

Primerjalna analiza omrežij Wi-Fi 6 in Wi-Fi 7 Mesh na podlagi meritev hitrosti prenosa v realnem omrežju operaterja

Tomi Mlinar¹, Gorazd Penko², Boštjan Batagelj¹

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

² T-2, Verovškova ulica 64, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: tomi.mlinar@fe.uni-lj.si

Povzetek. Članek obravnava primerjalno analizo delovanja brezžičnih lokalnih omrežij Wi-Fi 6 in Wi-Fi 7 Mesh v realnem okolju operaterja. Osrednji del raziskave temelji na meritvah hitrosti prenosa podatkov v objektu, kjer sta neposredno primerjani rešitvi Wi-Fi 6 Mesh in Wi-Fi 7 z večpovezavnim delovanjem (angl. Multi-Link Operation – MLO). Meritve so bile izvedene v tipičnem rezidenčnem okolju in zajemajo hitrosti prenosa v smeri proti uporabniku (angl. downlink – DL) in od uporabnika (angl. uplink – UL). Poleg notranjih meritev so predstavljeni tudi rezultati zunanjih meritev, izvedenih izključno za tehnologijo Wi-Fi 7. Te meritve omogočajo analizo regulativnih omejitev na dosegljive hitrosti prenosa ter primerjavo delovanja sistema v skladu z evropskimi in ameriškimi regulativnimi zahtevami. Tak pristop omogoča vpogled v zmogljivost Wi-Fi 7 v optimalnejših radijskih pogojih, brez neposredne primerjave s prejšnjo generacijo tehnologije. Rezultati kažejo, da Wi-Fi 7 v notranjem okolju Mesh dosega višje hitrosti prenosa in manjše zmanjšanje zmogljivosti pri povezavah prek več vozlišč v primerjavi z Wi-Fi 6. Zunanje meritve dodatno potrjujejo visok potencial tehnologije Wi-Fi 7, hkrati pa poudarjajo pomemben vpliv regulativnega okvira na dejansko dosegljive hitrosti prenosa.

Ključne besede: Wi-Fi 6, Wi-Fi 7, Mesh-omrežja, hitrost prenosa, MLO, realne meritve, ETSI, FCC

Comparative Analysis of Wi-Fi 6 and Wi-Fi 7 Mesh Networks Based on Throughput Measurements in a Real Operator Network

Keywords: Wi-Fi 6, Wi-Fi 7, Mesh networks, throughput, MLO, real-world measurements, ETSI, FCC

This paper presents a comparative analysis of the performance of Wi-Fi 6 and Wi-Fi 7 Mesh wireless local area networks in a real operator environment. The core of the research is based on indoor throughput measurements, where Wi-Fi 6 Mesh and Wi-Fi 7 with multi-link operation (MLO) are directly compared. Measurements were conducted in a typical residential environment and include both downlink (DL) and uplink (UL) transmission rates.

In addition to the indoor measurements, the paper also presents outdoor measurement results performed exclusively for Wi-Fi 7. These measurements provide insight into the impact of distance and regulatory constraints on achievable throughput and enable a comparison of system performance under European and United States regulatory frameworks. This approach allows an evaluation of Wi-Fi 7 performance in more favorable radio conditions without a direct comparison to previous-generation technology.

The results indicate that Wi-Fi 7 achieves higher throughput and exhibits a smaller performance degradation across multiple Mesh hops compared to Wi-Fi 6 in indoor environments. The outdoor measurements further demonstrate the high potential of Wi-Fi 7 technology, while highlighting the significant influence of regulatory limitations on achievable data rates.

1 UVOD

Brezžična lokalna omrežja so ključni del dostopnih omrežij v sodobnih rezidenčnih in manjših poslovnih okoljih. Naraščajoče število povezanih naprav, vse večja raba storitev z visokimi zahtevami po pasovni širini ter razmah aplikacij, pri katerih je ključna čim manjša zakasnitev, pred brezžične tehnologije postavljajo vse strožje zahteve [1–5]. V tem kontekstu igrajo standardi družine IEEE 802.11 osrednjo vlogo pri zagotavljanju ustrezne zmogljivosti in uporabniške izkušnje v realnih okoljih.

Standard IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) [6] je bil razvit z namenom izboljšanja učinkovitosti delovanja v okoljih z večjim številom sočasnih uporabnikov, pri čemer je poseben poudarek na boljši rabi razpoložljivega radijskega spektra. V zadnjem obdobju pa je v fazi uvajanja že naslednja generacija brezžičnih tehnologij, standard IEEE 802.11be [7], znan kot Wi-Fi 7. Ta prinaša nadaljnje povečanje potencialnih hitrosti prenosa podatkov, podpora širšim kanalom ter nove mehanizme, kot je večpovezavno delovanje (angl. *Multi-Link Operation – MLO*), ki omogočajo hkratno uporabo več brezžičnih povezav.

Prejet: 4. junij, 2026

Odoben: 30. junij, 2026



Avtorske pravice: © 2026
Creative Commons Attribution 4.0
International License

V praksi operaterji in uporabniki za razširjanje brezžične pokritosti vse pogosteje uporabljajo arhitekture Mesh, kjer več dostopnih točk sodeluje kot enotno omrežje. Takšen pristop omogoča večjo fleksibilnost postavitve in lažjo razširljivost omrežja, hkrati pa odpira nova vprašanja glede dejanske zmogljivosti in učinkovitosti različnih standardov v realnih pogojih uporabe. Zlasti pri uvajanju Wi-Fi 7 se pojavlja zahteva po meritvah, ki presegajo laboratorijske teste in temeljijo na dejanskih okoljih operaterjev.

