*, model 1130AG. Ima omogućen *dual band* način rada i podržava standarde IEEE 802.11a/b/g te nominalni maksimalni kapacitet prijenosa od 108 Mbit/s (slika 3). Pristupne točke su konfigurirane tako da je na jednom radio odašiljaču korišten 2.4 GHz pojas, odnosno standard 802.11g, dok drugi radio odašiljač odašilje na 5 GHz pojasu, odnosno koristi 802.11a standard. Preliminarni uvid upućuje na činjenicu da pristupne točke koriste poprilično zastarjelu tehnologiju, kojima će možda biti izazov odgovoriti na suvremene zahtjeve za kapacitetom.



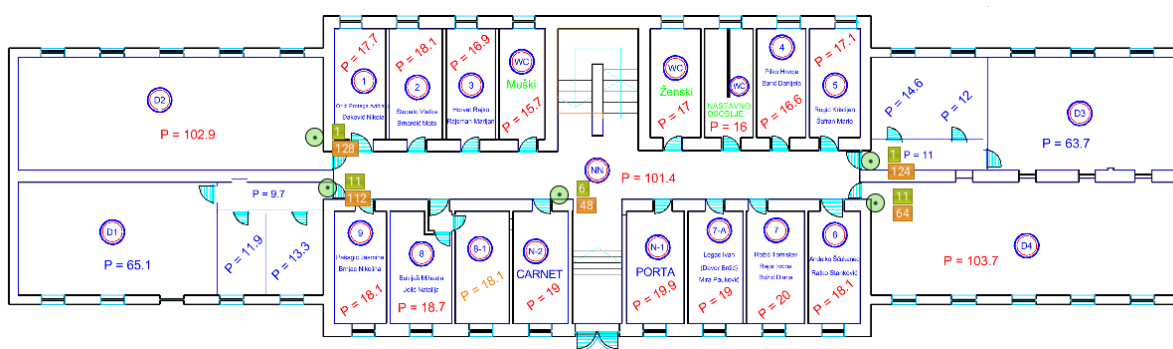
Slika 3 Pristupna točka korištena za postojeću mrežu, Cisco 1130AG. Izvor: [28].

U podrumu je smještena samo jedna pristupna točka, a nalazi se na sredini hodnika na zidu (slika 4). Pristupna točka radi na kanalu 1 u 2.4 GHz frekvenzijskom pojasu. Također, u podrumu postoji još jedna pristupna točka koja ne pripada mreži fakulteta nego se koristi za potrebe laboratorija u kojem je i smještena. Ova pristupna točka radi na kanalu 6 u 2.4 GHz frekvenzijskom pojasu.



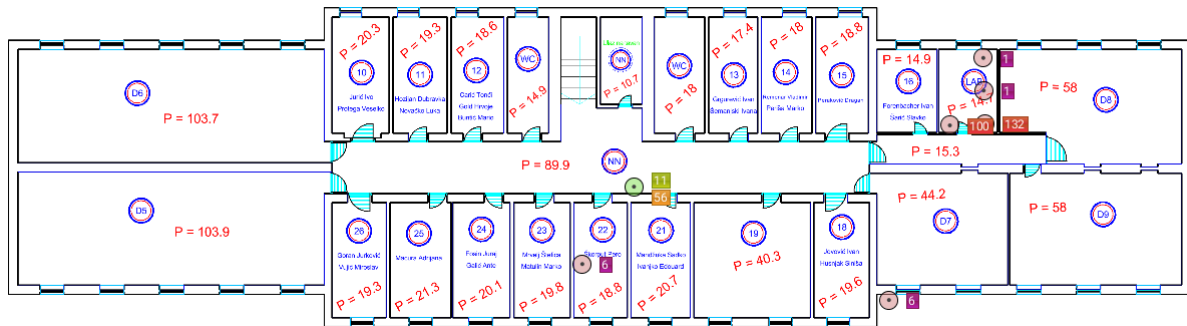
Slika 4 Prikaz položaja pristupnih točaka u podrumu i pripadajućih kanala. Zelenim krugom su prikazane pristupne točke Eduroam mreže.

U prizemlju se nalazi pet pristupnih točaka koje pripadaju mreži fakulteta (slika 5). Sve pristupne točke rade u *dual band* načinu rada, u 2.4 i 5 GHz pojasu. Jedna pristupna točka je smještena na zidu u manjem hodniku prema dvorani D1. Pristupna točka radi na 11 kanalu u 2.4 GHz pojasu te na kanalu 112 u 5 GHz pojasu. U dvorani pored, odnosno D2, smještena je još jedna pristupna točka, postavljena na zid i radi na kanalu 1 u 2.4 GHz pojasu i kanalu 128 u 5 GHz pojasu. Sljedeća pristupna točka je smještena u hodniku, otprilike negdje na sredini i postavljena je na zid. Radi na kanalima 6 u 2.4 GHz pojasu i 48 u 5 GHz pojasu. Na suprotnoj strani nalaze se još dvije pristupne točke, ona u manjem hodniku prema dvorani D3, a radi na kanalima 1 u 2.4 GHz pojasu i 124 u 5 GHz pojasu, dok je druga postavljena na zid u dvorani D4 i radi na kanalima 11 u 2.4 GHz pojasu i 64 u 5 GHz pojasu.



Slika 5 Prikaz položaja pristupnih točaka na prizemlju i pripadajućih kanala. Zelenim krugom su prikazane pristupne točke Eduroam mreže.

Na cijelom području kata smještena je samo jedna pristupna točka mreže fakulteta, nalazi se na sredini hodnika i postavljena je na zid te radi na kanalima 11 u 2.4 GHz pojasu i 56 u 5 GHz pojasu (slika 6). Na katu se nalaze i još neke pristupne točke koje nisu dio mreže fakulteta. Dvije rade u *dual band* načinu rada i odašilju na kanalima 1 i 100 te 1 i 132. Druge dvije odašilju samo u 2.4 GHz frekvencijskom pojasu, obje koriste kanal 1.

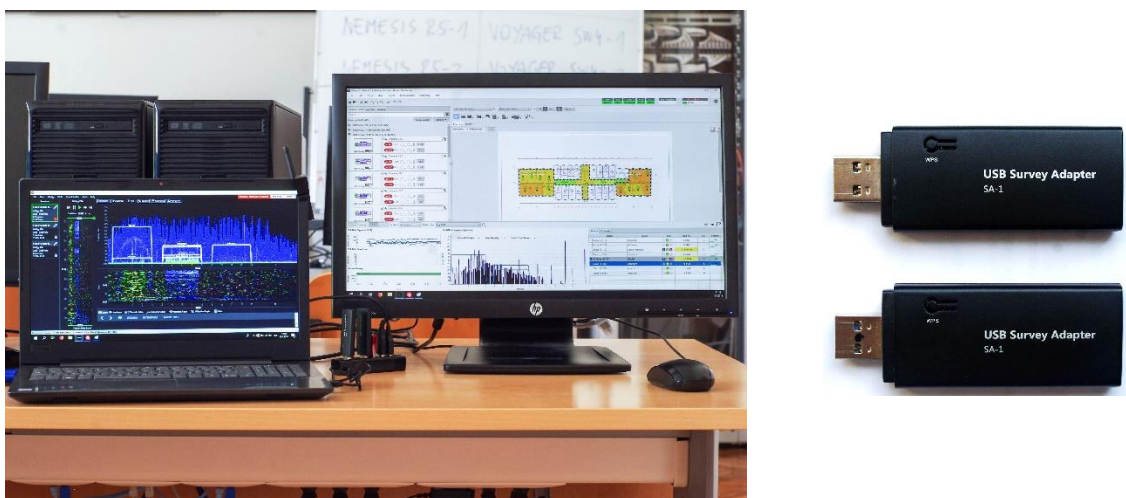


Slika 6 Prikaz položaja pristupnih točaka na katu i pripadajućih kanala. Zelenim krugom su prikazane pristupne točke Eduroam mreže.

3.4. Validacijsko mjerenje performansi mreže

Validacijska mjerenja su pogodna za radio frekvencijsku dijagnostiku i procjenu stanja mreže. Mjerenje se sastoji od prikupljanja uzoraka vrijednosti raznih pokazatelja za evaluaciju performansi mreže, definiranih u poglavlju 3.1. Oprema za mjerenje se sastoji od hardverskog i softverskog dijela, a samo mjerenje se sastoji od prikupljanja uzoraka na terenu.

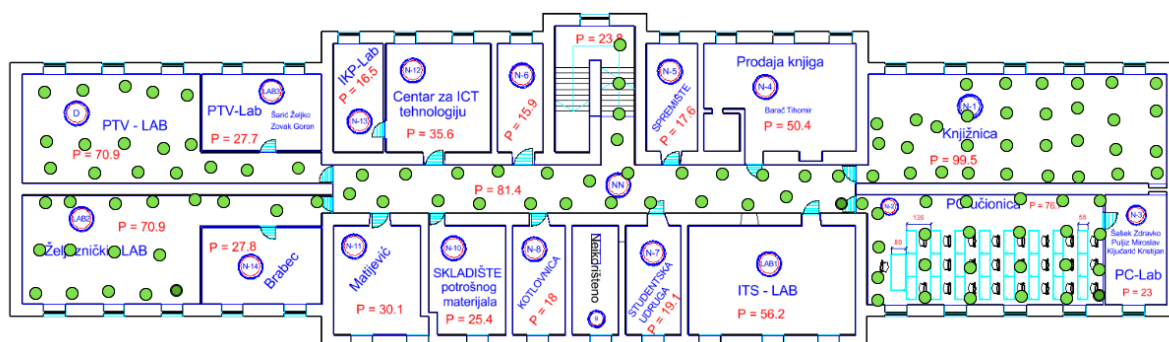
Od softverskog dijela, za evaluaciju kvalitete IEEE 802.11 mreže Objekta 71 korišten je *EkaHau Site Survey*, a od hardverskog dijela dva *Realtek 8812AU WLAN 802.11ac USB NIC* (engl. *Network Interface Card*) adaptera (slika 7). NIC obavlja skeniranje kanala. U slučaju upotrebe jednog NIC-a, on će sam obavljati skeniranje svih predefinih kanala, dok je upotrebom dva ili tri NIC-a moguće podijeliti skeniranje kanala između više NIC-ova te na taj način skratiti vrijeme potrebno za skeniranje.



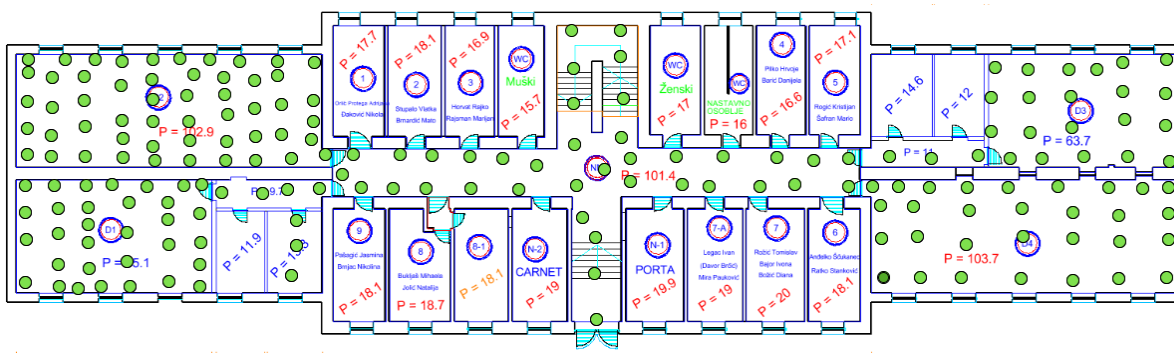
Slika 7 Prikaz korištene opreme, na lijevoj strani prikazano je korišteno prijenosno računalo sa dodatnom antenom te dodatni monitor, dok su desno prikazani korišteni NIC-ovi.

Samo mjerenje provedeno je metodom *Stop-and-Go* i pasivnim načinom mjerenja. *Stop-and-Go* mjerenje je metoda gdje osoba koja to provodi sa sobom nosi mobilnu stanicu sa instaliranim ESS softverom. Kreće se kroz prostor i svaki put kada se zaustavi u određenoj točki u prostoru, izvrši mjerenje nakon kojeg prelazi na iduću točku dok se ne obuhvati cijeli prostor. Razdaljinu među točkama mjerenja procjenjuje osoba koja vrši mjerenje, a za pouzdanije rezultate je bolje da budu što manji razmaci između točaka jer će time uzorak biti veći.

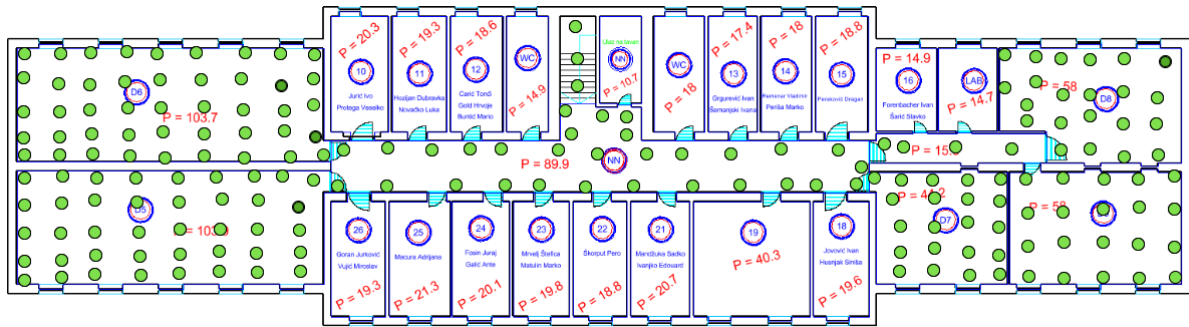
Pasivni način mjerenja podrazumijeva prikupljanje podataka osluškivanjem paketa od strane NIC-ova. Uređaj se pri tome ni u jednom trenutku ne povezuje na pristupnu točku. Sve točke u kojima će napraviti mjerenje po etažama Objekta 71 prikazane su slikama 8, 9 i 10.



Slika 8 Prikaz točaka u podrumu gdje će se obaviti mjerenja postojeće mreže.



Slika 9 Prikaz točaka na prizemlju gdje će se obaviti mjerenja postojeće mreže.



Slika 10 Prikaz točaka na katu gdje će se obaviti mjerenja postojeće mreže.

Prije samog izlaska na teren i provedbe mjerenja, potrebno je u ESS-u definirati:

1. Zahtjeve mreže
2. Zahtjeve za kapacitetom prijenosa na razini prostorija

Definirani zahtjevi služe kao referentna točka prema kojoj se evaluiraju performanse i kvaliteta postojeće mreže te eventualna razina odstupanja.

3.4.1. Definiranje zahtjeva mreže

Prije samog mjerenja definirane su referentne vrijednosti parametara koje bi mreža trebala zadovoljiti. Definirani su zahtjevi kvalitete koji se smatraju odgovarajućim za potrebe *voice* aplikacija i prijenosa podataka (tablica 8) [29], [16]. Odabrane vrijednosti ne trebaju se smatrati kao neki *de jure* standardi, pojedini mrežni zahtjevi mogu ovisiti o različitim proizvođačima, dobavljačima mrežne opreme i povezanim stručnjacima.

Tablica 8 Prikaz definiranih radio frekvencijskih zahtjeva.

Voice + Data					
Razina snage signala	Min	-67	[dBm]		
Odnos signala i šuma	Min	20	[dB]		
Brzina prijenosa	Min	20	[Mbit/s]		
Broj čujnih pristupnih točaka	Min	2	pri	-75	[dBm]
Preklapanje kanala	Max	3	pri	-85	[dBm]
Round Trip Time	Max	200	[ms]		
Gubitak paketa	Max	2	%		

3.4.2. Definiranje zahtjeva za kapacitetom prijenosa

Postavljeni zahtjevi za kapacitetom prijenosa biti će minimalni i ne prate trendove broja uređaja po korisniku i kapaciteta zbog činjenice da postojeća mreža koristi IEEE 802.11 a/b/g/n standarde. Budući da su dvorane rijetko kada do kraja ispunjene, kod zahtjeva za kapacitetom autor je napravio iskustvenu procjenu da su dvorane 80% popunjene i da korisnici sa sobom nose po jedan uređaj, poput pametnog telefona ili prijenosnog računala. S obzirom na postojeće navike (opisane u poglavlju 3.2.2.), polovica korisnika koji se nalaze u području će koristiti svoj pametni telefon, pri čemu će svaki zahtijevati kapacitet prijenosa od 2 Mbit/s, budući da otprilike toliko zahtijevaju aplikacije koje korisnici obično sada koriste. Osim pametnih telefona, postavljeno je i nekoliko prijenosnih računala koji su ubačeni s pretpostavkom da profesori koriste jedan i da nekolicina studenata nosi svoje računalo. U područjima kao što su knjižnica, laboratoriji i PC učionice, smatra se da korisnici na prijenosnim računalima provode istraživanja ili pregledavaju neke video materijale zbog čega je odabran zahtijevani kapacitet prijenosa od 4 Mbit/s. Kod velikog broja studenata je uočeno da koriste još uvijek uređaje koji podržavaju tek MIMO 2x2:2 tehnologiju, zbog čega je odabran profil uređaja sa upravo tom korištenom tehnologijom, budući da se radi validacijsko mjerenje za najgori mogući scenarij. Zahtjevi kapaciteta po područjima Objekta 71 su prikazani tablicom 9.

Tablica 9 Zahtjevi za realni kapacitet prijenosa po područjima.

