

Utjecaj mrežnih parametara na kvalitetu aplikacija u virtualnoj stvarnosti

Rašić, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:052695>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-29**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Luka Rašić

**UTJECAJ MREŽNIH PARAMETARA NA
KVALITETU APLIKACIJA U VIRTUALNOJ
STVARNOSTI**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2019.

Zagreb, 28. ožujka 2019.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Tehnologija telekomunikacijskog prometa I**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5119

Pristupnik: **Luka Rašić (0135240603)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Infomacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Utjecaj mrežnih parametara na kvalitetu aplikacija u virtualnoj stvarnosti**

Opis zadatka:

Opisati značajke tehnologije virtualne stvarnosti (VR), podržanih aplikacija te učestalosti njihova korištenja, koristeći relevantne izvještaje međunarodno priznatih izvora statističkih podataka. Opisati mrežne parametre koji utječu na kvalitetu izvođenja aplikacija u VR te osjetljivost pojedinih vrsta aplikacija na nezadovoljavajuću razinu performansi mreže koja se koristi za prijenos podataka.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

doc. dr. sc. Marko Matulin

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

ZAVRŠNI RAD

UTJECAJ MREŽNIH PARAMETARA NA KVALITETU APLIKACIJA U VIRTUALNOJ STVARNOSTI

IMPACT OF NETWORK RELATED PARAMETERS ON VIRTUAL REALITY APPLICATIONS' QUALITY

Mentor: doc. dr. sc. Marko Matulin

Student: Luka Rašić

JMBAG: 0135240603

Zagreb, rujan 2019.

SAŽETAK

U radu je analiziran utjecaj raznih mrežnih parametara na kvalitetu aplikacija u virtualnoj stvarnosti. Uslijed raznih performansi mrežnih parametara može doći do pada kvalitete aplikacija koja se izvodi u virtualnoj stvarnosti. Takve nepogodnosti korisnicima može izazvati neugodne osjećaje poput mučnine. Zbog toga je iznimno bitno uskladiti mrežne parametre s potrebama aplikacija.

Također, prikazuju se i značajke rada tehnologije virtualne stvarnosti, načini korištenja tehnologije te njihov trend rasta. Prikazane su i značajke raznih novih tehnologija koje će omogućiti kvalitetno izvođenje aplikacija virtualne stvarnosti.

Analizirani su i podaci projekta *QoE4VR* u kojem su simulirani neodgovarajući mrežni uvjeti te njihov učinak na rad aplikacije virtualne stvarnosti.

KLJUČNE RIJEČI: virtualna stvarnost; mrežne performanse; peta generacije mobilne mreže; aplikacije virtualne stvarnosti

SUMMARY

The paper analyzes the impact of different network related parameters on the quality of applications in virtual reality. Different network related performances can lead to the loss of quality of the application running in virtual reality. Such negative parameters can have an impact on the users, leading to negative effects like nausea. Because of that, it is of utmost importance to meet the network related parameters up to par with applications' requirements.

Also, the papers presents the features of virtual reality technology, ways of using the technology, and growth trend of the technology. Also presented are the features of various new technologies which will enable the high-quality execution of virtual reality applications.

Also, the data from the *QoE4VR* project in which the inadequate network parameters were simulated to showcase their effect on the execution of a virtual reality application, was analyzed.

KEY WORDS: virtual reality; network performance; fifth generation of mobile networks; virtual reality applications

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ZNAČAJKE TEHNOLOGIJE VIRTUALNE STVARNOSTI.....	3
2.1. Značajke tehnologije virtualne stvarnosti.....	3
2.2. Značajke tehnologije proširene stvarnosti	5
2.3. Tehnologija miješane stvarnosti	6
3. UČESTALOST KORIŠTENJA APLIKACIJA VIRTUALNE STVARNOSTI	7
3.1. Općenito o aplikacijama virtualne stvarnosti.....	7
3.2. Trendovi korištenja aplikacija virtualne stvarnosti.....	8
3.3. Utjecaj pete generacije mobilne komunikacijske tehnologije na trend korištenja aplikacija u virtualnoj stvarnosti.....	11
4. OPIS MREŽNIH PARAMETARA	13
4.1. Kašnjenje	14
4.2. Jitter	15
4.3 Gubitak paketa.....	15
4.4 Kapacitet.....	16
5. MREŽNI ZAHTJEVI RAZLIČITIH APLIKACIJA VIRTUALNE STVARNOSTI	18
5.1 Zahtjevi aplikacija virtualne stvarnosti za kvalitetnu reprodukciju sadržaja	18
5.2 Tehnologije kojima će se omogućiti mrežni parametri za aplikacije u virtualnoj stvarnosti	20
5.2.1 Virtualizacija mrežnih funkcija	21
5.2.2 Softverski definirane mreže	22
5.2.3 Obrada podataka na rubu s višestrukim pristupom	22
5.2.4 Centrala redizajnirana u podatkovni centar	22
5.2.5. Peta generacija mobilne mreže u pogledu aplikacija virtualne stvarnosti	23
6. OSJETLJIVOST APLIKACIJA VIRTUALNE STVARNOSTI NA NEODGOVARAJUĆE PERFORMANSE MREŽE	26
6.1. Utjecaj mrežnih performansi na korisničko iskustvo promjene rezolucije u aplikacijama virtualnoj stvarnosti	26
6.1.1. Utjecaj promjene rezolucije u virtualnoj stvarnosti.....	27
6.1.2. Rezultati istraživanja projekta QoE4VR.....	28