Namen tega članka je analizirati delovanje tehnologij Wi-Fi 6 in Wi-Fi 7 v izvedbi Mesh na podlagi meritev hitrosti prenosa podatkov v realnem omrežju operaterja. Osrednji poudarek je na notranjih meritvah, kjer je izvedena neposredna primerjava med Wi-Fi 6 Mesh in Wi-Fi 7 MLO. Poleg tega so predstavljene tudi zunanje meritve, izvedene izključno za tehnologijo Wi-Fi 7, ki omogočajo vpogled v dosegljive hitrosti prenosa v optimalnejših radijskih pogojih ter v vpliv regulativnih omejitev na delovanje sistema.

Prispevek članka je v tem, da temelji na realnih meritvah v operaterskem okolju [8] ter ponuja praktičen vpogled v dejansko zmogljivost sodobnih brezžičnih omrežij Mesh. Rezultati so relevantni tako za operaterje kot za raziskovalce, saj omogočajo boljše razumevanje prednosti in omejitev posameznih tehnologij v kontekstu njihovega uvajanja v prakso.

2 PREGLED TEHNOLOGIJ WI-FI 6 IN WI-FI 7 V ARHITEKTURI MESH

Standardi družine IEEE 802.11 se v zadnjih letih razvijajo predvsem v smeri povečevanja učinkovite prepustnosti brezžičnih omrežij ter izboljšanja delovanja v okoljih z večjim številom naprav in prometnih tokov. Posebno v rezidenčnih omrežjih, kjer se brezžična povezava pogosto uporablja tudi kot hrbtenična povezava med dostopnimi točkami, imajo arhitekturne in protokolne izboljšave pomemben vpliv na dejanske hitrosti prenosa podatkov.

2.1 Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) v omrežjih Mesh

Standard Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) je bil razvit z namenom izboljšanja učinkovite rabe radijskega spektra in podpore večjemu številu sočasnih uporabnikov [6].

Ta standard je prinesel več izboljšav, namenjenih boljši rabi razpoložljivega radijskega spektra in učinkovitejšemu sodostopu. Med ključnimi mehanizmi so razdelitev kanala na manjše frekvenčne vire, ki ga imenujemo ortogonalni frekvenčno deljeni sodostop (angl. *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access – OFDMA*), ter izboljšana podpora večuporabniškemu sistemu z več vhodi in več izhodi (angl. *Multi-User Multiple Input Multiple Output – MU-MIMO*). V omrežjih Mesh ti mehanizmi omogočajo boljšo porazdelitev razpoložljive pasovne širine med odjemalce, zlasti v primerih večje obremenitve.

Kljub tem izboljšavam je delovanje omrežij Wi-Fi 6 Mesh še vedno omejeno z dejstvom, da po večini uporabljajo enoten brezžični vmesnik oziroma frekvenčni pas tako za dostop odjemalcev kot za hrbtenične povezave med Mesh-vozlišči. Pri povezavah prek več zaporednih vozlišč to vodi do postopnega zmanjševanja dosegljive hitrosti prenosa, saj se isti radijski viri uporabljajo za več prometnih tokov.

2.2 Novosti standarda Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be)

Standard Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) uvaja večpovezavno delovanje (MLO), ki omogoča sočasni prenos podatkov preko več brezžičnih povezav, kar je zlasti pomembno za arhitekture Mesh [6], [9–11].

Ta standard nadaljuje razvoj v smeri višjih hitrosti prenosa podatkov in večje fleksibilnosti pri prenosu prometa. Ena ključnih novosti je podpora širšim komunikacijskim kanalom, kar v primernih razmerah omogoča bistveno povečanje bruto in neto hitrosti prenosa. Posebno pomembna inovacija za arhitekture Mesh pa je uvedba MLO. Ta omogoča sočasno uporabo več logičnih povezav med istima napravama, tudi preko različnih frekvenčnih pasov. V kontekstu omrežij Mesh to pomeni, da se promet lahko porazdeli med več brezžičnih povezav, kar zmanjšuje zasičenost posamezne povezave in omogoča učinkovitejšo rabo razpoložljivih virov. Posledično se lahko izboljša skupna dosežena prenosna hitrost, zlasti v scenarijih, kjer promet poteka prek več Mesh-vozlišč.

2.3 Primerjava Wi-Fi 6 Mesh in Wi-Fi 7 MLO z vidika prenosne hitrosti

Z vidika dejanskih hitrosti prenosa podatkov se glavna razlika med tehnologijama Wi-Fi 6 in Wi-Fi 7 v izvedbi Mesh kaže v načinu obravnave hrbteničnega prometa. Medtem ko Wi-Fi 6 zaznamuje zaporedno deljenje istih radijskih virov med več povezav, Wi-Fi 7 z uporabo MLO omogoča vzporedni prenos podatkov preko več povezav. To je še zlasti pomembno v tipičnih rezidenčnih postavitvah Mesh, kjer so dostopne točke nameščene tako, da promet pogosto prehaja prek enega ali več vmesnih vozlišč.

Tako omogoča Wi-Fi 7 višje učinkovite hitrosti prenosa podatkov in manjše zmanjšanje zmogljivosti ob naraščajočem številu hopov v omrežju Mesh. Vendar pa je dejanski učinek teh mehanizmov močno odvisen od realnih pogojev delovanja, kar potrjuje zahtevo po meritvah v dejanskem operaterskem okolju.