PROSTORIJA OBJEKTA 71	I. VRSTA UREĐAJA	II. MIMO	III. KAPACITET PO APLIKACIJI ⁷ (Mbps)	IV. BROJ UREĐAJ A	V. UKUPNI KAPACITET (Mbps) (III × IV)
PTV i Željeznički laboratorij	Pametni telefon	2x2:2	0.5	10	5
	Pametni telefon	2x2:2	2	10	20
	Prijenosno računalo	2x2:2	4	5	20
Ukupno:					45
Hodnik (podrum)	Pametni telefon	2x2:2	0.5	5	2.5
	Pametni telefon	2x2:2	2	5	10
Ukupno:					12.5
Knjižnica i PC učionica	Pametni telefon	2x2:2	0.5	10	5
	Pametni telefon	2x2:2	2	10	20
	Prijenosno računalo	2x2:2	4	5	20
Ukupno:					45
Dvorana D1 i D2	Pametni telefon	2x2:2	0.5	58	29
	Pametni telefon	2x2:2	2	57	114
	Prijenosno računalo	2x2:2	2	5	10
Ukupno:					153
Hodnik (prizemlje)	Pametni telefon	2x2:2	0.5	7	3.5
	Pametni telefon	2x2:2	2	8	16
Ukupno:					19.5
Dvorana D3 i D4	Pametni telefon	2x2:2	0.5	58	29
	Pametni telefon	2x2:2	2	57	114
	Prijenosno računalo	2x2:2	2	5	10
Ukupno:					153
Dvorana D5 i D6	Pametni telefon	2x2:2	0.5	70	35
	Pametni telefon	2x2:2	2	70	140
	Prijenosno računalo	2x2:2	2	5	10
Ukupno:					185
Hodnik (kat)	Pametni telefon	2x2:2	0.5	7	3.5
	Pametni telefon	2x2:2	2	8	16
Ukupno:					19.5
Dvorane D7, D8, i D9	Pametni telefon	2x2:2	0.5	20	10
	Pametni telefon	2x2:2	2	20	40
	Prijenosno računalo	2x2:2	2	5	10
Ukupno:					60
UKUPNI ZAHTIJEVANI KAPACITET MREŽE:					865

⁷ 0.5 Mbit/s je dovoljan za pozadinski rad; 2 Mbit/s je dovoljno za pregledavanje e-pošte, pretraživanje weba; 4 Mbit/s je dovoljno za pregledavanje videa u FHD kvaliteti, za *live stream*, preuzimanje datoteka.

3.5. Razvoj simulacijskog modela IEEE 802.11ac mreže na primjeru Objekta 71 Fakulteta prometnih znanosti

Implementacija kvalitetne IEEE 802.11 mreže donosi mnoge izazove zbog svoje nepredvidive i nevidljive prirode. Zbog toga je potrebna pomoć softverskih alata kako bi se pojednostavio ljudski proces u ispunjavanju svih zahtjeva za koju se mreže modelira, na primjer, pomoću simulacijskog modela kako bi se evaluirale propagacijske karakteristike, odredio optimalan broj pristupnih točaka, konfigurirale antene, ali i usporedio prijedlog sa postojećom mrežom..

Za razvoj simulacijskog modela za potrebe ovog rada koristiti će se softverski alat *Ekahau Site Survey* za potrebe modeliranja i simulacije rada mreže. Izraditi će se simulacijski model IEEE 802.11ac mreže kako bi se testirale njezine mogućnosti u odnosu na trenutno korištene standarde Fakulteta u okruženju visoke koncentracije uređaja na malom prostoru i porastu kapaciteta mreže.

Izrada optimalnog modela mreže uključuje definiranje karakteristika prostora i korisnika, specifikaciju modela te konačna izrada prijedloga novog modela mreže temeljenog na IEEE 802.11ac standardu.

3.5.1. Specifikacija modela

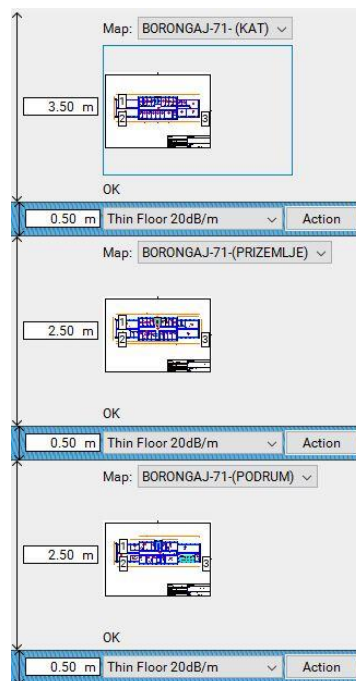
Specifikacija modela predstavlja sam proces izrade simulacijskog modela koji se sastoji od definiranja svih potrebnih ulaznih parametara. Može se kategorizirati kroz sljedeće korake:

1. Modeliranje objekta
 - a. 3D više-katno modeliranje zgrade
 - b. Modeliranje zidova
 - c. Unos atenuacijskih područja
2. Definiranje mrežnih zahtjeva
 - a. Definiranje područja koje će mreža pokrivati
 - b. Definiranje radio frekvencijskih karakteristika
3. Definiranje zahtjeva za kapacitetom prijenosa
 - a. Broj korisničkih uređaja
 - b. Identifikacija karakteristika korisničkih uređaja
 - c. Identifikacija aplikacija
4. Modeliranje arhitekture mreže
 - a. Distribucija potrebnih pristupnih točaka
 - b. Smještaj pristupnih točaka

- c. Postavljanje usmjerenja antena
- d. Konfiguracija radio sučelja pristupnih točaka

3.5.1.1. Modeliranje objekta

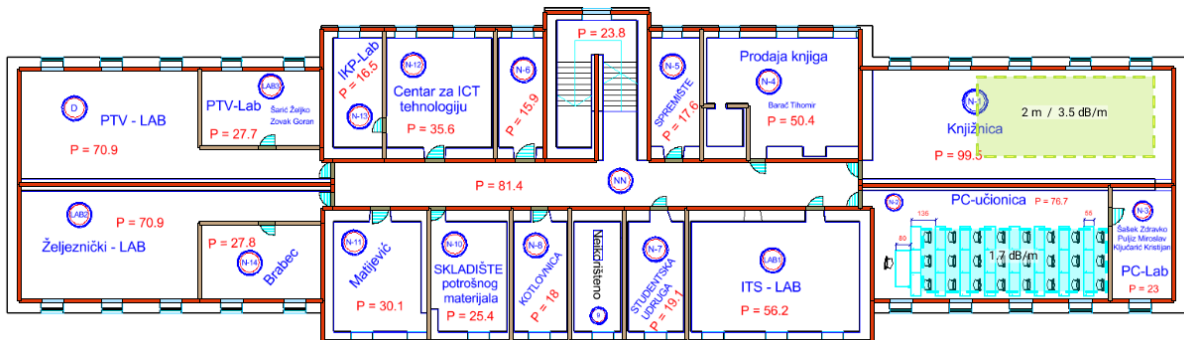
Prvi korak pri kreiranju simulacijskog modela mreže predstavlja modeliranje objekta u kojem se implementira mreža. Modeliranje objekta započinje kreiranjem 3D više-katnog modela zgrade. U softverski alat se uvoze datoteke tlocrta pojedinih etaža, pri čemu se prije svega unose dimenzije objekta (utvrđene u poglavlju 3.2.1.), zatim alat na osnovu toga kreira 3D više-katni model (slika 11). Dalje slijedi definiranje materijala korištenih za etažne ploče, ali i definiranje debljine etažnih ploča. Pregledom dostupne dokumentacije utvrđeno je da su etažne ploče napravljene od betona debljine oko 50 cm.



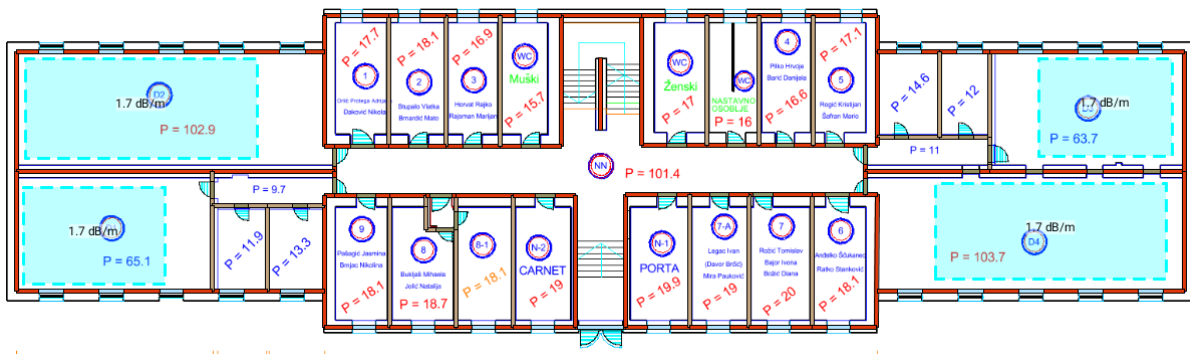
Slika 11 Prikaz više-katnog 3D modela objekta.

Nakon toga slijedi modeliranje unutrašnje strukture objekta. Koristeći se podacima iz poglavlja 3.2.1., modelirani su zidovi i ostale sastavnice objekta. Osim strukturnih pregrada, na propagaciju signala utječu i ostale prepreke koje nisu nužno dio objekta. Naime, na propagaciju signala utječu i osobe unutar prostora, ormari unutar knjižnice, stolna računala i ostalo. Alat ESS ima posebnu funkciju za definiranje atenuacijskih područja koja je primijenjena u odgovarajućim prostorijama. Na slikama

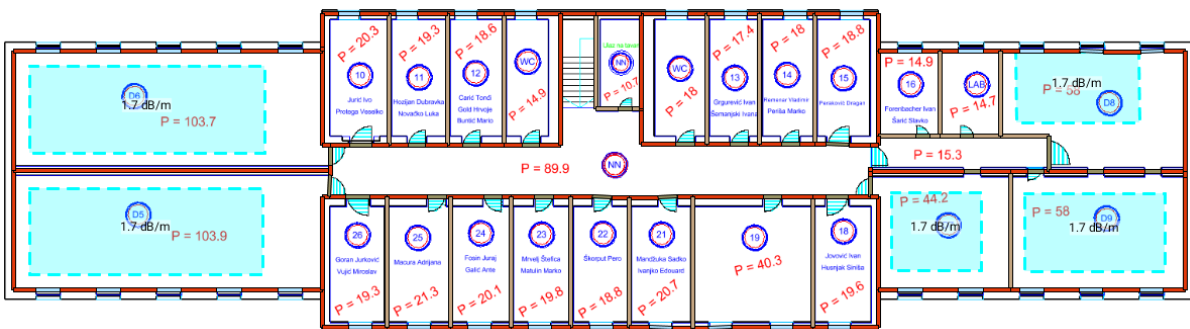
12, 13 i 14 prikazani su modelirani zidovi i definirana atenuacijska područja, a dok su tablicom 10 prikazane razine prigušenja pojedinih materijala i atenuacijskih područja.



Slika 12 Prikaz modeliranih zidova i atenuacijskih područja u podrumu.









Slika 13 Prikaz modeliranih zidova i atenuacijskih područja na prizemlju.



Slika 14 Prikaz modeliranih zidova i atenuacijskih područja na katu.

Tablica 10 Prikaz korištenih pregrada i atenuacijskih područja sa odgovarajućim razinama prigušenja i bojama korištenim za prikaz na tlocrtu.

Pregrade		
Materijal	Boja	Prigušenje [dB]
Beton za etažne ploče	-	20
Pečena cigla		10
Gipsana ploča		3
Drvo za vrata		4
Staklo		3
Atenuacijska područja		
Profil područja	Boja	Prigušenje [dBm/m]
Učionica		1.7
Knjižnica (police za knjige - visina 2m)		3.5

3.5.1.2. Definiranje mrežnih zahtjeva

Nakon modeliranja objekta započinje modeliranje IEEE 802.11 mreže. Na modelu objekta potrebno je definirati područja gdje će korisnici zahtijevati pristup mreži. Na definiranim područjima se očekuje da će mreža ispunjavati sve mrežne zahtjeve i zahtjeve kapaciteta. U ovom simulacijskom modelu mreža će trebati zadovoljiti sve zahtjeve mreže i kapaciteta na područjima gdje studenti imaju pristup, dakle ovim modelom neće biti obuhvaćeni nastavnički uredi i poneki prostori kojim studenti nemaju pristup. Razlog tomu je što zbog nemogućnosti pristupa, u tim prostorima nije izvršeno validacijsko mjerenje mreže na kojem se ovaj simulacijski model temelji.

Sljedeći korak bi bio definirati zahtjeve mreže na tom području. Mrežni zahtjevi predstavljaju referentne vrijednosti parametara koje bi mreža trebala zadovoljiti i koji određuju namjenu mreže. Odabrani su mrežni zahtjevi koje stručnjaci iz ESS-a i Cisco-a smatraju odgovarajućim za potrebe *voice* aplikacija i prijenosa podataka, isti oni definirani i pri validacijskoj analizi mreže (tablica 11).

Tablica 11 Prikaz definiranih radio frekvencijskih zahtjeva.

Voice + Data					
Razina snage signala	Min	-67	[dBm]		
Odnos signala i šuma	Min	20	[dB]		
Brzina prijenosa	Min	20	[Mbit/s]		
Broj čujnih pristupnih točaka	Min	2	pri	-75	[dBm]
Preklapanje kanala	Max	3	pri	-85	[dBm]
Round Trip Time	Max	200	[ms]		
Gubitak paketa	Max	2	%		

Nadalje, studenti i nastavnici Fakulteta koriste *Eduroam* bežičnu mrežu za spajanje na Internet. Autentifikacija se realizira uz pomoć AAI@Edu.hr identiteta, zbog čega je dovoljan samo jedan SSID za cijelu mrežu. Naime, veći broj SSID-ova uzrokuje povećanje upravljačkog prometa u mreži, zbog čega je bolja praksa koristiti manji broj SSID-ova [30].

Bitan parametar predstavlja minimalna brzina prijenosa. Postavljanje minimalne brzine prijenosa predstavlja eliminacijski kriterij koji uređaji moraju zadovoljiti kako bi se povezali na pristupnu točku. Konfiguracija minimalne brzine prijenosa utječe na broj upravljačkih kao i na pojavu RTS/CTS okvira⁸, što u konačnici utječe na kapacitet prijenosa, odnosno na iskorištenost zračnog sučelja.

Različiti standardi su opisani sa različitim specifikacijama fizičkog sloja i definiraju različite modulacijske postupke prema kojima uređaji međusobno komuniciraju (tablica 12) [31].

Tablica 12 Prikaz IEEE 802.11 standarda i podržanih brzina prijenosa.

Specifikacija fizičkog sloja	802.11 standard	Frekvencijski pojas	Podržane brzine prijenosa [Mbit/s]
DSSS	802.11(osnovni)	2.4 GHz	1, 2
High Rate DSSS	802.11b	2.4 GHz	1, 2, 5.5, 11
Extended Rate Physical OFDM	802.11g	2.4 GHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54
OFDM	802.11a	5 GHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54
High Throughput OFDM	802.11n	2.4 GHz / 5 GHz	6.5 do 600
Very High Throughput OFDM	802.11ac	5 GHz	6 do 6930

⁸ Okviri koji su dio opcionalnog mehanizma za sprječavanje kolizije okvira.

Minimalnu brzinu prijenosa poželjno je postaviti na 12 Mbit/s ili 24 Mbit/s. Ponekad se 24 Mbit/s smatra prevelikom zbog više razloga: korištenjem prevelike brzine prijenosa smanjuje se područje pokrivanja jedne pristupne točke dok prostor na kojem dolazi do sukoba PLCP zaglavljiva ostaje isti, zatim upravljačke okvire postaje teže dekodirati na nekim područjima zbog čega korisnici mogu ispustiti vezu te na kraju može uzrokovati veći broj izgubljenih okvira [31].

Zbog svega navedenog, odabrati će se minimalna brzina prijenosa od 12 Mbit/s pri kojoj će se korisnički uređaj uspjeti povezati na pristupnu točku. Budući da se planira koristiti samo 5 GHz frekvencijski pojas, pristup sporijim korisničkim uređajima sa zastarjelim standardima kao što su IEEE 802.11b/g svakako će biti onemogućen.

3.5.1.3. Definiranje zahtjeva za kapacitetom prijenosa

Definiranje zahtjeva za kapacitetom prijenosa predstavlja ključni korak pri planiranju mreže i proizlaze iz razgovora sa odgovarajućim *stakeholderima*. Na početku potrebno je utvrditi područja visoke koncentracije te kapacitete takvih područja. U ovom slučaju to su predavaone. Polazne pretpostavke za definiranje simulacijskih postavki zahtjeva za kapacitetom temeljiti će se na tome da će sve predavaone biti popunjene, a zatim i na studijama od *Cisco*-a koje su pokazale da će korisnici ubuduće imati četiri uređaja [1]. To je vrlo važno kako bi mreža bila skalabilna i mogla učinkovito odgovoriti novonastalim potrebama za kapacitetom. Stoga, pretpostavit će se da će korisnici nositi sa sobom četiri uređaja: dva pametna telefona, jedan tablet i jedno prijenosno računalo. S tim da svi uređaji neće biti aktivni u istom trenutku, pretpostavit će se da će svi pola korisnika koristiti pametne telefone, svi će koristiti prijenosna računala dok ostatak uređaja neće biti u aktivnom načinu rada.

Nakon toga je potrebno odrediti karakteristike uređaja koji korisnici koriste i njegove mogućnosti glede kapaciteta prijenosa koja se temelji na korištenom standardu, MIMO tehnologiji i slično. Poseban utjecaj na kapacitet prijenosa, a potom i na iskorištenost zračnog sučelja, ima MIMO tehnologija. Nije isto da li uređaji koriste MIMO 1x1:1, 2x2:2 ili 3x3:3 zbog utjecaja na iskorištenost zračnog sučelja broj uređaja koji mreža može. Drugim riječima, uređaji sa MIMO višeg stupnja moći će brže komunicirati, iskorištenost zračnog sučelja će biti manje, a istovremeno broj korisničkih uređaja veći.