6.2. Utjecaj pada sličica po sekundi na korisničko iskustvo aplikacija virtualne stvarnosti	29
6.2.1. Utjecaj sličica po sekundi na korisničko iskustvo na primjeru video igara.....	30
6.2.2. Rezultati istraživanja „ispuštanja“ sličica po sekundi prilikom neodgovarajućih mrežnih performansi	32
6.3. Utjecaj pada <i>bitrate</i> -a na korisničko iskustvo virtualne stvarnosti.....	33
6.3.1. Bitrate u aplikacijama virtualne stvarnosti	33
6.3.2. Rezultati istraživanja	34
7. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA.....	37
POPIS KRATICA	41
POPIS KORIŠTENIH SLIKA.....	42
POPIS KORIŠTENIH GRAFIKONA.....	43

1. UVOD

Virtualna stvarnost je pojam kojim se označava virtualni svijet s kojim korisnik može ostvariti interakciju. Zadnjih godina se sve više popularizira tehnologija virtualne i proširene stvarnosti. Takav rast zainteresiranosti korisnika je omogućen zbog novih unaprjeđenja u tehnologiji virtualne stvarnosti, čime se omogućila šira dostupnost uređaja i aplikacija virtualne stvarnosti.

Također, kako bi se omogućilo adekvatno korištenje aplikacija virtualne stvarnosti preko mreže, potrebno je ostvariti adekvatne mrežne parametre. Mrežni parametri su iznimno bitni zbog ostvarivanja odgovarajućeg korisničkog zadovoljstva.

Svrha završnog rada je pružanje uvida u tehnologiju virtualne stvarnosti i njen odnos s mrežnim parametrima prilikom korištenja aplikacija virtualne stvarnosti.

Cilj rada je prikazati utjecaj raznih mrežnih parametara na kvalitetu izvođenja aplikacija virtualne stvarnosti, trend rasta korisnika virtualne stvarnosti te opisati tehnologiju.

Završni rad se sastoji od sedam međusobno povezanih dijelova:

1. Uvod
2. Značajke tehnologije virtualne stvarnosti
3. Učestalost korištenja aplikacija virtualne stvarnosti
4. Opis mrežnih parametara
5. Mrežni zahtjevi različitih aplikacija virtualne stvarnosti
6. Osjetljivost aplikacija virtualne stvarnosti na neodgovarajuće performanse mreže
7. Zaključak.

U drugom poglavlju je opisana tehnologija virtualne stvarnosti i njoj srodne tehnologije poput proširene stvarnosti te osnove njihova rada.

Treće poglavlje dotiče se učestalosti korištenja aplikacija virtualne stvarnosti, te trend rasta aplikacija virtualne stvarnosti i kupovine novih uređaja virtualne stvarnosti. Također, prikazan je i trend rasta prihoda ostvaren novom tehnologijom.

Opis mrežnih parametara, odnosno četvrto poglavlje, opisuje osnovne mrežne parametre koji se koriste kao dio kvalitete usluge mreže.

U petom poglavlju su prikazani razni mrežni zahtjevi aplikacija virtualne stvarnosti, te načini izvedbe novih tehnologija kako bi se postigli navedeni zahtjevi.

Šesto poglavlje opisuje izvedbu rada aplikacija virtualne stvarnosti prilikom neodgovarajućih mrežnih performansi. Korišteno je istraživanje koje je ispitalo utjecaj pada performansi mreže, odnosno neadekvatnog rada aplikacije virtualne stvarnosti na korisnike. Također, opisani su parametri aplikacije koji opadaju prilikom neadekvatnih performansi mreže.

Sedmo, zaključno poglavlje, pruža osvrt na prethodno razmatrane cjeline.