2.4 Pomen realnih meritev v operaterskem okolju

Večina obstoječih analiz delovanja standardov Wi-Fi 6 in Wi-Fi 7 temelji na laboratorijskih testih ali simulacijah, ki pogosto ne zajamejo kompleksnosti realnih rezidenčnih okolij. Dejavniki, kot so postavitve naprav, sočasna obremenitev omrežja in omejitve regulativnega okvira, lahko pomembno vplivajo na dosegljive hitrosti prenosa. Zato je v nadaljevanju članka poudarek na meritvah, izvedenih v realnem omrežju operaterja, ki

omogočajo objektivno oceno dejanskega delovanja obravnavanih tehnologij v arhitekturi Mesh.

3 METODOLOGIJA IN TESTNO OKOLJE

Merilni del raziskave je bil zasnovan z namenom objektivne analize delovanja brezžičnih omrežij Mesh na osnovi tehnologij Wi-Fi 6 in Wi-Fi 7 v realnem operaterskem okolju. Metodologija temelji na meritvah hitrosti prenosa podatkov ter vključuje notranje in zunanje merilne scenarije, ki so bili zaradi različnega namena in obsega meritev obravnavani ločeno.

3.1 Razmejitev merilnih scenarijev

Meritve so bile razdeljene v dva ločena sklopa:

- notranje meritve, namenjene neposredni primerjavi tehnologij Wi-Fi 6 Mesh in Wi-Fi 7 MLO,
- zunanje meritve, izvedene izključno za tehnologijo Wi-Fi 7, z namenom analize vpliva razdalje in regulativnih omejitev na dosegljive hitrosti prenosa podatkov.

Takšna razmejitev je bila izbrana, da se zagotovi metodološka korektnost primerjav ter prepreči interpretacija rezultatov zunanjih meritev kot primerjava med različnimi tehnološkimi generacijami.

3.2 Notranje merilno okolje

Notranje meritve so bile izvedene v tipičnem rezidenčnem objektu, ki po velikosti, razporeditvi prostorov in gradbenih materialih predstavlja značilno okolje uporabnikov dostopnih storitev operaterja. Omrežje Mesh je sestavljalo osrednje vozlišče, povezano v optično dostopovno omrežje, ter več razširitvenih Mesh-vozlišč, nameščenih na vnaprej določenih lokacijah znotraj objekta.

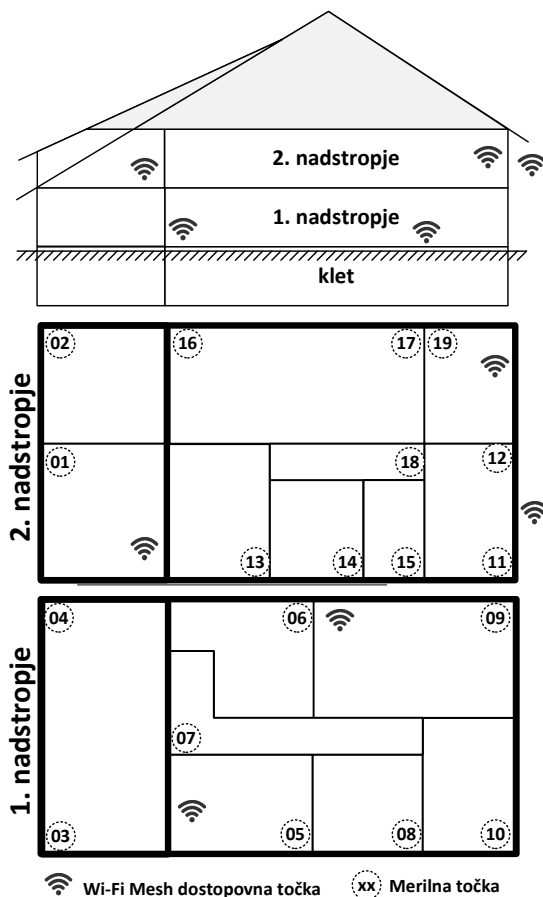
Merilno okolje in izbrana topologija sta skladna s tipičnimi operaterskimi postavitvami omrežij FTTH/XGS-PON z integriranimi dostopnimi točkami Wi-Fi [12], [13].

Merilne točke so bile razporejene v različnih prostorih in na različnih oddaljenostih od osnovnega vozlišča, tako da sta bila zajeta naslednja načina povezav:

- neposredna povezava na osnovno vozlišče,
- povezava prek enega ali več vmesnih Mesh-vozlišč.

Notranje meritve so bile opravljene z opremo TP-Link Deco BE85 (Wi-Fi 7 MLO) [14] in Kontron INNBOX M92 (Wi-Fi 6) [12], ki predstavljata različni nivo kakovosti opreme. Rezultati zato vključujejo tudi vpliv implementacijskih razlik med napravami.

Razporeditev vozlišč Mesh in notranjih merilnih točk v rezidenčnem objektu je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Notranje meritve Wi-Fi 6 Mesh in Wi-Fi 7 MLO – razporeditev vozlišč Mesh in merilnih točk.