S obzirom da ovaj rad nastoji predstaviti plan mreže s naglaskom na buduće potrebe, a danas već vodeći modeli svih značajnih proizvođača podržavaju MIMO 4x4:4 (*Samsung S10*, *Huawei Mate 20 Pro*, *Apple XR*), koristit će se profil uređaja koji podržava MIMO 4x4:4 tehnologiju.

Važan aspekt prilikom izrade simulacijskog modela je identifikacija slučajeva uporabe IEEE 802.11 mreže. To je važno zbog toga kako bi se utvrdila namjena mreže, odnosno zbog utvrđivanja zahtijevanog kapaciteta prijenosa koju će mreža trebati zadovoljiti. Iz razgovora sa *stakeholderima* se definira

primarna aplikacija na kojoj će se temeljiti izračuni za kapacitet prijenosa. Tablica 13 prikazuje zahtjeve za prijenosnim kapacitetom za neke od aplikacija. Pri planiranju kapaciteta mreže dobro je imati na umu da zahtjevi kapacitetom aplikacija stalno rastu, tako da je dobro uvijek planirati za nešto veći kapacitet. Nakon što se odredi pojedinačni kapacitet prijenosa, ona se može iskoristiti za računanje ukupnog potrebnog kapaciteta prijenosa. Također, preporučljivo je da se ukupni kapacitet prijenosa računa za različite prostorije posebno, budući da aplikacijski zahtjevi mogu biti različiti za različite prostorije [16].

Tablica 13 Prikaz zahtjeva za kapacitet prijenosa nekih aplikacija. Izvor: [16],[32]–[35]

Korištena aplikacija	Nominalni kapacitet (Mbps)
Web pretraživanje	2
Audio (Deezer - High quality stream)	0.320
Video na zahtjev (Netflix – Full HD)	5
Video na zahtjev (Netflix – UHD)	25
Facebook HD Live stream	4
Skype audio poziv	0.1
Skype HD video poziv	1.5
Preuzimanje datoteka (<i>cloud</i>)	2-8

Definirani profili uporabe IEEE 802.11 usvojeni su od [7] kako bi u što većoj mjeri odgovarale nadolazećim potrebama. Autori u [7] navode da će korisnici primarno obavljati sljedeće aktivnosti kroz različite aplikacije za provjeravanje e-pošte, razmjena poruka ili medijskih sadržaja na *instant messaging* aplikacijama, uspostava VoIP poziva ili pak pregledavanje društvenih aplikacija

Dodatno, neke studije navode da studenti danas koriste mrežu fakulteta ponajviše za pronalaženje raznih materijala i pregledavanje edukativnog video sadržaja [36]. S druge strane, drugi autori navode primjenu Wi-Fi mreže fakulteta za HD video konferencije koje bi mogli koristiti profesori sa svojim kolegama, ali i navodi mogućnost uporabe video konferencija između studenata i profesora u svrhu konzultacija [7]. Također, navodi se uporabe *clouda*, odnosno učitavanja velikih multimedijских datoteka na *cloud*, a kasnije i preuzimanje istih [7].

Nakon što su utvrđeni slučajevi uporabe IEEE 802.11 mreže, potrebno je procijeniti potrebni realni kapacitet prijenosa za pojedinu aplikaciju. S obzirom na korištene aplikacije na pametnim telefonima kod studenata, uzet će se kapacitet prijenosa s obzirom na neke srednje potrebe, odnosno kapacitet prijenosa od 2 Mbit/s, što će biti dovoljno za video pozive, pretraživanje i neka preuzimanja sa *clouda*,

ako će se pretpostaviti da će se prijenosno računalo koristiti za zahtjevnije aplikacije. Pretpostavlja se da će korisnici na prijenosnim računalima u prostorijama kao što su knjižnica i laboratoriji ponajviše gledati video materijale, za njih će se uzeti kapacitet prijenosa od 4 Mbit/s, s obzirom da se do 2022. godine očekuje da će tek 22% korisnika koristiti UHD kvalitetu videa [1], također, to će biti dovoljno za preuzimanje i postavljanje materijala na *cloud*, video konferencije i slično. Također, pretpostavlja se da će studenti u predavaonama najviše pretraživati po webu i pregledavati e-poštu, zbog čega je u takvim dvoranama odabran kapacitet prijenosa od 2 Mbit/s. Prikaz broja uređaja po dvoranama i njihovih kapaciteta nalazi se u tablici 14.

Tablica 14 Zahtijevani realni kapacitet prijenosa po područjima.

PROSTORIJA OBJEKTA 71	I. VRSTA UREĐAJA	II. MIMO	III. KAPACITET PO APLIKACIJI ⁹ (Mbps)	IV. BROJ UREĐAJ A	V. UKUPNI KAPACITET (Mbps) (III × IV)
PTV i Željeznički laboratorij	Pametni telefon	4x4:4	0.5	23	11.5
	Pametni telefon	4x4:4	2	8	16
	Tablet	4x4:4	0.5	15	7.5
	Prijenosno računalo	4x4:4	4	15	60
Ukupno:					95
Hodnik (podrum)	Pametni telefon	4x4:4	0.5	15	7.5
	Pametni telefon	4x4:4	2	5	10
	Tablet	4x4:4	0.5	10	5
Ukupno:					22.5
Knjižnica i PC učionica	Pametni telefon	4x4:4	0.5	70	35
	Pametni telefon	4x4:4	2	24	48
	Tablet	4x4:4	0.5	47	23.5
	Prijenosno računalo	4x4:4	4	47	188
Ukupno:					294.5
Dvorana D1 i D2	Pametni telefon	4x4:4	0.5	228	114
	Pametni telefon	4x4:4	2	76	152
	Tablet	4x4:4	0.5	152	76
	Prijenosno računalo	4x4:4	2	152	304
Ukupno:					646
Hodnik (prizemlje)	Pametni telefon	4x4:4	0.5	30	15
	Pametni telefon	4x4:4	2	10	20
	Tablet	4x4:4	0.5	20	10
Ukupno:					45
Dvorana D3 i D4	Pametni telefon	4x4:4	0.5	228	114

⁹ 0.5 Mbit/s je dovoljan za pozadinski rad; 2 Mbit/s je dovoljno za pregledavanje e-pošte, pretraživanje weba; 4 Mbit/s je dovoljno za pregledavanje videa u FHD kvaliteti, za *live stream*, preuzimanje datoteka.

	Pametni telefon	4x4:4	2	76	152
	Tablet	4x4:4	0.5	152	76
	Prijenosno računalo	4x4:4	2	152	304
Ukupno:					646
Dvorana D5 i D6	Pametni telefon	4x4:4	0.5	292	146
	Pametni telefon	4x4:4	2	96	192
	Tablet	4x4:4	0.5	194	97
	Prijenosno računalo	4x4:4	2	194	388
Ukupno:					823
Hodnik (kat)	Pametni telefon	4x4:4	0.5	30	15
	Pametni telefon	4x4:4	2	10	20
	Tablet	4x4:4	0.5	20	10
Ukupno:					45
Dvorane D7, D8, i D9	Pametni telefon	4x4:4	0.5	96	48
	Pametni telefon	4x4:4	2	32	64
	Tablet	4x4:4	0.5	64	32
	Prijenosno računalo	4x4:4	4	64	256
Ukupno:					400
UKUPNI ZAHTIJEVANI KAPACITET MREŽE:					3017

3.5.1.4. Modeliranje arhitekture mreže

Modeliranje arhitekture uključuje određivanje vrijednosti ključnih parametara, poput broja i razmještaja pristupnih točaka, snage odašiljanja i konfiguracije radio sučelja, neophodnih za modeliranje modela arhitekture IEEE 802.11ac mreže.

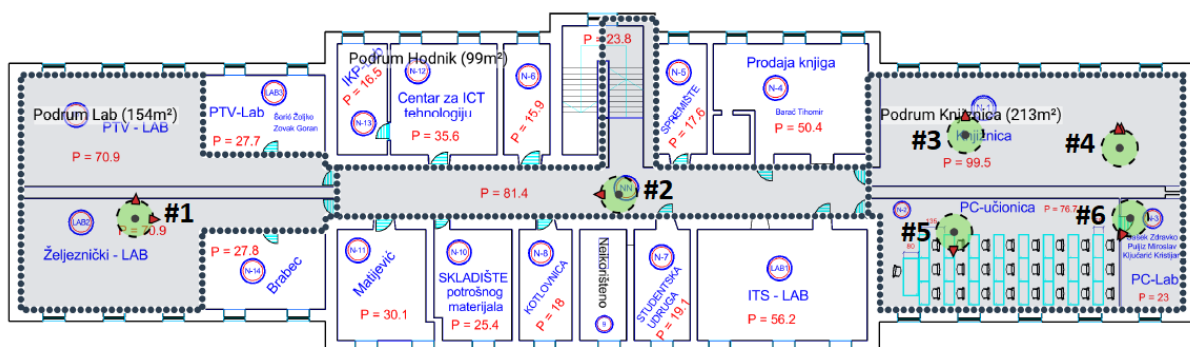
Za prijedlog modela mreže bežične LAN mreže korištene su pristupne točke tvrtke *Cisco Systems, Inc.* *Cisco* je vodeća svjetska tvrtka iz sektora umrežavanja te su njegove pristupne točke 2017. godine bile najprodavanije na tržištu [37], a i već implementirane pristupne točke su spomenutog proizvođača, zbog čega će se ponovo posegnuti za ovim proizvođačem. Odabran je jedan od posljednjih modela pristupnih točaka za poslovno okruženje, 3802i (slika 15). *Cisco* 3802i podržava 802.11ac Wave 2 standard pri čemu nudi nominalni maksimalni kapacitet prijenosa do 5.2 Gbit/s (2×2.6 Gbit/s) i MU-MIMO 4x4 tehniku prijenosa sa tri prostorna toka [38]. Za ovaj prediktivni model upotrijebljeno je ukupno 39 pristupnih točaka.



Slika 15 Prikaz pristupne točke korištene za prediktivni model mreže - Cisco 3802i. Izvor: [38].

Pristupne točke su postavljane na područjima velike koncentracije, prvenstveno u predavaonicama, dok je se osnovna pokrivenost osigurala u hodnicima kako bi bio omogućen *roaming* korisnicima. Pristupne točke su postavljane na stropove, ali ponegdje i na zidove, ovisno o konkretnoj situaciji. Također, ovisno o karakteristikama područja i situacija upotrijebljeni su i različiti tipovi eksternih antena, pri čemu je korišten *Micro* i *Macro* tip antene.

U podrumu je upotrijebljeno šest pristupnih točaka (slika 16). Kako u podrumu nema dvorana sa posebno velikom gustoćom korisnika korišteno je nešto manje pristupnih točaka za istu površinu za razliku od ostalih etaža. Na području dva laboratorija dovoljna je bila jedna pristupna točka sa omogućena oba radio sučelja i korištenim *Macro* tipom antene koji omogućava pokrivanje većeg dijela površine. Usmjerenje antena je dodatno podešeno kako bi se postigli bolji rezultati. Na hodniku je smještena jedna pristupna točka sa jednim omogućenim radio sučeljem i upotrijebljenim *Macro* tipom antene koja je naknadno još usmjerena. Na području knjižnice i PC-učionice se očekuje nešto veći broj korisnika te su postavljene četiri pristupne točke, pri čemu je samo na jednoj onemogućeno jedno od radio sučelja. Detaljna konfiguracija radio sučelja je prikazana tablicom 15.



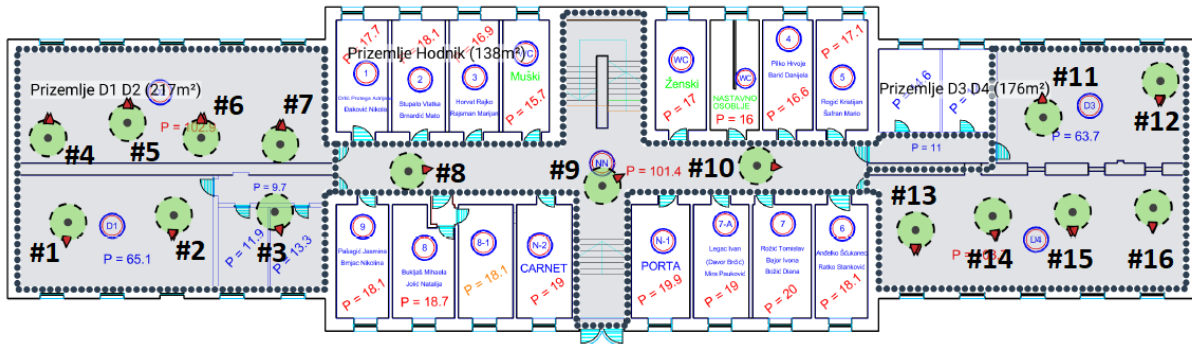
Slika 16 Prikaz rasporeda pristupnih točaka i usmjerenja antena u podrumu (crvena strelica).

Tablica 15 Konfiguracija radio sučelja u podrumu.

Pristupna točka #		#1	#2	#3	#4	#5	#6
Visina na kojoj je postavljena (m)		2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Kanal na radio sučelju 1 (5 GHz @ 20 MHz)		48	64	108	48	124	40
Kanal na radio sučelju 2 (5 GHz @ 20 MHz)		112	-	56	116	-	132
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 1 (mW)		20	50	8	8	8	6
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 2 (mW)		20	-	8	4	-	12
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 1	Vertikalna ravnina						
	Horizontalna ravnina						
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 2	Vertikalna ravnina		-			-	
	Horizontalna ravnina		-			-	
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 1							
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 2			-			-	

U prizemlju je korišteno 16 pristupnih točaka kako bi se zadovoljili radio frekvencijski i oni za kapacitet zahtjevi (slika 17). Na svim radio sučeljima se koristio *Micro* tip antene i minimalna snaga odašiljanja kako bi pokrivanje signalom bilo što manje i prodiranje signala u druge ćelije minimalno. Također, sve antene su pažljivo usmjerene radi što boljih radio frekvencijskih karakteristika (tablica 16, 17 i 18). Na području dvorana D1 i D2 postavljeno je sedam pristupnih točaka i omogućeno je svih 14 radio sučelja sa pažljivo kreiranim planom kanala. U hodniku su smještene tri pristupne točke sa omogućenim jednim od radio sučelja kako bi osigurala pokrivenost, *roaming* uz zadovoljenje

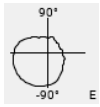
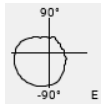
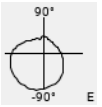
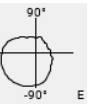
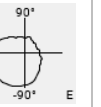
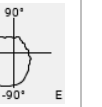
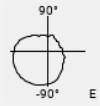
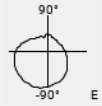
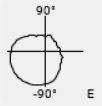
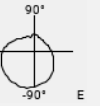
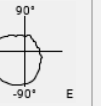
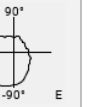
odgovarajućih zahtjeva za prijenosnim kapacitetom. Na području dvorana D3 i D4 smješteno je šest pristupnih točaka sa omogućenim svim radio sučeljima i podešenim usmjerenjima antena.







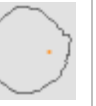





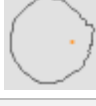
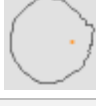



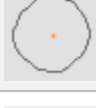
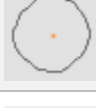

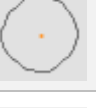

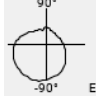
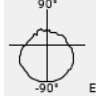
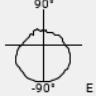
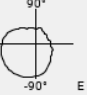
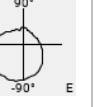
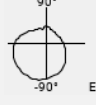
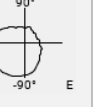
Slika 17 Prikaz rasporeda pristupnih točaka i usmjerenja antena na prizemlju (crvena strelica).

Tablica 16 Konfiguracija radio sučelja na prizemlju.

Pristupna točka #		#1	#2	#3	#4	#5	#6
Visina na kojoj je postavljena (m)		2	2	2	2	2	2
Kanal na radio sučelju 1 (5 GHz @ 20 MHz)		44	60	112	64	36	52
Kanal na radio sučelju 2 (5 GHz @ 20 MHz)		100	140	132	108	128	136
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 1 (mW)		3	2	2	3	1	1
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 2 (mW)		7	2	2	2	1	2
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 1	Vertikalna ravnina						
	Horizontalna ravnina						
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 2	Vertikalna ravnina						
	Horizontalna ravnina						

Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 1						
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 2						

Tablica 17 Konfiguracija radio sučelja na prizemlju.

Pristupna točka #		#7	#8	#9	#10	#11
Visina na kojoj je postavljena (m)		2	2	2	2	2
Kanal na radio sučelju 1 (5 GHz @ 20 MHz)		40	128	124	40	64
Kanal na radio sučelju 2 (5 GHz @ 20 MHz)		104	-	-	-	136
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 1 (mW)		1	5	12	5	2
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 2 (mW)		1	-	-	-	3
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 1	Vertikalna ravnina					
	Horizontalna ravnina					
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 2	Vertikalna ravnina					
	Horizontalna ravnina					
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 1						
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 2			-	-	-	

Tablica 18 Konfiguracija radio sučelja na prizemlju.