2. ZNAČAJKE TEHNOLOGIJE VIRTUALNE STVARNOSTI

Tehnologija virtualne stvarnosti je u posljednje vrijeme dobila na zamahu sa sve dostupnijim komercijalnim sustavima sučelja virtualne stvarnosti. Međutim, ta ista tehnologija još uvijek nije napredna u tolikoj razini da može zamijeniti sva ljudska osjetila, te se zbog toga spominju i koriste različite tehnologije umjetne stvarnosti, a prema [1] neke od poznatijih su:

- tehnologija virtualne stvarnosti (engl. *Virtual Reality* – VR)
- tehnologija proširene stvarnosti (engl. *Augmented Reality* – AR)
- tehnologija miješane stvarnosti (engl. *Mixed Reality* – MR).

2.1. Značajke tehnologije virtualne stvarnosti

Najpoznatija tehnologija od prethodno navedenih, je tehnologija virtualne stvarnosti koja korisnicima omogućuje potpuno „uranjanje“ u virtualni svijet djelovanjem na vizualne, taktilne i auditorne osjete kako bi korisnik ostvario interakciju s virtualnim okruženjem. Većina komercijalnih proizvoda to postiže pomoću naočala koje imaju posebne leće i senzore kojima se omogućuje djelovanje na ljudske osjete, [1], [2].

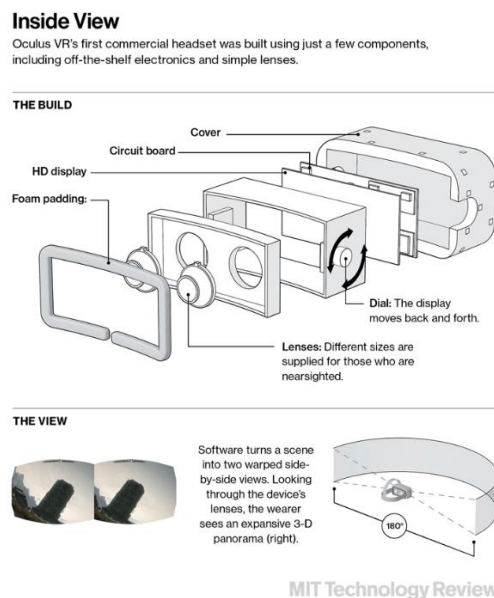
Prema [3], ključni elementi bitni za kvalitetno iskustvo korištenja tehnologije virtualne stvarnosti su:

- Virtualni svijet: trodimenzionalno okruženje koje se ostvaruje kroz korištenje nekog medija gdje korisnik može ostvariti interakciju s drugim korisnicima ili objektima. Virtualni svijet mora udovoljiti pokretima koje korisnik ostvaruje u stvarnom svijetu, te ih vjerno replicirati u virtualnome svijetu.
- „Uranjanje“: vrlo bitan čimbenik virtualne stvarnosti. Percepcija bivanja u virtualnom svijetu mora biti udovoljena tako da ljudski mozak dobije osjećaj da se nalazi negdje gdje zapravo fizički nije lociran. Osjećaj „uranjanja“ se dobiva različitim načinima od kojih su vizualna i auditorna najčešće u današnjim sustavima virtualne stvarnosti.

- Povratne informacije osjeta: korištenjem tehnologije virtualne stvarnosti iznimno je bitno imati povratne informacije osjeta. Stimuliranje tih osjeta dobiva se korištenjem različitih hardverskih i softverskih rješenja, kao na primjer različitim kontrolerima i vrstama naočala.
- Interaktivnost: interakcija korisnika s virtualnim okruženjem, u pravilu, mora biti ergonomski što bolja kako bi se ponudilo kvalitetno iskustvo virtualne stvarnosti. Ljudski mozak mora biti uvjeren da se sve odvija kao i u stvarnome svijetu jer ako to nije slučaj, gubi se na osjećaju „uranjanja“ koji je bitan dio iskustvene podloge korisnika. Interaktivnost može varirati od okretanja glave u virtualnome svijetu, do korištenja različitih objekata.

Proizvodi virtualne stvarnosti se dijele od jednostavnih naočala (engl. *Head-Mounted Display* – HMD), koje koriste leće kako bi povećali prikaz ekrana pametnog mobilnog terminalnog uređaj te koristeći njegov žiroskop omogućili pomicanje kamere u 360 stupnjeva, do naočala koje imaju napredne senzore koji omogućuju skeniranje okruženja u kojem se korisnik nalazi kako bi se korisniku omogućio veći prostor za kretanje u virtualnom, računalno generiranom svijetu, [2].

Na slici 1 prikazane osnovne komponente *Oculus Rift* naočala za virtualnu stvarnost.