3.3 Zunanje merilno okolje

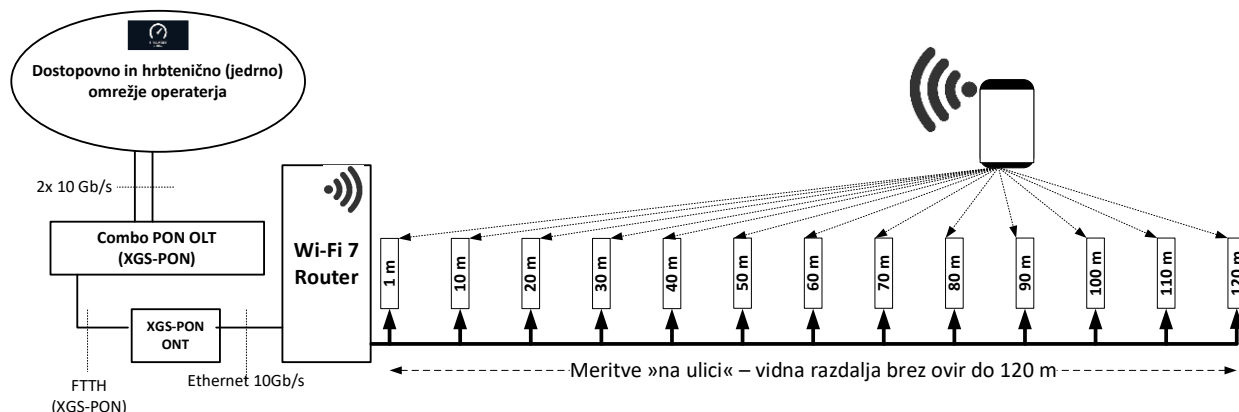
Zunanje meritve so bile izvedene na ulici v rezidenčnem naselju z namenom ocene zmogljivosti sistema Wi-Fi 7 v manj omejenih radijskih pogojih. Merilne točke so bile razporejene vzdolž ulice na različnih razdaljah od oddajnika, pri čemer so prevladovali pogoji neposredne radijske vidljivosti. Razporeditev merilnih točk za zunanje meritve Wi-Fi 7 je prikazana na sliki 2.

Vsaka meritev je bila izvedena s petimi modeli mobilnih terminalov (iPhone 16 Pro Max, Google Pixel 9 Pro XL, Xiaomi 14 Ultra, Xiaomi 13T Pro), pri čemer v rezultatih podajamo povprečno vrednost.

Merilni scenarij v pasu 6 GHz je bil analiziran ob upoštevanju regulativnih omejitev za nelicencirano rabo spektra v Evropi [15] in ZDA [16].

Pri zunanjih meritvah ni bila izvedena primerjava s tehnologijo Wi-Fi 6. Meritve so bile omejene na sistem Wi-Fi 7 in so omogočale analizo vpliva:

- razdalje na dosegljive hitrosti prenosa,
- regulativnih omejitev, pri čemer so bile primerjane vrednosti, skladne z evropskimi (ETSI) in ameriški (FCC) regulativnimi zahtevami.



Slika 2: Zunanje meritve Wi-Fi 7 – razporeditev merilnih točk na ulici

3.4 Merjene veličine in merilni postopek

V okviru obeh merilnih scenarijev so bile merjene izključno hitrosti prenosa podatkov, in sicer:

- hitrost proti uporabniku (angl. *downlink* – DL),
- hitrost od uporabnika (angl. *uplink* – UL),

Hitrosti prenosa podatkov so bile merjene skladno s splošnimi priporočili za merjenje uporabniško zaznane prepustnosti v IP-omrežjih [17].

Radijske veličine, kot so indikator moči sprejetega signala (angl. *Received Signal Strength Indicator* – RSSI), razmerje signal–šum (angl. *Signal-to-Noise Ratio* – SNR) ali zakasnitev, niso bile predmet analize in niso vključene v poročane rezultate. Meritve so bile izvedene z enotnim merilnim postopkom, pri katerem so bile posamezne meritve ponovljene večkrat, rezultati pa so bili obdelani tako, da se zmanjša vpliv kratkotrajnih nihanj brezžičnega okolja.

3.5 Primerljivost in omejitve metodologije

Pri notranjih meritvah so bili pogoji postavitve, število vozlišč Mesh in merilne lokacije enaki za obe tehnologiji, kar omogoča neposredno primerjavo doseženih prenosnih hitrosti. Pri zunanjih meritvah primerjava med tehnologijama ni bila opravljena, zato so ti rezultati obravnavani ločeno in interpretirani kot analiza zmogljivosti Wi-Fi 7 v realnem okolju.

Takšna metodologija omogoča jasno ločevanje primerjalnih in neprimerjalnih rezultatov ter zagotavlja podporo nadaljnji analizi in razpravi, predstavljeni v naslednjem poglavju.

4 REZULTATI MERITEV IN ANALIZA

V tem poglavju so predstavljeni rezultati meritev hitrosti prenosa podatkov za brezžična omrežja Mesh, analizirani ločeno za notranje in zunanje merilne scenarije. Takšna razdelitev odraža metodološki pristop, opisan v prejšnjem poglavju, ter omogoča jasno razlikovanje med primerjalnimi in neprimerjalnimi rezultati.