Pristupna točka #		#12	#13	#14	#15	#16
Visina na kojoj je postavljena (m)		2	2	2	2	2
Kanal na radio sučelju 1 (5 GHz @ 20 MHz)		52	56	36	44	56
Kanal na radio sučelju 2 (5 GHz @ 20 MHz)		104	18	116	128	140
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 1 (mW)		3	2	1	2	3
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 2 (mW)		3	2	1	2	2
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 1	Vertikalna ravnina					
	Horizontalna ravnina					
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 2	Vertikalna ravnina					
	Horizontalna ravnina					
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 1						
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 2						

Na katu je smješten najveći broj pristupnih točaka, njih 17 (slika 18). Na svim radio sučeljima je korišten *Micro* tip antene te su naknadno ovisno o potrebi usmjerene. Korištena je minimalna snaga odašiljanja zbog već navedenih razloga (tablica 19, 20 i 21). Na području dvorana D5 i D6, gdje se ujedno očekuje i najveća koncentracija korisnika, smješteno je osam pristupnih točaka sa svih 16 radio sučelja omogućenih. U hodniku je bilo potrebno postaviti četiri pristupne točke kako se zadovoljili radio frekvencijski zahtjevi, ali i oni za kapacitet prijenosa. Na području dvorana sa računalima, D7, D8 i D9 je postavljeno pet pristupnih točaka sa svim omogućenim radio sučeljima.





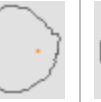











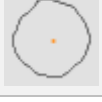

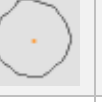
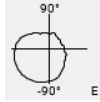
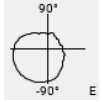
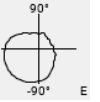
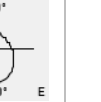
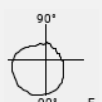


Slika 18 Prikaz rasporeda pristupnih točaka i usmjerenja antena na katu (crvena strelica).

Tablica 19 Konfiguracija radio sučelja na katu.








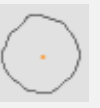





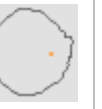






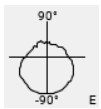
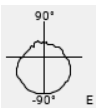
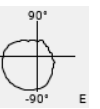
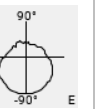
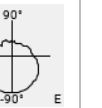


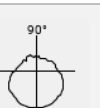

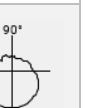
Pristupna točka #		#1	#2	#3	#4	#5	#6
Visina na kojoj je postavljena (m)		2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Kanal na radio sučelju 1 (5 GHz @ 20 MHz)		40	108	64	44	104	56
Kanal na radio sučelju 2 (5 GHz @ 20 MHz)		116	132	100	120	140	124
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 1 (mW)		2	2	1	1	1	1
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 2 (mW)		2	2	1	1	1	1
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 1	Vertikalna ravnina						
	Horizontalna ravnina						
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 2	Vertikalna ravnina						
	Horizontalna ravnina						
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 1							
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 2							

Tablica 20 Konfiguracija radio sučelja na katu.

Pristupna točka #		#7	#8	#9	#10	#11	#12
Visina na kojoj je postavljena (m)		2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Kanal na radio sučelju 1 (5 GHz @ 20 MHz)		48	36	104	60	44	100
Kanal na radio sučelju 2 (5 GHz @ 20 MHz)		112	128	-	-	-	-
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 1 (mW)		1	1	5	8	5	4
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 2 (mW)		1	1	-	-	-	-
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 1	Vertikalna ravnina						
	Horizontalna ravnina						
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 2	Vertikalna ravnina						
	Horizontalna ravnina						
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 1							
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 2				-	-	-	-

Tablica 21 Konfiguracija radio sučelja na katu.

Pristupna točka #	#13	#14	#15	#16	#17
Visina na kojoj je postavljena (m)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Kanal na radio sučelju 1 (5 GHz @ 20 MHz)	64	48	120	40	60
Kanal na radio sučelju 2 (5 GHz @ 20 MHz)	124	112	140	132	104

Razina snage odašiljanja na radio sučelju 1 (mW)		3	5	5	3	3
Razina snage odašiljanja na radio sučelju 2 (mW)		7	5	5	3	2
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 1	Vertikalna ravnina					
	Horizontalna ravnina					
Prikaz zračenja antene na radio sučelju 2	Vertikalna ravnina					
	Horizontalna ravnina					
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 1						
Usmjerenje antene po vertikalnoj osi na radio sučelju 2						

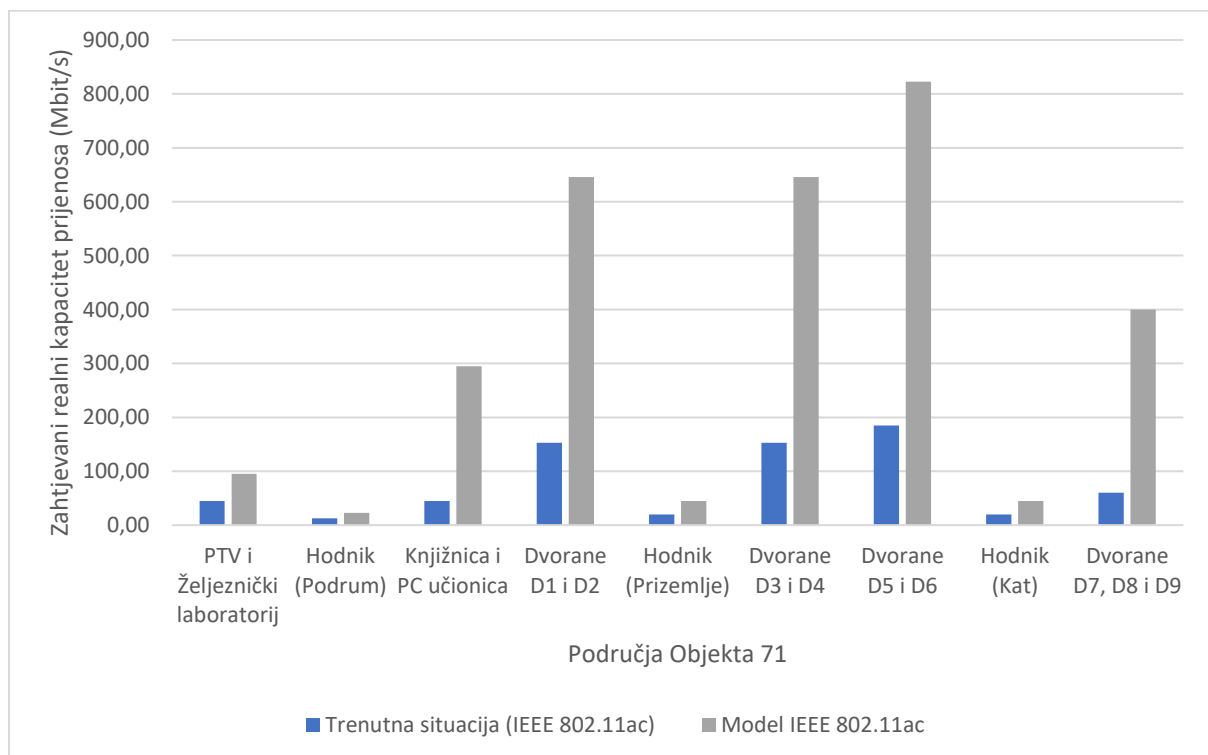
4. Rezultati

4.1. Usporedba performansi simulacijskog modela IEEE 802.11ac modela i postojeće mreže Objekta 71 Fakulteta prometnih znanosti

Upotrebom formula 1-3 i definiranih zahtjeva za kapacitetom prijenosa, odnosno broja uređaja, njihovih karakteristika i definiranih aplikacija, izračunate su vrijednosti pokazatelja koristeći softverski alat *Ekahau Site Survey* kako bi se simulirao rad i evaluirale performanse IEEE 802.11ac mreže za Objekt 71 Fakulteta prometnih znanosti u kontekstu značajno povećanja koncentracije broja uređaja i zahtjeva za prijenosnim kapacitetom.

Performanse postojeće mreže koje su određene kroz validacijsko mjerenje (*Trenutna situacija*) usporedno su prikazane sa performansama dobivene iz simulacije rada predloženog novog modela arhitekture mreže temeljene na IEEE 802.11ac standardu (*Model IEEE 802.11ac*).

Usporedba zahtjeva za prijenosnim kapacitetom pri trenutnoj situaciji i u modelu IEEE 802.11ac mreže prikazana je grafom 3. Treba napomenuti da je, za razliku od trenutne mreže, Model IEEE 802.11ac u cijelosti ispunio definirane zahtjeve, ostavljajući mjesta za dodatni napredak, što je vidljivo na rezultatima po etažama objekta (poglavlja 4.1.1 – 4.1.3).

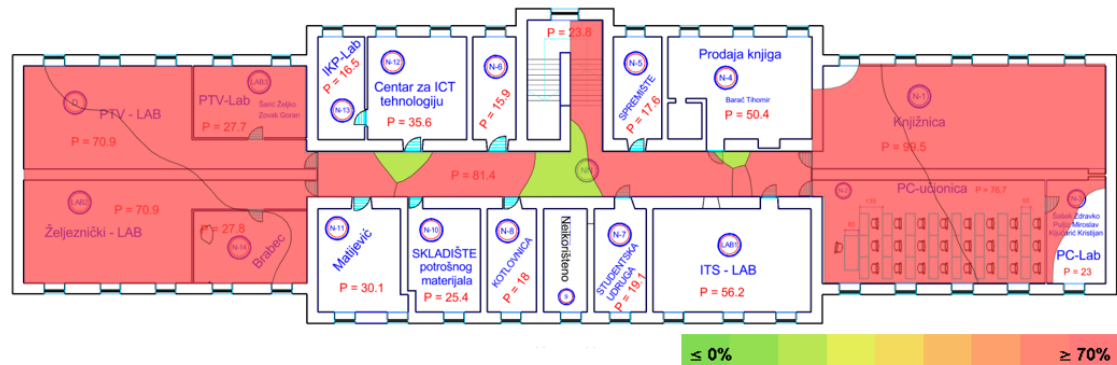


Graf 3 Usporedba zahtjeva za kapacitet prijenosa u trenutnoj mreži i u modelu IEEE 802.11ac.

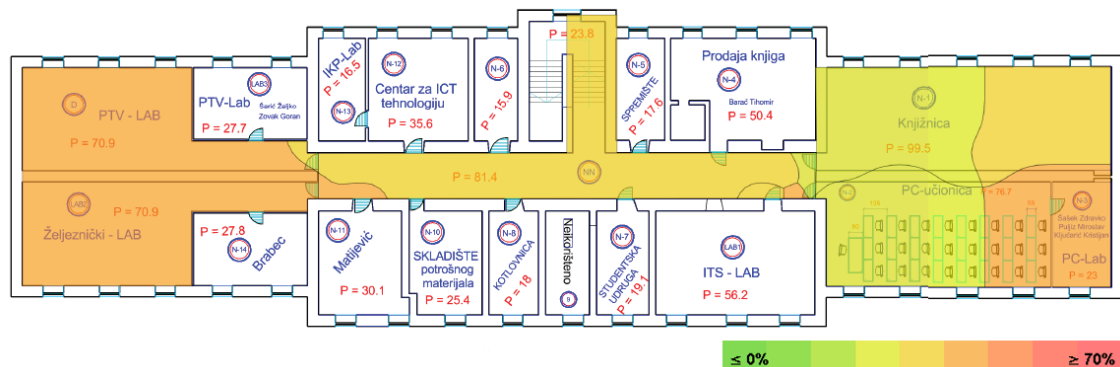
4.1.1. Prikaz rezultata za podrum

Iskorištenost zračnog sučelja kod trenutne situacije je 100% na više od 90% površine podruma. S druge strane, iskorištenost zračnog sučelja na modelu IEEE 802.11ac mreže je na 56.5% površine podruma ispod 30% te na ostatku površine nigdje ne prelazi 50% (slika 19).

a. *Trenutna situacija*



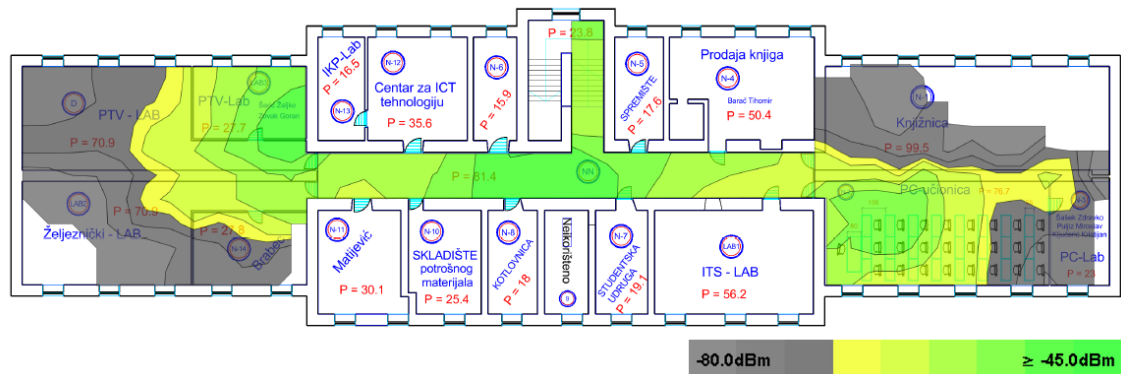
b. *Model IEEE 802.11ac*



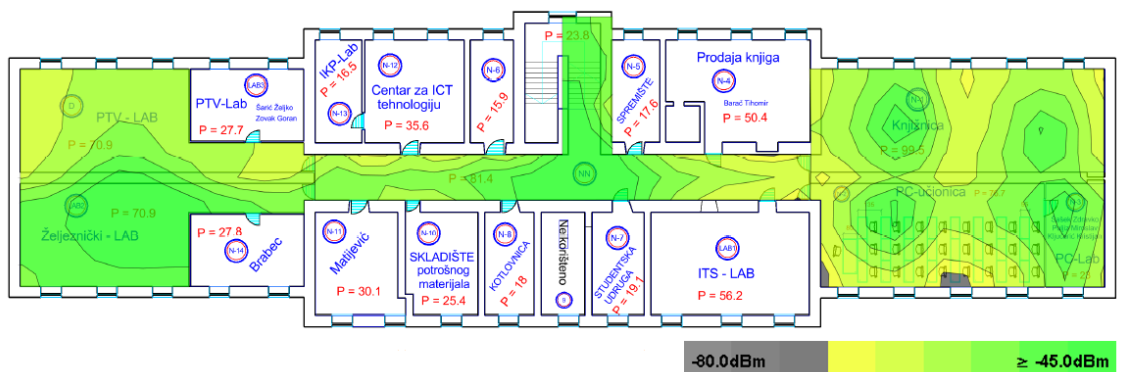
Slika 19 Usporedba iskorištenosti zračnog sučelja.

Razina snage signal se kod trenutne situacije na 45.7% površine podruma nalazi ispod -67 dBm. Na modelu IEEE 802.11ac mreže na 4.6% površine razina snage signala pada ispod -67 dBm, a na 69.9% površine se nalazi razina snage signal veća od -60 dBm (slika 20).

a. Trenutna situacija



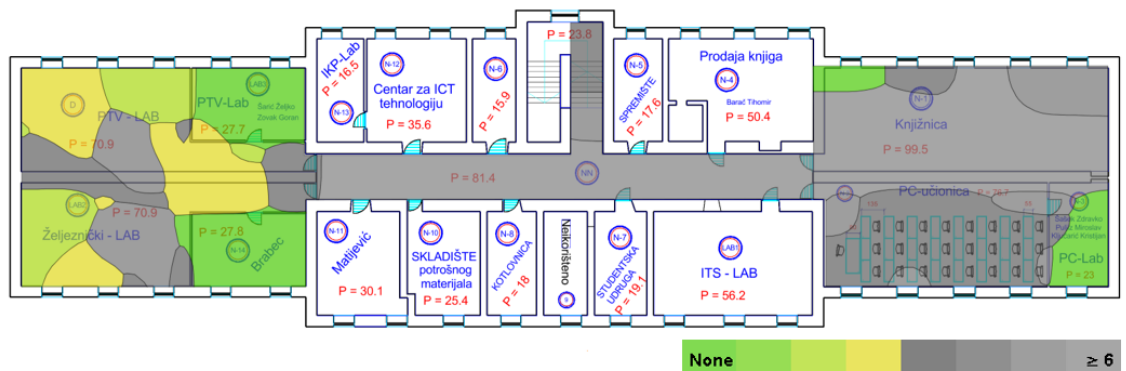
b. Model IEEE 802.11ac



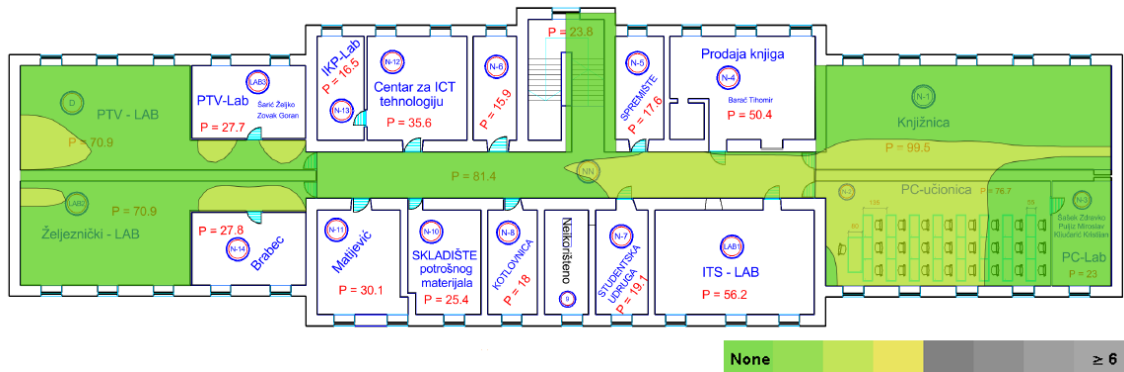
Slika 20 Usporedba razine snage signala.