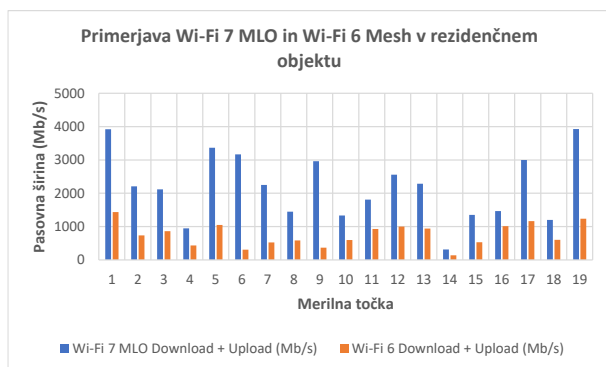
4.1 Notranje meritve – primerjava Wi-Fi 6 Mesh in Wi-Fi 7 MLO

Notranje meritve so osrednji del raziskave, saj omogočajo neposredno primerjavo delovanja tehnologij Wi-Fi 6 in Wi-Fi 7 v izvedbi Mesh. Meritve so bile izvedene na enakih merilnih lokacijah in ob primerljivih pogojih delovanja, kar omogoča objektivno primerjavo izmerjenih hitrosti prenosa podatkov.

Numerični rezultati notranjih meritev hitrosti prenosa v smeri proti uporabniku (DL) in od uporabnika (UL) za Wi-Fi 6 Mesh in Wi-Fi 7 MLO so povzeti v tabeli 1, medtem ko graf 1 prikazuje primerjavo agregirane hitrosti DL+UL na posameznih merilnih točkah.

Tabela 1: Notranje meritve hitrosti prenosa – primerjava Wi-Fi 6 Mesh in Wi-Fi 7 MLO (DL, UL)

Merilna točka	Wi-Fi 7		Wi-Fi 6	
	DL (Mbit/s)	UL (Mbit/s)	DL (Mbit/s)	UL (Mbit/s)
1	2006	1914	561	875
2	1206	999	419	318
3	1124	992	495	366
4	505	441	256	175
5	1675	1689	577	471
6	1578	1589	143	161
7	1137	1112	302	219
8	751	696	331	250
9	1593	1366	201	164
10	680	649	361	238
11	934	873	523	404
12	1218	1340	530	469
13	1196	1088	498	444
14	163	151	85	53
15	696	657	319	213
16	759	704	537	473
17	1490	1510	618	546
18	613	584	343	258
19	1948	1982	643	594



Graf 1: Primerjava agregirane prenosne hitrosti (DL+UL) pri notranjih meritvah za Wi-Fi 6 Mesh (modra) in Wi-Fi 7 MLO (rdeča).

Analiza rezultatov pokaže, da Wi-Fi 7 MLO v povprečju dosega višje hitrosti prenosa podatkov v primerjavi z Wi-Fi 6 Mesh. Razlike so posebej opazne na merilnih točkah, kjer promet poteka prek enega ali več vmesnih vozlišč Mesh. V takšnih scenarijih se pri Wi-Fi 6 hitrost prenosa izraziteje zmanjšuje, kar je posledica zaporedne rabe istih radijskih virov za dostop in hrbtnični promet.

Pri Wi-Fi 7 se uporaba MLO odraža v manjši degradaciji hitrosti, kar potrjuje, da hkratna uporaba več povezav prispeva k učinkovitejši rabi razpoložljivih virov.

Rezultati notranjih meritev tako jasno kažejo prednost tehnologije Wi-Fi 7 v izvedbi Mesh, kjer promet poteka prek več zaporednih vozlišč, večpovezavno delovanje (MLO) pa omogoča učinkovitejšo rabo razpoložljivih radijskih virov [7], [10], [18].

4.2 Zunanje meritve Wi-Fi 7 – vpliv razdalje in regulative

Pri interpretaciji rezultatov zunanjih meritev je treba upoštevati regulativne omejitve za uporabo frekvenčnega pasu 6 GHz, ki se med Evropo in Združenimi državami Amerike bistveno razlikujejo. Ključne razlike med obema regulativnima okvirjema so povzete v tabeli 2.

Tabela 2: Primerjava ključnih regulativnih veličin za pas 6 GHz po evropski (ETSI EN 303 687) in ameriški (FCC 20 51) zakonodaji.

Veličina	EU (ETSI EN 303 687)	ZDA (FCC 20 51)
Frekvenčni pas (GHz)	5,925 – 6,425	5,925 – 7,125
Razpoložljiv spekter	500 MHz	1.200 MHz
Maks. oddajna moč (indoor)	~23 dBm (200 mW EIRP)	~30 dBm (1 W EIRP)
Maks. oddajna moč (outdoor)	Omejena / ni dovoljena (LPI/SP)	do ~36 dBm (AFC)
Tip dovoljenih naprav	LPI (Low Power Indoor), VLP	Standard Power + AFC, LPI
Uporaba zunaj	Močno omejena	Dovoljena z AFC
Podpora 320-MHz kanalom	Omejena	Polna podpora

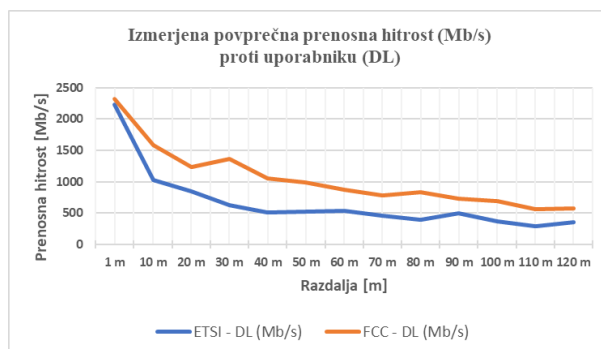
Evropska regulativa [15] omogoča uporabo omejenega dela pasu 6 GHz ter določa strožje omejitve oddajne moči, medtem ko ameriška [16] omogoča uporabo širšega spektra in večjih oddajnih moči, zlasti ob uporabi mehanizma avtomatske koordinacije frekvenc (angl. *Automatic Frequency Coordination* – AFC). Te razlike se neposredno odražajo v dosegljivih hitrostih prenosa podatkov, kar potrjujejo tudi rezultati zunanjih meritev, predstavljeni v nadaljevanju.

Rezultati zunanjih meritev so predstavljeni ločeno za smer proti uporabniku (DL) in smer od uporabnika (UL), pri čemer so primerjane vrednosti, skladne z evropskimi in ameriški regulativnimi zahtevami. Tabela 3 ter grafa 2 in 3 povzemajo izmerjene hitrosti prenosa pri različnih razdaljah od dostopne točke. Rezultati zunanjih meritev Wi-Fi 7 so predstavljeni v tabeli 3, grafični prikaz vpliva regulativnega okvira na hitrosti prenosa v smeri proti uporabniku (DL) je prikazan na grafu 2 in v smeri od uporabnika (UL) na grafu 3.

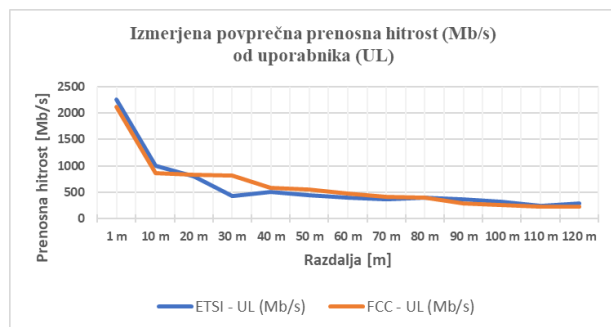
Zunanje meritve so bile izvedene z namenom ocene dosegljivih hitrosti prenosa podatkov za tehnologijo Wi-Fi 7 v manj omejenih radijskih pogojih.

Tabela 3: Zunanje meritve Wi-Fi 7 – hitrosti prenosa DL in UL v skladu z evropskimi (ETSI) in ameriški (FCC) regulativnimi zahtevami

Razdalja od oddajnika (m)	Povprečna hitrost prenosa (Mb/s)			
	ETSI DL (Mbit/s)	ETSI UL (Mbit/s)	FCC DL (Mbit/s)	FCC UL (Mbit/s)
1	2233	2266	2321	2115
10	1030	1000	1586	862
20	851	797	1238	829
30	624	428	1369	811
40	510	510	1057	580
50	519	447	984	553
60	536	403	870	477
70	460	373	782	413
80	399	393	829	402
90	498	363	732	295
100	365	317	688	258
110	290	239	559	219
120	351	280	572	229



Graf 2: Zunanje meritve Wi-Fi 7 – povprečne hitrosti prenosa v smeri proti uporabniku (DL) v skladu z regulativo EU (ETSI EN 303 687) in ameriško (FCC 20 51) regulativo.



Graf 3: Zunanje meritve Wi-Fi 7 – povprečne hitrosti prenosa v smeri od uporabnika (UL) v skladu z regulativo EU (ETSI EN 303 687) in ameriško (FCC 20.51) regulativo.

Analiza rezultatov pokaže, da Wi-Fi 7 v zunanjih pogojih dosega zelo visoke hitrosti prenosa podatkov, zlasti pri manjših razdaljah in pri manj omejujočem regulativnem okviru. Razlike v izmerjenih prenosnih hitrostih (tako pri DL kot pri UL) so neposredno povezane z nastavitvami po evropski (ETSI) ali ameriški (FCC) zakonodaji. Bistvene razlike so v širini frekvenčnega spektra in oddajni moči (zakonodaja EU je bolj omejujoča), kar jasno kaže na pomemben vpliv regulativnih omejitev na dejansko dosegljive hitrosti prenosa.

Z naraščajočo razdaljo od dostopne točke se hitrosti prenosa postopno zmanjšujejo, kar je pričakovano glede na omejitve radijskega prenosa. Kljub temu rezultati potrjujejo, da Wi-Fi 7 tudi pri večjih razdaljah ohranja razmeroma visoke hitrosti prenosa, kar potrjuje njegov potencial za uporabo v zahtevnejših zunanjih scenarijih.

4.3 Povzetek ugotovitev

Rezultati notranjih meritev potrjujejo, da Wi-Fi 7 v izvedbi Mesh dosega višje hitrosti prenosa in manjše zmanjšanje zmogljivosti pri povezavah prek več vozlišč v primerjavi z Wi-Fi 6. Zunanje meritve pa dodatno izkazujejo visok zmogljivostni potencial tehnologije Wi-Fi 7 ter jasno razkrivajo vpliv regulativnega okvirja na dejansko dosegljive hitrosti prenosa.

Ločena obravnava notranjih in zunanjih meritev omogoča celovit vpogled v delovanje sodobnih brezžičnih omrežij Mesh v realnem operaterskem okolju in je ustrezna podlaga za nadaljnjo razpravo o vplivu teh rezultatov na praktično uporabo in uporabniško izkušnjo.

5 RAZPRAVA IN VPLIV NA UPORABO V OPERATERSKEM OKOLJU

Rezultati meritev, predstavljeni v prejšnjem poglavju, omogočajo razpravo o praktičnem pomenu tehnologij Wi-Fi 6 in Wi-Fi 7 v arhitekturi Mesh z vidika njihove uporabe v realnem operaterskem okolju. Razprava temelji izključno na izmerjenih hitrostih prenosa podatkov in se osredotoča na implikacije za zasnovo, zmogljivost in upajanje brezžičnih dostopnih omrežij.