Preklapanje više od tri kanala se u trenutnoj situaciji javlja na više od 90% površine, pri čemu se na 38.6% površine javlja preklapanje šest ili više kanala. S druge strane, na modelu IEEE 802.11ac se ne pojavljuju više od dva preklapajuća kanala, a na 58.6% površine se ne pojavljuje nikako preklapanje kanala (slika 21).

a. Trenutna situacija



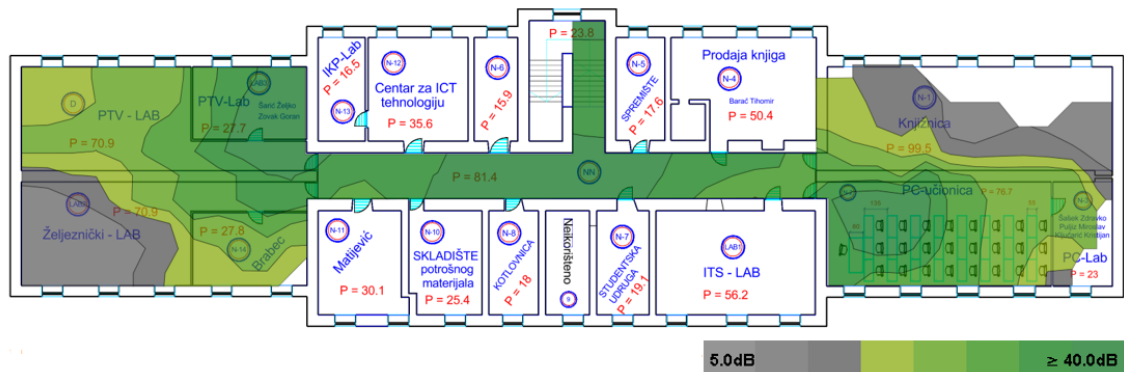
b. Model IEEE 802.11ac



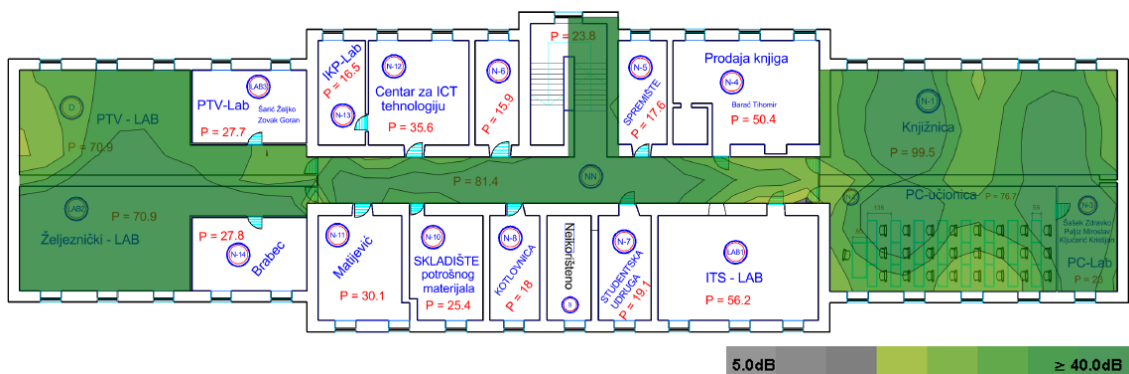
Slika 21 Usporedba preklapanja kanala.

Odnos signala i šuma je u trenutnoj situaciji je na 26.1% površine ispod 20 dB, a na 17.9% površine 40 dB ili veći. Na modelu IEEE 802.11ac odnos signala i šuma je na 0.2% ispod 20 dB, a na 39% površine veći 40 dB ili više (slika 22).

a. Trenutna situacija



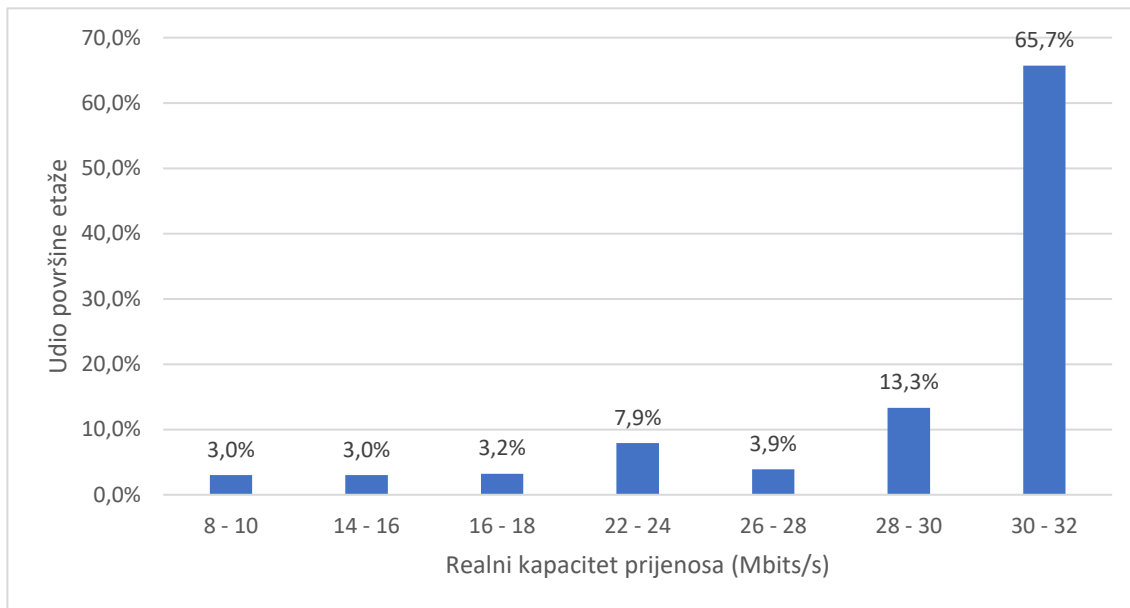
b. Model IEEE 802.11ac



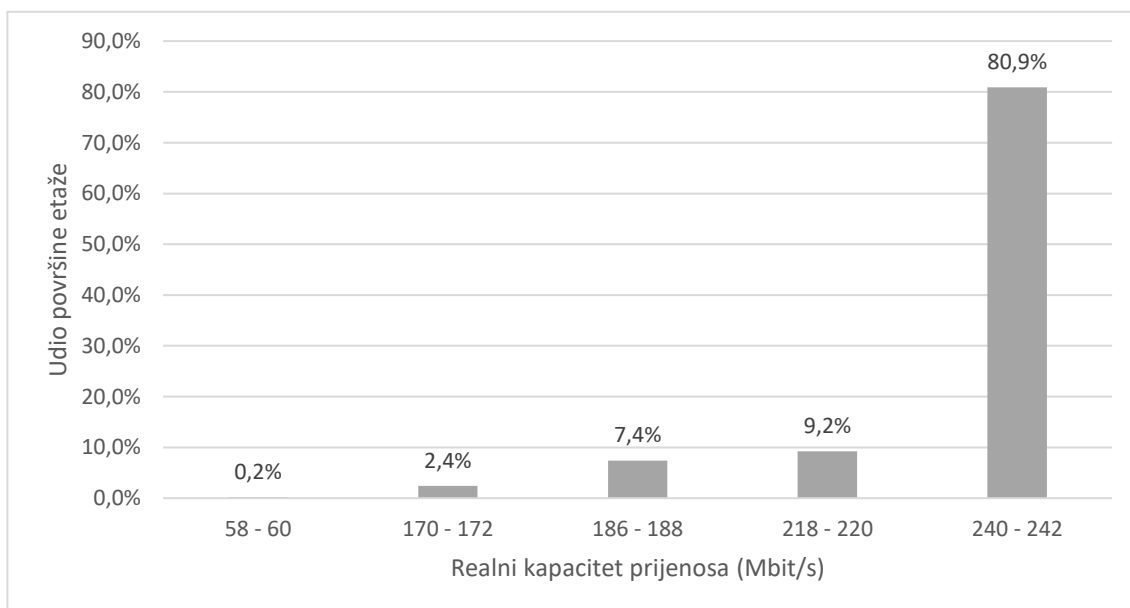
Slika 22 Usporedba odnosa signala i šuma.

Realni kapacitet prijenosa u trenutnoj situaciji ima najveću vrijednost od 32 Mbit/s i na 65.7% površine realni kapacitet prijenosa poprima najveću vrijednost. S druge strane, realni kapacitet prijenosa u modelu 802.11ac ide do najviših 242 Mbit/s i najveću vrijednost poprima na 80.9% površine (slika 23).

a. *Trenutna situacija*



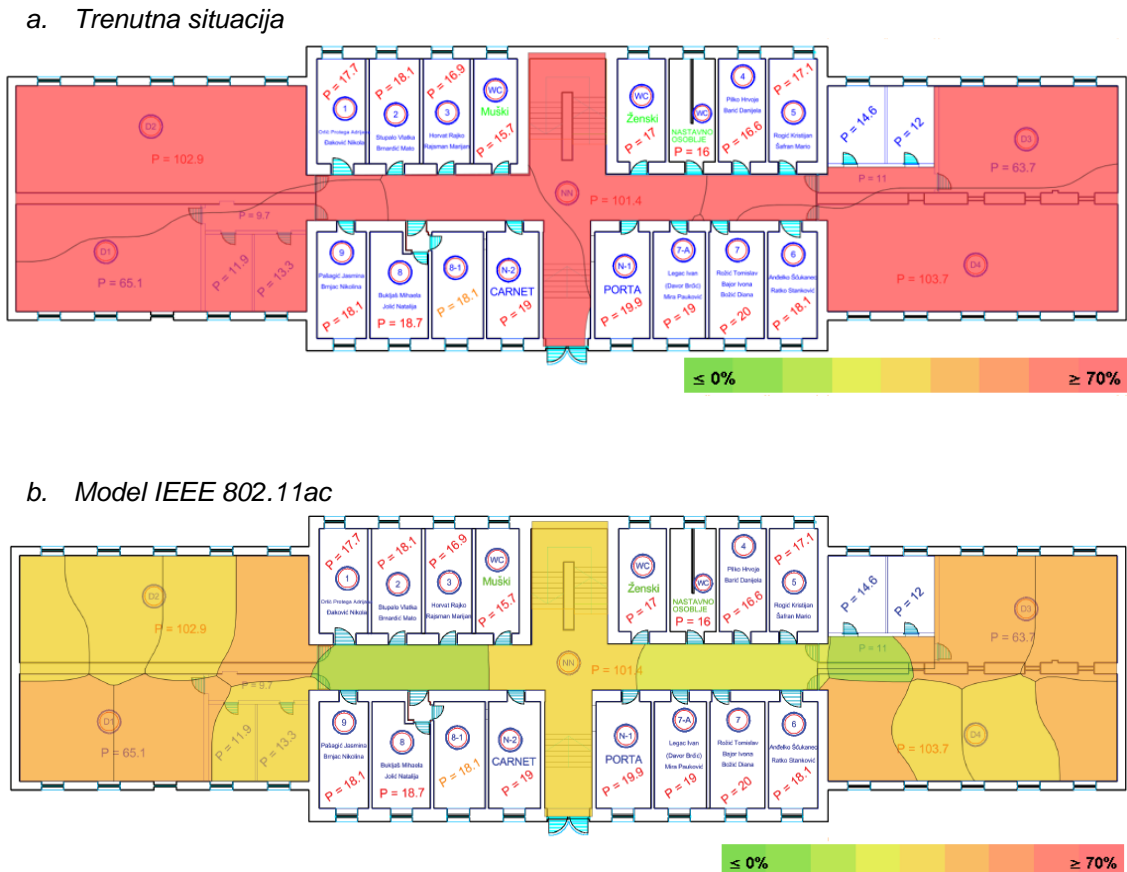
b. *Model IEEE 802.11ac*



Slika 23 Usporedba realnog kapaciteta prijenosa.

4.1.2. Prikaz rezultata za prizemlje

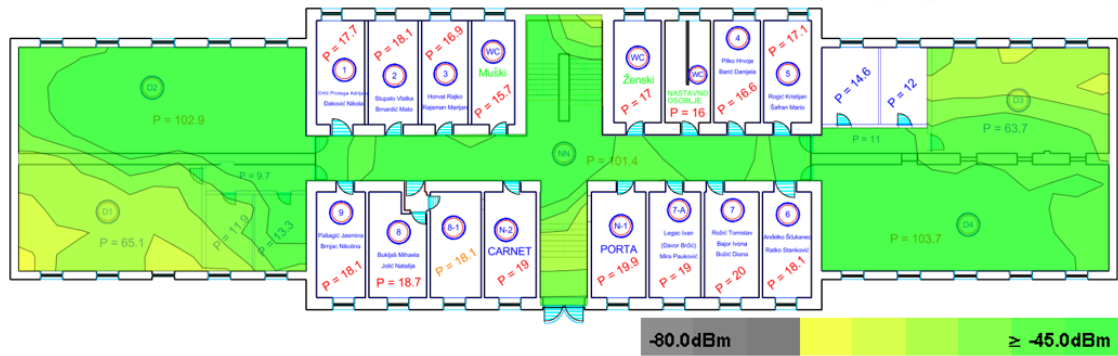
Iskorištenost zračnog sučelja na prizemlju u trenutnoj situaciji na 100% površine je na 100%, dok na modelu IEEE 802.11ac mreže nigdje ne prelazi 50% pri čemu je na 54.3% površine između 30 i 40% (slika 24)



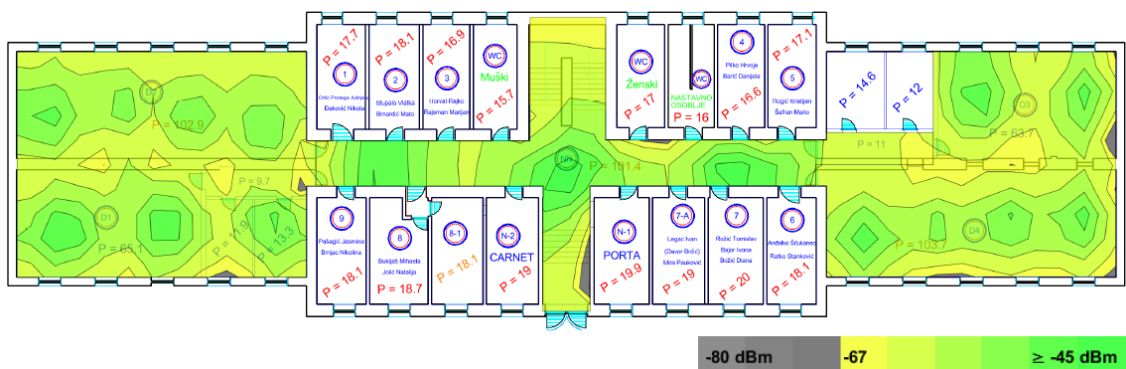
Slika 24 Usporedba iskorisćenosti zračnog sučelja.

Razina snage signala je u trenutnoj situaciji na 50% površine prizemlja veća od -45 dBm. S druge strane, 6.5% površine na modelu IEEE 802.11ac mreže posjeduje razinu signala ispod -67 dBm, dok 55.6% površine ima razinu snage signala između -65 i -55 dBm (slika 25).

a. Trenutna situacija



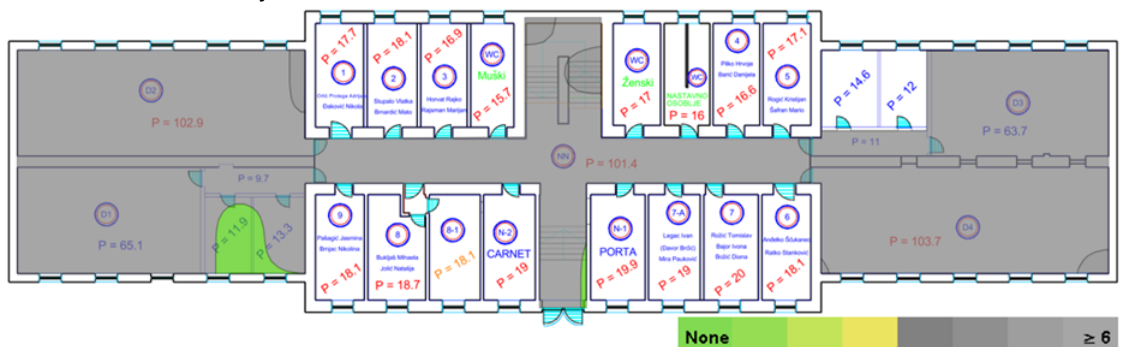
b. Model IEEE 802.11ac



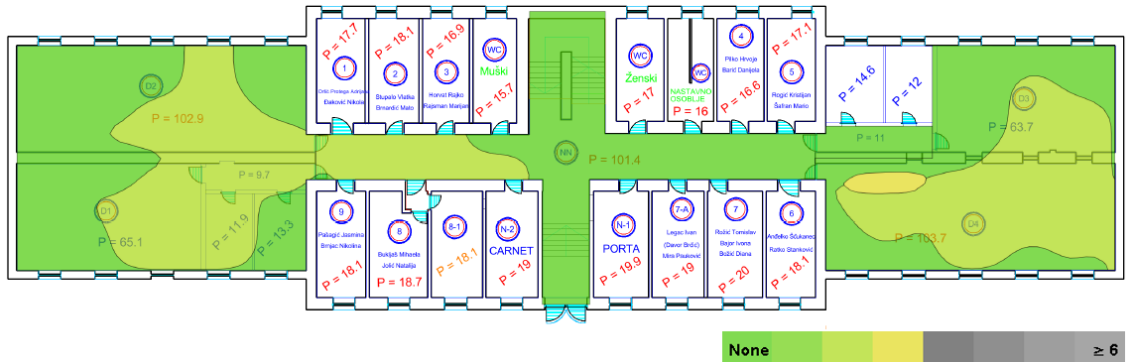
Slika 25 Usporedba razine snage signala.