5.1 Vpliv Wi-Fi 7 MLO na delovanje notranjih omrežij Mesh

Notranje meritve so pokazale, da Wi-Fi 7 z večpovezavnim delovanjem v povprečju dosega višje hitrosti prenosa in manjšo degradacijo zmogljivosti pri povezavah prek več Mesh-vozlišč v primerjavi z Wi-Fi 6. To ima pomembne praktične posledice za operaterska rezidenčna omrežja, kjer je topologija Mesh pogosto uporabljena za razširjanje brezžične povezave v večjih stanovanjih ali poslovnih okoljih.

Pri Wi-Fi 6 Mesh se zmanjševanje hitrosti prenosa z večanjem števila prehodov kaže izraziteje, kar lahko v nekaterih postavitvah omeji uporabo storitev z večjimi pasovnimi zahtevami. Wi-Fi 7 v tem pogledu ponuja boljšo osnovo za podporo sodobnim aplikacijam, saj omogoča ohranjanje večjih hitrosti tudi na oddaljenejših vozliščih Mesh. To potrjuje, da ima uvedba MLO neposreden in merljiv vpliv na zmogljivost notranjih omrežij Mesh.

5.2 Vpliv uporabe Wi-Fi 7 na delovanje zunaj objektov

Zunanje meritve, izvedene izključno za tehnologijo Wi-Fi 7, omogočajo vpogled v zmogljivost sistema v radijskih pogojih brez večpotja. Izmerjene hitrosti prenosa potrjujejo, da Wi-Fi 7 omogoča zelo visoke absolutne hitrosti, zlasti pri manjših razdaljah in ob manj omejujočem regulativnem okviru.

Primerjava meritev, skladnih z evropskimi in ameriški regulativnimi zahtevami, jasno pokaže, da regulativne omejitve pomembno vplivajo na dejansko dosegljive hitrosti prenosa. To je z vidika operaterjev izjemno pomembno, saj pomeni, da potencial tehnologije Wi-Fi 7 v praksi ni določen zgolj s tehničnimi lastnostmi standarda, temveč tudi z lokalnimi predpisi. Zunanje meritve tako dopolnjujejo notranjo primerjavo in prispevajo k realnejšemu razumevanju zmogljivosti sistema.

5.3 Praktične implikacije za operaterje

Z vidika upajanja v operaterska omrežja rezultati nakazujejo, da je Wi-Fi 7 posebej primeren za izboljšanje zmogljivosti notranjih postavitv Mesh, kjer so zahteve po višjih hitrostih prenosa in stabilnejšem delovanju največje. Prednosti se kažejo predvsem pri scenarijih z več vozlišči Mesh, kjer je uporaba funkcije MLO ključna za učinkovito rabo razpoložljive pasovne širine.

Hkrati rezultati zunanjih meritev opozarjajo, da je treba pri načrtovanju in oglaševanju zmogljivosti upoštevati regulativne omejitve ter razlike med posameznimi trgi. Operaterske odločitve glede upajanja Wi-Fi 7 bi morale temeljiti na realnih meritvah in pričakovanih scenarijih uporabe, ne zgolj na teoretičnih maksimalnih hitrostih, ki jih navajajo specifikacije standarda.

5.4 Omejitve razprave

Razprava v tem poglavju je omejena na vpliv izmerjenih hitrosti prenosa podatkov in ne vključuje drugih vidikov delovanja brezžičnih omrežij, kot so zakasnitev, zanesljivost in radijska pokritost, saj te veličine niso bile vključene v merilni del raziskave. Kljub temu rezultati zagotavljajo trdno osnovo za razumevanje razlik med tehnologijama Wi-Fi 6 in Wi-Fi 7 v kontekstu omrežij Mesh in njihove uporabe v realnem operaterskem okolju.

6 ZAKLJUČEK

Predstavljena je analiza delovanja brezžičnih omrežij Mesh na osnovi tehnologij Wi-Fi 6 in Wi-Fi 7, temelječa na meritvah hitrosti prenosa podatkov v realnem operaterskem okolju. Raziskava je bila zasnovana tako, da jasno loči primerjalne notranje meritve med Wi-Fi 6 Mesh in Wi-Fi 7 z MLO od zunanjih meritev, izvedenih izključno za tehnologijo Wi-Fi 7.

Rezultati notranjih meritev potrjujejo, da Wi-Fi 7 v arhitekturi Mesh dosega višje prenosne hitrosti in manjše zmanjšanje zmogljivosti pri povezavah prek več vozlišč v primerjavi z Wi-Fi 6. Prednosti Wi-Fi 7 so posebej izražene v scenarijih z več zaporednimi Mesh-prehodi, kjer se uporaba MLO odraža v učinkovitejši rabi razpoložljivih brezžičnih virov in višjih hitrostih.

Zunanje meritve, omejene na tehnologijo Wi-Fi 7, dopolnjujejo notranjo analizo z vpogledom v zmogljivost sistema v ugodnejših radijskih pogojih. Rezultati jasno kažejo velik potencial Wi-Fi 7 pri doseganju zelo visokih hitrosti prenosa, hkrati pa poudarjajo pomemben vpliv regulativnih omejitev na dejansko dosegljive hitrosti v praksi. Primerjava med evropskim in ameriškim regulativnim okvirom potrjuje, da tehnične zmogljivosti standarda niso edini dejavnik, ki določa realno uporabnost sistema. Regulativne omejitve so ključni dejavnik pri implementaciji Wi-Fi 7 v Evropi.