Preklapanje pet ili više kanala u trenutnoj situaciji se pojavljuje na 94.2% površine prizemlja. Na modelu IEEE 802.11ac mreže na 53% površine ne postoji preklapanje kanala, na 45.8% površine se javlja preklapanje dvaju kanala te na 0.9% površine se javljaju tri preklapajuća kanala (slika 26).

a. Trenutna situacija



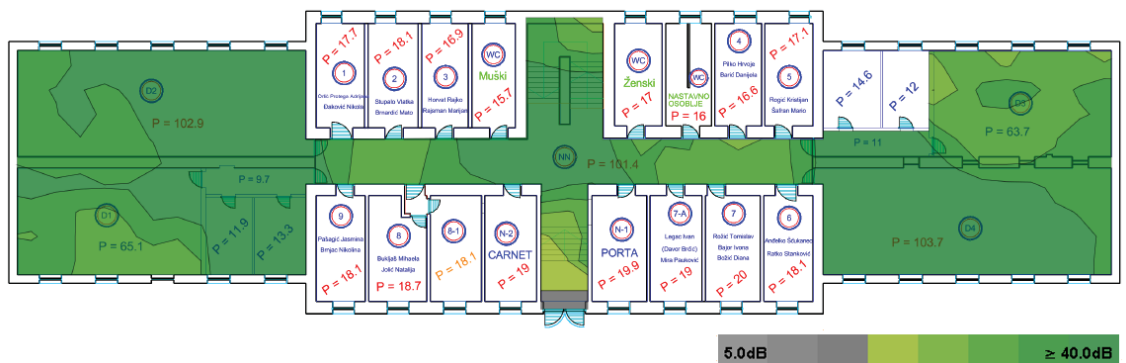
b. Model IEEE 802.11ac



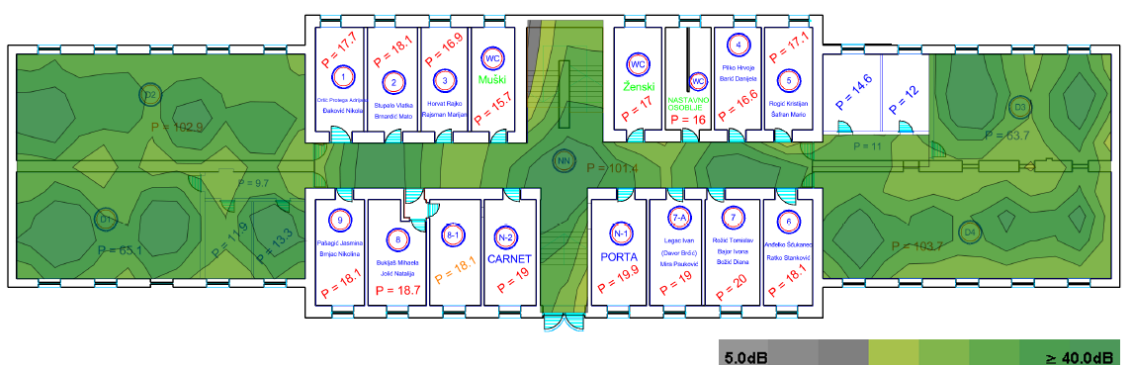
Slika 26 Usporedba preklapanja kanala.

Odnos signala i šuma na prizemlju u trenutnoj situaciji na 77.6% površine ima vrijednost 40 dB ili veću, dok na modelu IEEE 802.11ac na 26.5% površine ima vrijednost 40 dB ili veću (slika 27).

a. Trenutna situacija



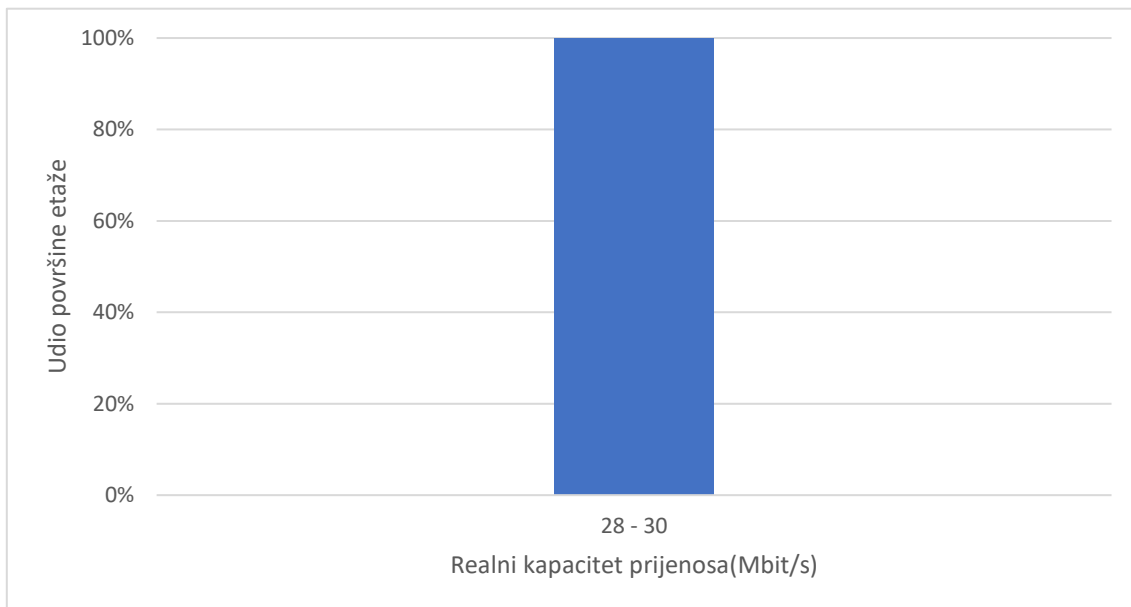
b. Model IEEE 802.11ac



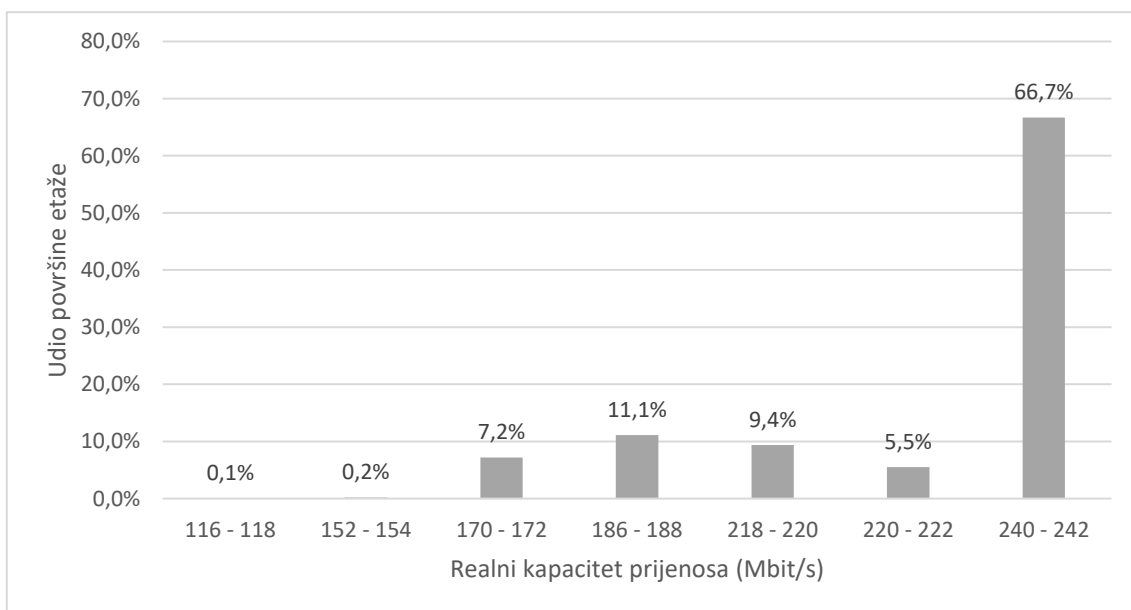
Slika 27 Usporedba odnosa signala i šuma.

Realni kapacitet prijenosa u trenutnoj situaciji na cijeloj površini prizemlja je između 28 i 30 Mbit/s. S druge strane, na modelu IEEE 802.11ac mreže realni kapacitet prijenosa dostiže najviše 242 Mbit/s i nalazi se na 66.7% površine (slika 28).

a. *Trenutna situacija*



b. *Model IEEE 802.11ac*

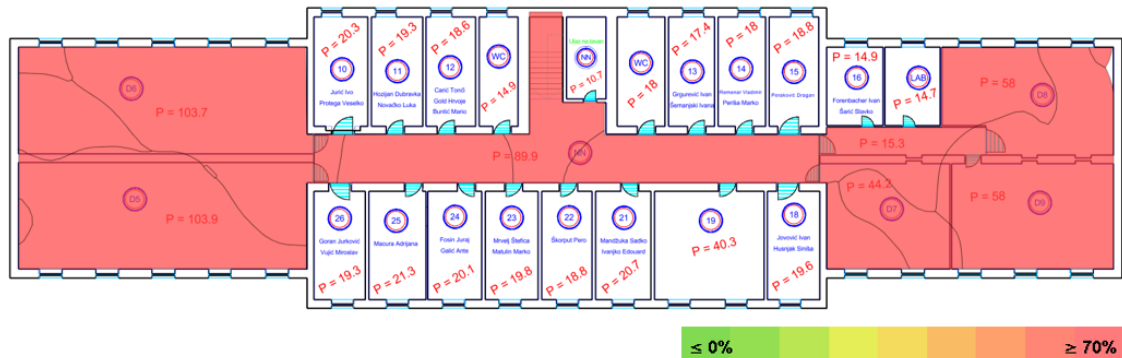


Slika 28 Usporedba realnog kapaciteta prijenosa.

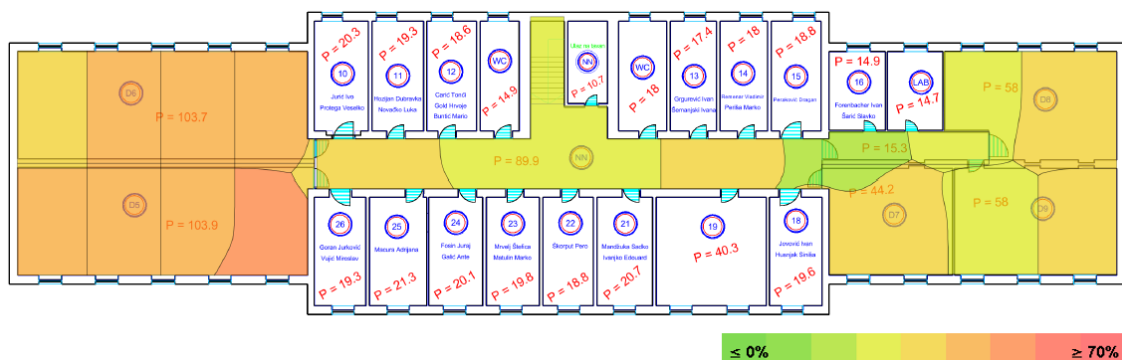
4.1.3. Prikaz rezultata za kat

Iskorištenost zračnog sučelja u trenutnoj situaciji je na 100% na cijeloj površini kata. Na modelu IEEE 802.11ac mreže pak iskorištenost zračnog sučelja ne prelazi nigdje 50%, te je na 60.9% površine između 30 i 40% (slika 29).

a. Trenutna situacija



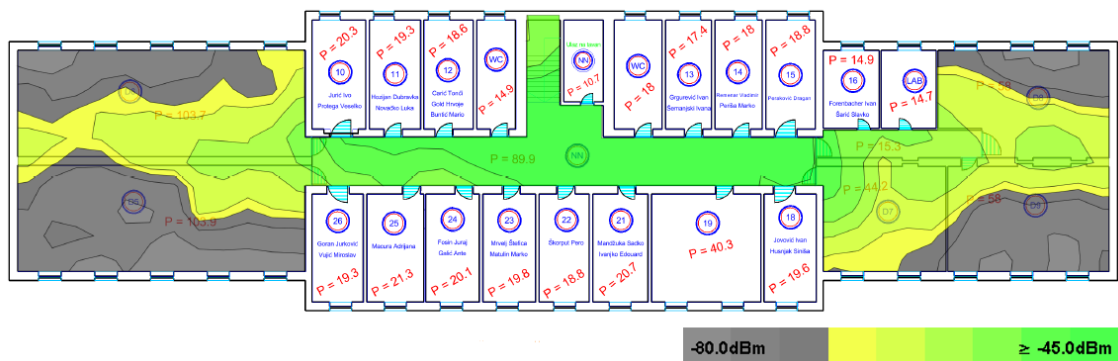
b. Model IEEE 802.11ac



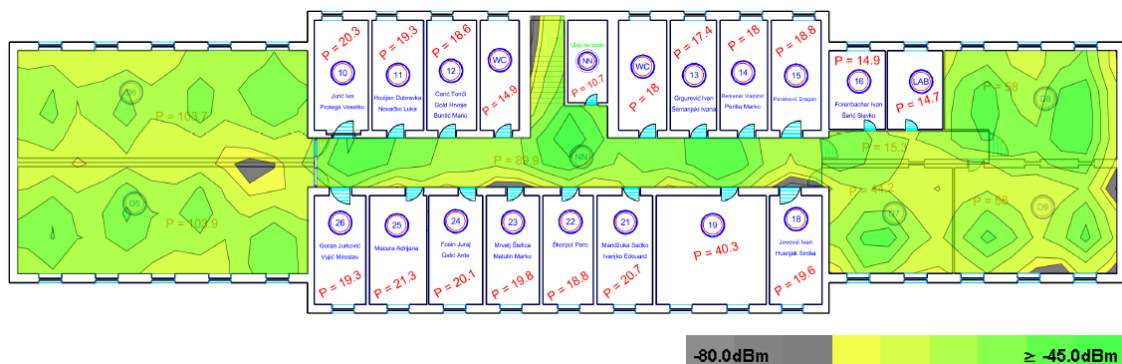
Slika 29 Usporedba iskorištenosti zračnog sučelja.

Snage signala u trenutnoj situaciji na 56.3% površine kata posjeduju vrijednosti -67 dBm ili manje. Na modelu IEEE 802.11ac mreže 3.4% površine kata ima vrijednost snage signala -67 dBm ili manju, dok 41.3% površine posjeduju razinu snage signala -55 dBm ili veću (slika 30).

a. Trenutna situacija



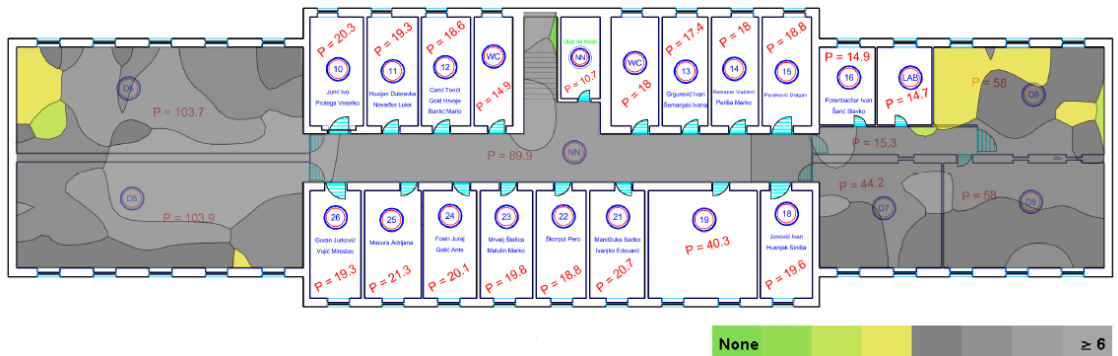
b. Model IEEE 802.11ac



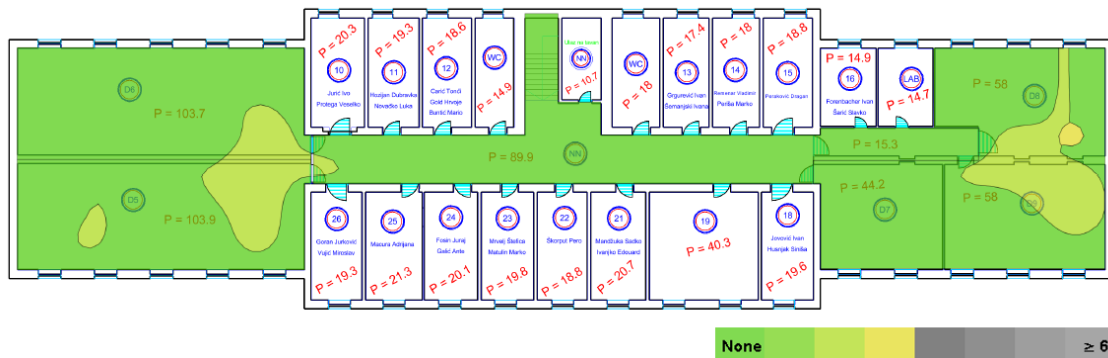
Slika 30 Usporedba razine snage signala.

Preklapanje više od tri kanala u trenutnoj situaciji se javlja na 93.1% površine kata, pri čemu se na 23.2% površine javlja preklapanje šest ili više kanala. Na modelu 802.11ac mreže na 73.8% površine kata se ne javlja preklapanje kanala, dok se na 23.7% površine javlja preklapanje dvaju kanala te na 2.4% površine tri kanala (slika 31).

a. Trenutna situacija



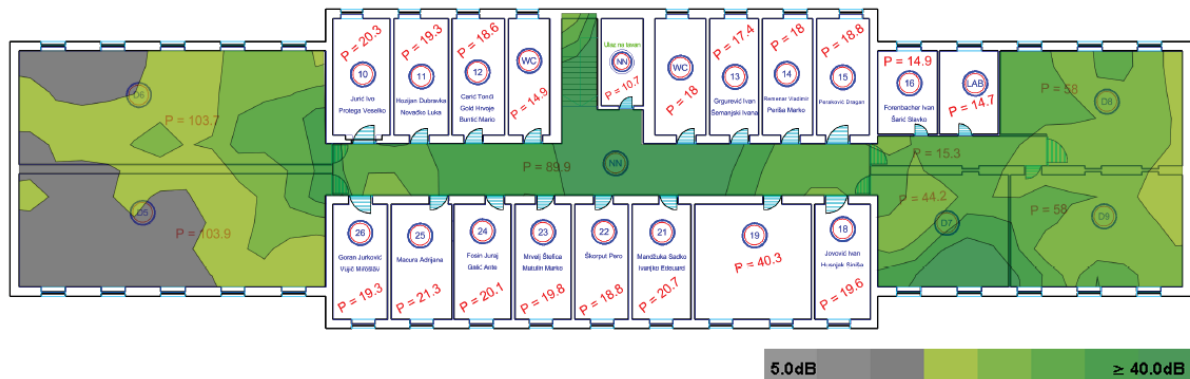
b. Model IEEE 802.11ac



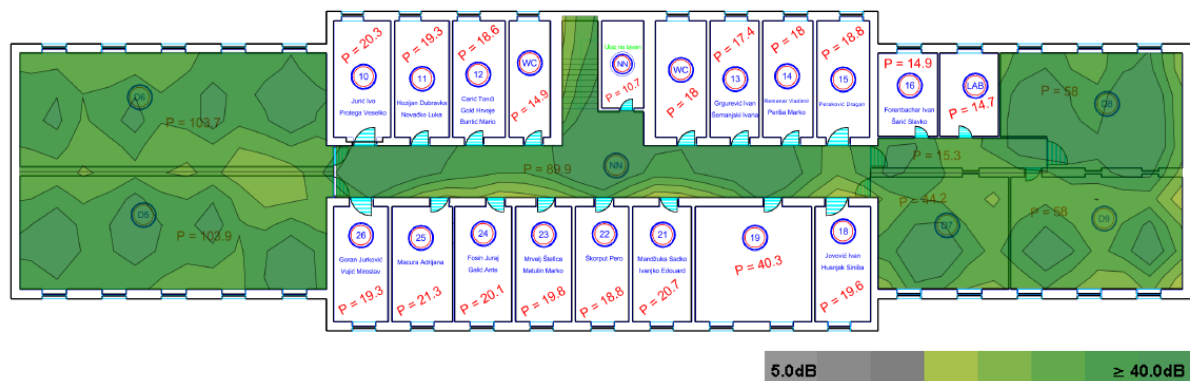
Slika 31 Usporedba preklapanja kanala.

Odnos signala i šuma u trenutnoj situaciji na 14% površine kata poprima vrijednosti ispod 20 dB, dok na 59.6 % površine odnos poprima vrijednosti između 20 i 30 dB. Na modelu IEEE 802.11ac mreže odnos signala i šuma na 46.2% površine ima vrijednosti 40 db ili više (slika 32).

a. Trenutna situacija



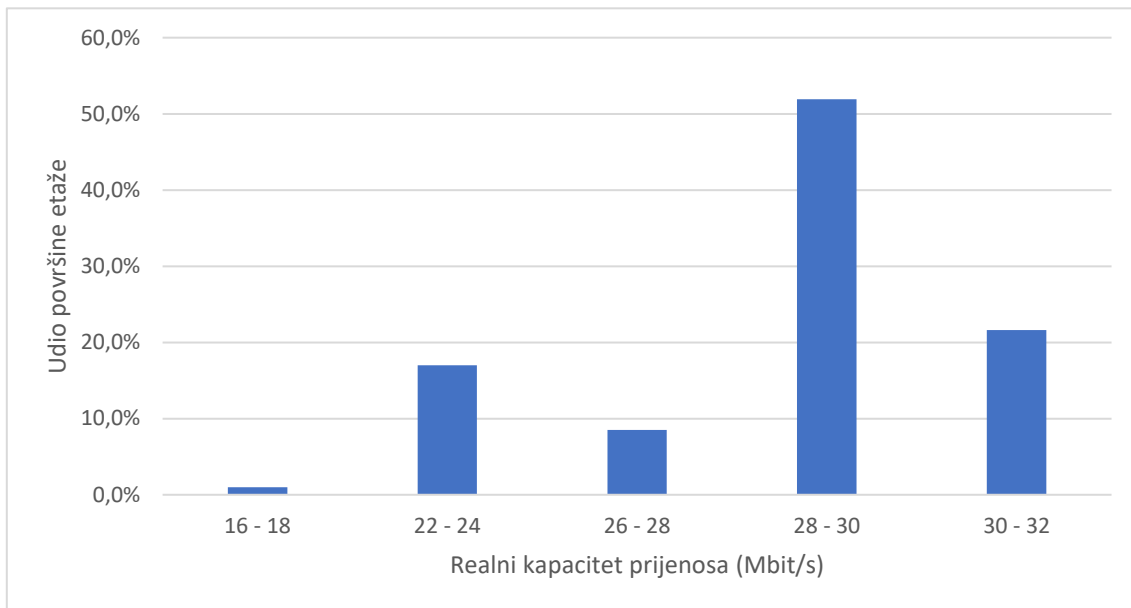
b. Model IEEE 802.11ac



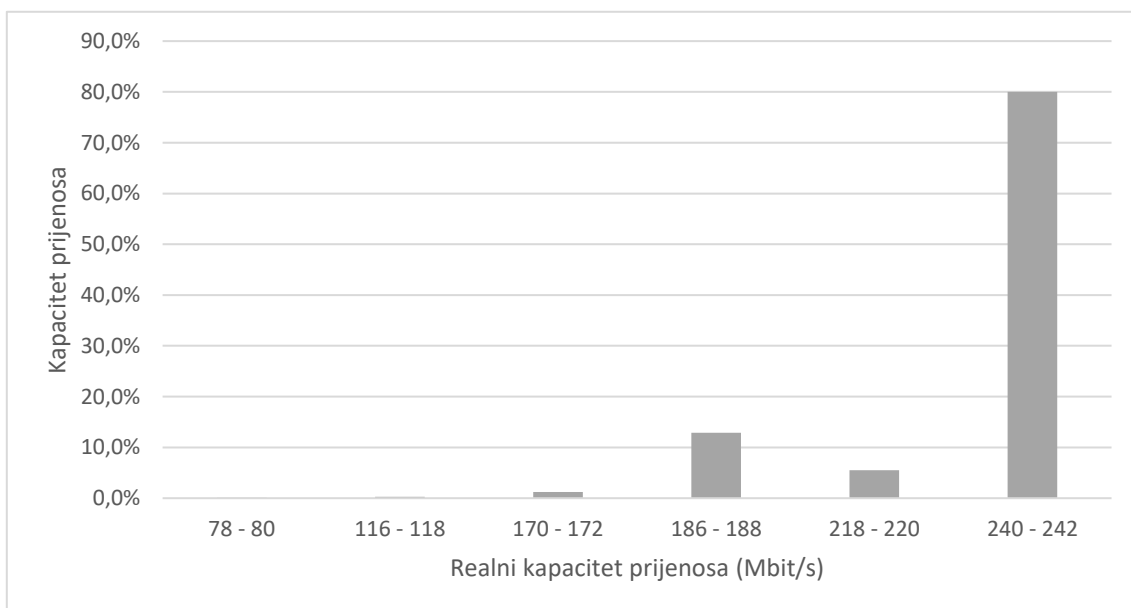
Slika 32 Usporedba odnosa signala i šuma.

Realni kapacitet prijenosa u trenutnoj situaciji na katu postiže najveću vrijednost od 32 Mbit/s, pri čemu se na 51.9% površine nalazi između 28 i 30 Mbit/s. S druge strane, na modelu IEEE 802.11ac postiže najveću vrijednost od 242 Mbit/s, pri čemu je taj realni kapacitet prijenosa prisutan na 80% površine (slika 33).

a. Trenutna situacija



b. Model IEEE 802.11ac



Slika 33 Usporedba realnog kapaciteta prijenosa.

5. Rasprava

5.1. Evaluacija performansi modela 802.11ac mreže

Usporedba performansi simulacijskog modela IEEE 802.11ac sa onima trenutne mreže dobivenih kroz validacijsko mjerenje sugerira značajna poboljšanja korist simulacijskog modela (tablica 22).

Tablica 22 Sumarni prikaz ostvarenih poboljšanja po pokazateljima performansi.

Pokazatelj performansi	Trenutna situacija (IEEE 802.11g/a)	Model IEEE 802.11ac
Iskorištenost zračnog sučelja		✓
Razina snage signala		✓
Preklapanje kanala		✓
Odnos signal-šum		✓
Brzina prijenosa		✓

Značajan pomak vidljiv je kod zahtjeva za kapacitetom prijenosa mreže koji prati nadolazeće trendove koji će se realizirati u narednim godinama (graf 3, vidjeti potpoglavlje 4.1.) [1]. Najveće povećanje je prisutno u prostoru dvorana D7, D8 i D9 od 666.7% dok najmanje u prostoru hodnika od 180%.

Jedan od razloga je značajno poboljšanje iskorištenosti zračnog sučelja simulacijskog modela IEEE 802.11ac mreže koja ne prelazi 50% ukupne površine Objekta 71. Ti rezultati su u skladu sa autorima iz [19] i [16] koji sugeriraju da je to optimalna vrijednost iskorištenosti zračnog sučelja. Nadalje, na prizemlju, gdje je najveći broj očekivanih uređaja (1337 uređaja) zbog predavaonica velikog kapaciteta, iskorištenost zračnog sučelja je bila od 30% do 40% na 54% ukupne površine prizemlja. Na katu, moguće je ostvariti istu iskorištenost zračnog sučelja na 61% ukupne površine kata (slike 19b, 24b i 29b). S druge strane, na istom području, iskorištenost zračnog sučelja trenutne mreže utvrđene validacijskom analizom iznosi 100% na 100% površine Objekta 71 (slike 19a, 24a i 29a), sugerirajući na optimalnost rada napravljenog modela IEEE 802.11ac mreže.

Nadalje, simulacijskim modelom ostvarena je razina snage -60 dBm ili veća na više od 70% ukupne površine Objekta 71, uz uporabu 39 pristupnih točaka (slike 20b, 25b i 30b). Međutim, to nije bio slučaj sa trenutnom mrežom gdje postoje problemi sa nedostatnom razinom snage, ali ne toliko u 2.4 GHz

koliko u 5 GHz pojasu. Primjerice, na 45.7% površine podruma ili u oba promatrana laboratorija, knjižnici i značajnom dijelu PC-učionice gdje je zabilježena razina signala manja od -67 dBm, a na 14% površine podruma oko -80 dBm (slika 20a). Na katu je 56.3% površine prekriveno razinom snage signala od -70 dBm ili manje, pri čemu je 12.4% površine pokriveno signalom koji je prema nekim autorima dovoljan tek za povezivanje na mrežu [20] (slika 30a). Ovi rezultati sugeriraju na mogućnost sub-optimalnog broja pristupnih točaka.

Glede preklapanja kanala, rezultati simulacije pokazali su značajno reduciranje interferencije. Upotrebom isključivo 5 GHz pojasa bilo je moguće skoro u potpunosti eliminirati preklapanje kanala (slike 21b, 26b i 27b). Na katu, na 73.8% površine ne postoji preklapanje uopće, dok se na ostalom prostoru preklapaju dva kanala. Na 53.3% prizemlja nije prisutno preklapanje uopće, dok je u podrumu taj postotak 58.6%. To je konzistentno sa preporukama [16] i [23] o najviše tri preklapajuća kanala. S druge strane, rezultati validacijske analize trenutne mreže o preklapanju većem od osam kanala na 38.6% podruma (slika 21a), 86.2% prizemlja (slika 26a) te preklapanju većem od četiri kanala na 92.3% površine (slika 27a) indikator su značajnih problema u frekvencijskom planu trenutne mreže.

Odnos signal-šum ostvaren simulacijskim modelom je na zadovoljavajućoj razini od 20 dB na cijelom području, pri čemu u podrumu i na katu iznosi 40 dB na više od 39% (slike 22b i 32b), odnosno 46.2% površine na prizemlju (slika 27b). To je konzistentno sa mišljenjima stručnjaka iz *Cisco*-a i *Ekahau Site Survey*-a [16],[25]. S druge strane, validacijska analiza trenutne mreže ukazala je preklapanja područja problematičnog odnosa signal-šum sa onima nedostatne razine snage signala. Prvenstveno, to je slučaj gdje je naglašena interferencija zbog preklapanja istih kanala pristupnih točaka. Posljedično, odnos signal-šum problematičan je u oba frekvencijska pojasa u podrumu, ali i na katu gdje nerijetko iznosi manje od 20dB (slike 22a i 32a) što se smatra neodgovarajućim za *voice* zahtjeve [16], [25]. Jedino je na prizemlju odnos signal-šum trenutne mreže na cijelom prostoru zadovoljavajuće razine, gdje je na 77.6% površine odnos 40 b ili veći (slika 27a).

Simulacijski model pokazao je zadovoljavajući napredak i sa maksimalnom pojedinačnom realnom kapacitet prijenosa na određenoj lokaciji Objekta 71. Najveće vrijednosti variraju od 240 do 242 Mbit/s (slike 23b, 28b i 32b) što omogućava korištenja suvremenih servisa, poput pregledavanja videa visokoj kvaliteti, značajnu kvalitetu iskustva za korisnike – nastavnike i studente. S druge strane, realni kapacitet prijenosa trenutne mreže kreće se između 28 Mbit/s – 32 Mbit/s (slike 23a, 28a i 32a).

Stoga, nakon usporedbe i interpretacije rezultata može se zaključiti da je postavljena hipoteza potvrđena. Simulacijski model IEEE 802.11ac mreže značajno je poboljšao performanse mreže u odnosu na postojeću, podržavajući pritom četverostruko veći broj uređaja i značajno zahtjevnije aplikacije. Razvijeni model prati postojeće, ali i buduće trendove po broju uređaja po korisniku i korištenih aplikacija.

5.2. Razlozi problema u radu postojeće mreže

Razloge nemogućnosti trenutne mreže da zadovolji postavljene zahtjeve treba tražiti u nekoliko smjerova. Uvidom u implementirane pristupne točke i ostvarene rezultate validacijskom analizom, može se zaključiti da je prvotni plan njihovog razmještaja potencijalno neodgovarajući te da se koriste zastarjeli standardi IEEE 802.11a/g koji ne podržavaju MIMO te nude relativno mali kapacitet prijenosa zbog čega nisu u mogućnosti na odgovarajući način nositi se sa današnjim zahtjevima za kapacitetom prijenosa. Tome u prilog govori i prevelika iskorištenost zračnog sučelja iz validacijske analize.

Nadalje, razloge loših performansi mreže treba tražiti u neodgovarajućem modeliranju mreže koje se može poistovjetiti sa nekadašnjom paradigmom kada je bilo bitno osigurati optimalnu pokrivenost signalom. Primarni razlog je korišteni sub-optimalan broj pristupnih točaka na pojedinim etažama a obzirom na kapacitet dvorana i objekta u cjelini. Iako nedostatna pokrivenost signalom nije izražena u tolikoj mjeri, glavna posljedica takvog modeliranja je podkapacitiranost mreže.

Primjerice, na katu, gdje samo područje dvorana D5 i D6 ima kapacitet veći od 200 korisnika, postoji samo jedna pristupna točka koja se nalazi na sredini hodnika sa omogućena dva radio sučelja što dovodi do čitavog niza problema koji degradiraju performanse cjelokupne mreže. Prije svega, preoptimistično je za očekivati da će ta pristupna točka posluživati neki značajan broj klijenata.

Razloge problema nedostatne razine snage, što na nekim područjima također smanjuje QoE, treba tražiti u nedostatnom broju pristupnih točaka. Mala razina snage signala uzrokuje smanjenje brzina prijenosa te samim tim određeni korisnički uređaj zadržava prijenosni medij duže zauzetim, uzrokujući povećanu iskorištenost zračnog sučelja. U najgorem slučaju, kada je iskorištenost zračnog sučelja veće od 70% korisnici nisu u mogućnosti uopće povezati se na mrežu.

U pokušaju rješavanja problema nedostatne razine snage, potrebno je bilo pojačati snagu odašiljanja signala na pristupnim točkama. Međutim, sa pojačanom snagom emitiranja u području velike koncentracije uređaja, posebno kod 2.4 GHz pojasa, pojavljuje se i problem dijeljenja zračnog sučelja između više pristupnih točaka na istim kanalima. To kod IEEE 802.11 standarda implicira povećanje broja uređaja koji se natječu za pristup prijenosnom mediju, budući da će se više ćelija koje rade na istom kanalu pričiniti kao jedna velika ćelija. Povećanjem broja uređaja koji se natječu za pristup mediju povećava se i iskorištenost zračnog sučelja dok će se realni kapacitet prijenosa smanjiti [15],[16].