Nadaljnje raziskave bi lahko razširile analizo z vključitvijo dodatnih veličin delovanja, kot je zakasnitev ali stabilnost povezave, ter z obravnavo zahtevnejših prometnih scenarijev. Vse omenjeno bomo lahko izvedli že z novo generacijo brezžične tehnologije, Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn), ki bo predvidoma standardizirana do leta 2028 in bo temeljila na zanesljivosti delovanja.

ZAHVALA

Sredstva za izvedbo je zagotovila Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije pri projektih Trajnostni in digitalni okvir za varnost in zaščito v pristaniščih (L7-60164) in Napredne metode za odkrivanje objektov pod površino s poudarkom na zajemu in interpretaciji podatkov (J2-50072).

LITERATURA

- [1] Samir Avdakovic, Maja Muftic Dedovic, Emina Haskovic, Zakira Jašarevic, "Communication Technologies for the Smart Grid – A Short Review and a Case-Study Analysis", *Elektrotehniški vestnik*, 92(3), str. 86–96, 2025.
- [2] Tomi Mlinar, Boštjan Batagelj, "Open RAN – Kaj omogoča odprta arhitektura radijskega dostopnega omrežja", *Elektrotehniški vestnik*, 90(5), str. 265–271, 2023.
- [3] Boštjan Batagelj, "Sodobna javna mobilna omrežja", *Elektrotehniški vestnik*, 89(3), str. 133–141, 2022.
- [4] Štefan Klemenčič, Mojca Ciglarich, "Model usmerjanja podatkov v omrežjih dronov", *Elektrotehniški vestnik*, 89(1-2), str. 21–30, 2022.
- [5] Anton Umek, Anton Kos, "Pametna športna oprema: smuči z vgrajenimi senzorji in asistenčnim sistemom za posredovanje povratne informacije v realnem času", *Elektrotehniški vestnik*, 89(1-2), str. 1–6, 2022.
- [6] IEEE Standard 802.11ax-2021, IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment: Enhancements for High Efficiency WLAN, IEEE, 2021. (Wi-Fi 6)
- [7] IEEE Draft Standard P802.11be/D4.0, IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment: Extremely High Throughput (EHT), IEEE, 2025. (Wi-Fi 7)
- [8] Gorazd Penko, Wi-Fi 7 in Mesh: meritve in izzivi domačih omrežij, Zbornik 27. seminarja Radijske komunikacije SRK 2026, Ljubljana, 4. do 6. februarja 2026.
- [9] Adrian Garcia-Rodriguez, David López-Pérez, Lorenzo Galati-Giordano, Giovanni Geraci, "IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 Strikes Back", *IEEE Communications Magazine*, 59(4), str. 102–108, 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2000711.
- [10] Qualcomm Technologies, Wi-Fi 7 Multi-Link Operation (MLO): Technical Primer, Qualcomm Whitepaper, 2024.
- [11] Wi-Fi Alliance, Wi-Fi 7 Certification Overview, Wi-Fi Alliance, 2024.
- [12] Kontron, Innbox X24 XGS-PON ONT Technical Documentation, 2025.
- [13] ITU-T G.9807.1 (XGS-PON), 10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network, International Telecommunication Union.
- [14] TP-Link, Deco BE85 Product Specification Sheet, TP-Link Global, 2025.
- [15] ETSI EN 303 687 (v1.2.1), 6 GHz WAS/RLAN equipment — Harmonised Standard for access to radio spectrum.
- [16] FCC Report & Order 20-51, Unlicensed Use of the 6 GHz Band, Federal Communications Commission, 2020.
- [17] Ookla, Speedtest Intelligence – Methodology Overview, Ookla, 2024.
- [18] Broadcom, BCM6726/67263 Wi-Fi 7 chipset platform overview, Broadcom Datasheet, 2024.

Tomi Mlinar je asistent z doktoratom na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer se raziskovalno ukvarja z optičnimi dostopnimi omrežji, naprednimi tehnologijami Wi-Fi ter analizo učinkovitosti komunikacijskih sistemov. Sodeluje pri raziskovalnih projektih, namenjenih izboljšanju delovanja domačih omrežij in uvajanju gigabitnih storitev. Je avtor ali soavtor več znanstvenih prispevkov s področja telekomunikacij in omrežne optimizacije.

Gorazd Penko je vodja referenčnega laboratorija pri podjetju T-2, d. o. o., kjer je odgovoren za testiranje, validacijo in uvajanje naprednih tehnologij, kot sta XGS-PON in Wi-Fi 7. Ima bogate izkušnje z načrtovanjem in optimizacijo omrežij ter izvedbo obsežnih meritev v realnih okoljih. Njegova strokovna področja vključujejo širokopasovne sisteme, brezžična omrežja nove generacije ter uporabniško izkušnjo v domačem omrežju.

Boštjan Batagelj je profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Je raziskovalec in strokovnjak na področju telekomunikacijskih sistemov z dolgoletnimi izkušnjami na področju optičnih omrežij in sodobnih širokopasovnih tehnologij. Sodeloval je pri več nacionalnih in industrijskih projektih, kjer se je osredotočal na optimizacijo dostopovnih omrežij in zanesljivost komunikacijskih storitev. Njegovo delo vključuje tudi svetovanje operaterjem pri uvajanju naprednih omrežnih arhitektur.