Glavni razlog pojavi dijeljenja zračnog sučelja između više pristupnih točaka je neodgovarajući frekvencijski plan. Upotrebom 2.4 GHz pojasa primarni izazov je izbjeći preklapanje kanala u područjima velike koncentracije uređaja. Iako je uporaba ovog frekvencijskog pojasa bila neophodna u prošlosti zbog uređaja koji ne podržavaju 5 GHz pojas, danas 96.6%¹⁰ uređaja podržava IEEE

¹⁰ Postotak se odnosi na uređaje dostupne na stranici *gsmarena.com* i na uređaje proizvedene nakon 2012.

802.11n/ac standarde koji koriste 5 GHz pojas te zbog toga upotreba 2.4 GHz pojasa postaje neopravdana. 5 GHz frekvencijski pojas nudi mnogo veći prijenosni pojas, pri čemu osigurava više od 20 nepreklapajućih kanala i veće brzine prijenosa. S druge strane, 2.4 GHz nudi dosta manje brzine prijenosa i samo tri nepreklapajuća kanala.

Također, signal u 2.4 GHz pojasu bolje propagira kroz prepreke, što u područjima velike gustoće može biti problem jer će signal protjecati u druge ćelije. S druge strane, 5 GHz pojas nudi do osam puta veći kapacitet od 2.4 GHz pojasa. Zbog toga mnoge studije preporučuju uporabu samo 5 GHz pojasa pri implementaciji mreže, a pogotovo kod prostora sa visokom koncentracijom uređaja [23], [16].

5.3. Smjernice za unaprjeđenje mreže u okruženju visoke koncentracije uređaja

Nakon pregleda rezultata validacijske analize i analize uzroka loših performansi postojeće mreže u nastavku će biti ponuđene određene generalne smjernice koje se mogu koristiti za modeliranje IEEE 802.11 mreža u prostorima obrazovnih institucija sa visokom koncentracijom uređaja.

Smjernice za unaprjeđenje kvalitete IEEE 802.11 mreže u prostorima sa velikom koncentracijom korisnika:

- Definirati zahtjeve mreže i kapaciteta prijenosa iz razgovora sa odgovarajućim *stakeholderima*.
- Planirati za veći kapacitet nego što je potrebno u tom trenutku.
- Utvrđivanje područja velike koncentracije gdje je potrebno osigurati pokrivenost signalom te da zahtjevi mreže i kapaciteta budu zadovoljeni.
- Onemogućavanje 2.4 GHz radio sučelja gdje god je moguće.
- U područjima veće koncentracije uređaja koristiti manji širinu kanala.
- Radio sučelja na istom kanalu postaviti što dalje moguće.
- Postaviti veći broj pristupnih točaka sa manjom snagom odašiljanja.
- Upotreba antena odgovarajućeg usmjerenja.
- Koristiti veću minimalnu brzinu prijenosa te onemogućiti pristup korisnicima koji koriste zastarjele standarde.
- Koristiti što manje SSID-ova.

6. Zaključak

Standard IEEE 802.11 jedna je od najuspješnijih bežični tehnologija današnjice. Iako je u početku namijenjen za posluživanje nekolicine uređaja, zbog čega je implementacija IEEE 802.11 mreže bila orijentirana na ostvarivanje optimalne razine snage signala. Zadnjih godina paradigma planiranja mreže je promijenjena usred eksponencijalnog porasta IEEE 802.11 uređaja i pojave sve zahtjevnijih aplikacija, pri čemu je osiguravanje odgovarajućeg kapaciteta podjednako bitno.

Osiguranje zadovoljavajućeg kapaciteta prijenosa predstavlja popriličan izazov, dobar primjer za prikaz problematike je visoko obrazovne ustanove, gdje je zbog heterogenog okruženja, dvorana sa velikom koncentracijom uređaja te zbog različitih zahtjeva za prijesnim brzinama. Kao studija slučaja je upotrijebljen Objekt 71 Fakulteta prometnih znanosti, čija mreža zbog već zastarjele opreme i neodgovarajućeg planiranja nije osiguravala performanse neophodne za praćenje modernih trendova. Postavljena je pretpostavka da je uz primjenu IEEE 802.11ac standarda i uz pažljivo planiranje moguće značajno povećati performanse trenutne mreže fakulteta. Hipoteza je zatim potvrđena izradom simulacijskog modela IEEE 802.11ac mreže za Objekt 71, gdje je izrađeni model mreže u mogućnosti odgovoriti na stroge zahtjeve kapaciteta narednih nekoliko godina.

Svrha ovog istraživanja je da pomogne u povećanju kvalitete iskustva korištenja IEEE 802.11 mreža u visokom obrazovanju te savladavanje izazova koje nameću novi trendovi kao što su pojava više od jednog uređaja po korisniku, zahtjevnije aplikacije, B.Y.O.D., Wi-Fi *offloading* te implementacije informacijsko komunikacijskog sustava u visoko obrazovne ustanove.

Bitno je nadodati da razvijeni simulacijski model treba dodatno testirati kako bi u potpunosti bio spreman za implementaciju u realnom okruženju. Trenutni rezultati ovise o definiranim zahtjevima te je potrebno izvršiti dodatna testiranja različitih scenarija kako bi se dobio dodatan uvid o ponašanju modela IEEE 802.11ac mreže u različitim uvjetima.

ZAHVALE

Želim se zahvaliti svom mentoru dr. sc. Ivanu Forenbacheru prije svega na ukazanom povjerenju i na pruženoj prilici za pisanje ovog rada. Također, želim se zahvaliti na pomoći, brojnim savjetima, motivacijskim razgovorima te na velikom strpljenju. Posebno sam zahvalan na prepoznavanju mojih interesa i za uvođenje u zanimljivo područje modeliranja IEEE 802.11 mreža te na cjelokupnom prenesenom znanju za vrijeme izrade ovog rada.

Hvala Zavodu za informacijsko-komunikacijski promet na ustupljenom laboratoriju za izradu ovog rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci i razumijevanju.

POPIS LITERATURE

- [1] Cisco. Cisco Visual Networking Index (VNI): Forecast and Methodology. 2019. Preuzeto sa: http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_r_c11-481360.pdf.
- [2] Husnjak S, Peraković D, Forenbacher I. Data Traffic Offload from Mobile to Wi-Fi Networks: Behavioural Patterns of Smartphone Users. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2018; 2018(4): 1–13.
- [3] Bosch P, Wyffels J, Braem B, Latré S. How is your event Wi-Fi doing? Performance measurements of large-scale and dense IEEE 802.11n/ac networks. U: *Proceedings of the IM 2017 - 2017 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network and Service Management*; 2017 Svibanj 8–12; Lisabon, Portugal. 2017. 701–7.
- [4] CISCO. 802.11ac : The Fifth Generation of Wi-Fi. Cisco Public Information. 2014.
- [5] Capdehourat G, Álvarez G, Álvarez M, Porteiro P, Bagalciague F. Ad Hoc Networks High density emulation platform for Wi-Fi performance testing. *Ad Hoc Networks*. 2018; 70(3): 1–13.
- [6] Pyattaev A, Johnsson K, Andreev S, Koucheryavy Y. Communication challenges in high-density deployments of wearable wireless devices. *IEEE Wireless Communications*. 2015; 22(1): 12–18.
- [7] Yang SC, Winter P. LTE-Advanced and IEEE 802.11ac: A new network architecture and opportunity for higher-education institutions. *International Journal of Information and Learning Technology*. 2015; 32(4): 221–34.
- [8] Peterlicean A. B.Y.O.T. in the Romanian Higher Education Background. *Procedia Technology*. 2014; 12: 643–5.
- [9] Attewell J. BYOD Bring Your Own Device A guide for school leaders. European Schoolnet. 2015.
- [10] European Commission. 2 nd Survey of Schools : ICT in Education Croatia Country Report. 2018.
- [11] European Commission. 2 nd Survey of Schools : ICT in Education Norway Country Report. 2018.

- [12] Ministarstvo uprave. Strategija e-Hrvatska 2020. 2017. Preuzeto sa: <https://uprava.gov.hr/istaknute-teme/strategija-e-hrvatska-2020/14630>.
- [13] Jesús T De, Sanguino M. Optimal Modeling of Wireless LANs: A Decision-Making Multiobjective Approach. Complexity. 2018; 2018: 1–15.
- [14] Lepaja S, Maraj A, Berzati S. WLAN Planning and Performance Evaluation for Commercial Applications. U: Data-Centric Business and Applications. 2018; 20: 53–69.
- [15] Murty R, Padhye J, Chandra R, Wolman A, Zill B. Designing High Performance Enterprise Wi-Fi Networks. U: NSDI'08 Proceedings of the 5th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation; 2008 Travanj 16-18; San Francisco, SAD. 2008. 73-88.
- [16] Cisco. Enterprise Mobility 8.1 Design Guide. 2017. Preuzeto sa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.352.7885&rep=rep1&type=pdf>.
- [17] Amewuda AB, Katsriku FA, Abdulai J-D. Implementation and Evaluation of WLAN 802.11ac for Residential Networks in NS-3. Journal of Computer Networks and Communications. 2018; 2018(4): 1–10.
- [18] Jönsson A, Åkerman D, Fitzgerald E, Nyberg C, Priyanto BE, Agardh K. Modeling, implementation and evaluation of IEEE 802.11ac in NS-3 for enterprise networks. U 2016 IFIP Wireless Days; 2016 Ožujak 23-25; Toulouse, Francuska. 2016. 1–6.
- [19] Ekahau Site Survey. Airtime Utilization in ESS. 2017. Preuzeto sa: <https://support.ekahau.com/hc/en-us/articles/115002437233-Airtime-Utilization-in-ESS>.
- [20] Metageek. Understanding WiFi Signal Strength. 2019. Preuzeto sa: <https://www.metageek.com/training/resources/wifi-signal-strength-basics.html>.
- [21] Hamidović H. Bežične lokalne računalne mreže. Zagreb: Info Press; 2009.
- [22] Croak P, Kim Y. Site Survey Guidelines for WLAN Deployment. 2013.
- [23] Andrew Campbell. Ekahau Site Survey Heatmap Visualizations – Part 7: Channel Overlap. 2015. Preuzeto sa: <https://www.ekahau.com/blog/2015/07/10/ekahau-site-survey-heatmap-visualizations-part-7-channel-overlap/>.
- [24] Rivai E. Did You Know Non-802.11 Devices Can Interfere With Your Wi-Fi?. 2017. Preuzeto sa: <https://blog.aerohive.com/did-you-know-non-802-11-devices-can-interfere-with-your-wi-fi/>.

- [25] Andrew Campbell. Ekahau Site Survey Heatmap Visualizations – Part 5: Signal To Noise Ratio (SNR). 2015. Preuzeto sa: <https://www.ekahau.com/blog/2015/04/17/ekahau-site-survey-heatmap-visualizations-part-5-signal-to-noise-ratio-snr/>.
- [26] Cisco Meraki. High Density Wi-Fi Deployments. 2018. Preuzeto sa: https://documentation.meraki.com/Architectures_and_Best_Practices/Cisco_Meraki_Best_Practice_Design/Best_Practice_Design_-_MR_Wireless/High_Density_Wi-Fi_Deployments.
- [27] Andrew Campbell. Ekahau Site Survey Heatmap Visualizations – Part 6: Data Rate. 2015. Preuzeto sa: <https://www.ekahau.com/blog/2015/06/22/ekahau-site-survey-heatmap-visualizations-part-6-data-rate/>.
- [28] Cisco. Cisco Aironet 1130AG IEEE 802.11 A/B/G Access Point. 2014. Preuzeto sa: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1130-ag-series/product_data_sheet0900aecd801b9058.html.
- [29] Crane J, Harkins B, Kiviniemi J, Olla J, Harkins C, Wiley J. Wi-Fi Network Design, Ekahau Special Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2018.
- [30] Ozer Dondurmacioglu. The Impact of Multiple SSIDs on Wi-Fi Performance. 2012. Preuzeto sa: <https://community.arubanetworks.com/t5/Community-Tribal-Knowledge-Base/The-Impact-of-Multiple-SSIDs-on-Wi-Fi-Performance/ta-p/25374>.
- [31] Robrostation. Setting minimum data rate? Read this first. 2016. Preuzeto sa: <https://robrobstation.com/2016/06/22/setting-minimum-data-rates-read-this-first/>.
- [32] Nbn. How much data does music streaming use? (2018 edition). 2018. Preuzeto sa: <https://www.nbnco.com.au/blog/entertainment/how-much-data-does-music-streaming-use>.
- [33] Netflix. Internet Connection Speed Recommendations. 2019. Preuzeto sa: <https://help.netflix.com/en/node/306>.
- [34] Facebook. What are the video format guidelines for live streaming on Facebook?. 2019. Preuzeto sa: https://www.facebook.com/help/1534561009906955?helpref=faq_content.
- [35] Skype. How much bandwidth does Skype need?. 2019. Preuzeto sa: <https://support.skype.com/en/faq/fa1417/how-much-bandwidth-does-skype-need>.
- [36] Omar M, Ahmad M, Yasin A, Ibrahim H, Ghazali O, Khamis S. WiFi usage and student performance: Examining the interrelations for UUM students. U: Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Science and Technology (ICAST '18); 2018 Travanj 10-12: Penang, Malazija. 2018. 1-6.

- [37] Matt B. The 5 Best-Selling Wireless Access Point Brands Of Q3 2017. 2017. Preuzeto sa: <https://www.crn.com/slide-shows/networking/300095366/the-5-best-selling-wireless-access-point-brands-of-q3-2017.htm>.

- [38] Cisco. Cisco Aironet 3800 Series Access Points Data Sheet. 2019. Preuzeto sa: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3800-series-access-points/data_sheet-c78-736498.html.

SAŽETAK

Modeliranje mreže IEEE 802.11ac za prostore visoke koncentracije uređaja u institucijama visokog obrazovanja

Ivan Šimunić

Visoko obrazovne institucije koje provode digitalnu reformu trebale bi osigurati brz bežični Internet koji je dostupan svugdje. IEEE 802.11a/b/g/n mreže u takvim institucijama tek trebaju osjetiti posljedice trenda povećanja minimalnih zahtijeva kapaciteta prijenosa po uređaju, nerijetko većeg od 1 Mbit/s, pri koncentraciji do četiri uređaja po metru četvornom auditorija sa preko 100 sjedećih mjesta. Razloga je nekoliko, poput sub-optimalnog modeliranja mreže isključivo temeljem pokrivenosti signalom uz zanemarivanje kapaciteta prijenosa kao i nedovoljno razumijevanje performansi i izazova potencijalnih alternativa za takva područja, poput IEEE 802.11ac standarda. Kao inicijalni korak u njihovom eliminiranju, autor je izradio simulacijski model IEEE 802.11ac mreže temeljen na kapacitetu prijenosa primjenom *Ekahau Site Survey* alata. Kao eksperimentalno okruženje korištena je bivša vojna zgrada, današnji Objekt 71 Fakulteta prometnih znanosti na ZUK Borongaj sa ukupno 13 auditorija, znanstveno-istraživačkih laboratorija ili pak drugih prostorija, koje zajedno imaju kapacitet od 649 sjedećih mjesta. Potom je evaluirao njegove performanse u odnosu na one dobivene validacijskim mjerenjem kvalitete postojeće IEEE 802.11a/g mreže Fakulteta. Predloženi model ostvario je značajna poboljšanja, poput manje saturacije zračnog sučelja, veće snage signala, manjeg preklapanja kanala, većeg odnosa signal-šum i većeg kapaciteta prijenosa. Rezultati ukazuju na to da bi obrazovne institucije, ako se žele pravovremeno pripremiti za nadolazeće trendove, trebale razmotriti implementaciju IEEE 802.11ac standarda i planirati mrežu za veći kapacitet od potrebnog umjesto fokusiranja isključivo na pokrivenost signalom. Rezultati mogu poslužiti obrazovnim institucijama u anticipaciji izazova modeliranja IEEE 802.11ac mreže prije njezine fizičke implementacije, ali i u provedbi zadanih ciljeva Strategije e-Hrvatska 2020 u području znanosti i obrazovanja.

KLJUČNE RIJEČI: IEEE 802.11ac; Visoka koncentracija uređaja; Simulacijski model; Planiranje kapaciteta prijenosa; Visoko obrazovanje.

SUMMARY

Modeling of IEEE 802.11ac Network for High-density Client Environments in Higher Education Institutions

Ivan Šimunić

Higher education institutions that implement digital reform should provide high speed wireless Internet that is available everywhere. IEEE 802.11a/b/g/n networks in these institutions have yet to experience the effects of minimum required transmission capacity per device often amounting over 1 Mbps in a single auditorium with over 100 seats and density up to four devices per square metre. This is because of sub-optimal network modelling based only on a signal coverage instead of transmission capacity, and lack of understanding about performance and challenges of potential alternatives, such as IEEE 802.11ac standard. To help reduce this gap, an author developed simulation model of the IEEE 802.11ac network based on a transmission capacity by using *Ekahau Site Survey* tool. As an experimental environment the author used the former military facility, today's Building 71 of Faculty of Transport and Traffic Sciences at ZUK Borongaj with a total of 13 auditoriums, research laboratories and other areas having 649 seats. He then evaluated the model's performance in relation to that obtained from validation survey of existing IEEE 802.11a/b/g/n network. The proposed model performed significantly better with less saturated airtime, stronger signal strength, lesser channel overlapping, higher signal-to-noise ratio, and increased transmission capacity. Results suggest that in order to timely respond to upcoming trends, educational institutions should consider IEEE 802.11ac standard and plan the network for higher overall capacity than required instead of focusing solely on signal coverage. Results may help educational institutions in anticipating challenges in pre-deployment modelling of IEEE 802.11ac networks as well as to inform implementation of e-Croatia 2020 Strategy in the field of science and education.

KEYWORDS: IEEE 802.11ac; High-density network; Simulation model; Capacity planning; Higher education.