Slika 1. Prikaz komponenti naočala za virtualnu stvarnost, [3]

Prema [2], neki od najpoznatijih HMD sustava za tehnologiju virtualne stvarnosti su:

- HTC Vive
- Oculus Rift
- Oculus GO
- Samsung Odyssey
- Google Cardboard.

Bitno je napomenuti da napredniji sustavi virtualne stvarnosti, ovisno o vrsti aplikacije koja se koristi i samim zahtjevima aplikacije, trebaju i jača računala s boljom procesorskom i grafičkom procesorskom jedinicom.

2.2. Značajke tehnologije proširene stvarnosti

Tehnologija proširene stvarnosti je vrlo bliska tehnologiji virtualne stvarnosti. Kod virtualne stvarnosti je karakteristično skoro potpuno „uranjanje“ korisnika u virtualni svijet, dok tehnologija proširene stvarnosti koristi realnost kao svoju polaznu točku u generiranju umjetnih objekata. Na primjer, pomoću pametnog mobilnog terminalnog uređaja korisnik u svojem realnom okruženju može, umjesto korištenja metra za izmjeru veličine nekog objekta, koristiti aplikaciju koja koristi tehnologiju proširene stvarnosti i dobiti iste vrijednosti, [1].

Tehnologija proširene stvarnosti koristi razne senzore, od kojih su najpoznatiji kamera, žiroskop i senzor dubine. Tehnologija radi tako da pomoću senzora prepozna objekt u stvarnoj okolini te onda projicira digitalni objekt na fizičkom objektu. Takvi digitalni objekti mogu biti različitih vrsta, od virtualnih građevina do prikaza edukacijskog sadržaja koje korisnik možda nema u svojoj blizini, [1].

Najraširenija primjena tehnologije proširene stvarnosti je upravo u industriji video igara. Na slici 2 je prikazan isječak iz video igre za pametne mobilne terminalne uređaje *Pokemon GO*, koju je proizvela tvrtka *Niantic*, [4].

3. UČESTALOST KORIŠTENJA APLIKACIJA VIRTUALNE STVARNOSTI

Porastom novih tehnologija fiksnog i mobilnog povezivanja terminalnih uređaja na Internet, rastu brzina i količina prenesenih podataka, što ujedno i znači više korisničkih sadržaja za korisnika. Prema [5] i [6] korisnici će imati mogućnost pristupiti većem broju sadržaja s porastom globalnog trenda korištenja usluga i aplikacija. Sadržaji koji koriste tehnologije virtualne stvarnosti nisu izuzetak tome trendu te se njihova uloga u različitim uvjetima, korisničkim ili poslovnim, ne smije zanemariti.

Također, u smislu mobilnog podatkovnog prometa, peta generacija mobilnih komunikacijskih tehnologija, skraćeno 5G, će doprinijeti većoj raširenosti tehnologije virtualne stvarnosti u korisničkom smislu. Na primjer, dolaskom u trgovinu s odjećom, umjesto isprobavanja odjeće, korisnik će pomoću svog pametnog mobilnog terminalnog uređaja ili HMD naočala, moću vidjeti kako će ta roba pristajati. Takav postupak zahtjeva vrlo dobru umreženost korisničkog uređaja, te zato peta generacija mobilne komunikacijske tehnologije dolazi kao vrlo bitan čimbenik za rast korištenja aplikacija u sustavima virtualne stvarnosti.

3.1. Općenito o aplikacijama virtualne stvarnosti

Virtualna stvarnost kao aplikativni dio korisničke svakodnevice može se svrstati u različita polja. Virtualna stvarnost i njoj srodne tehnologije mogu se koristiti u edukacijske svrhe, kao na primjer simulacija leta za nove pilote, gdje se uz realnu predodžbu letjelice i okoline u kojoj se novi pilot nalazi, može kvalitetno pripremiti za let u stvarnosti. Nadalje, prema [7], primjena aplikacija virtualne stvarnosti bi se mogla podijeliti prema:

- aplikacijama zabavnog sadržaja
- aplikacijama u edukaciji
- aplikacijama u zdravstvu
- aplikacijama u industrijskoj proizvodnji
- aplikacijama u turizmu itd.

Vrlo je bitno napomenuti da se aplikacije virtualne stvarnosti klasificira kao dio multimedijalnih usluga, te će one utjecati na porast istih tijekom idućih nekoliko godina.

3.2. Trendovi korištenja aplikacija virtualne stvarnosti

Prema [6], trend korištenja aplikacija virtualne i proširene stvarnosti će narasti čak 12 puta u razdoblju od 2017. do 2022. godine. To bi značilo da će razina generiranog prometa od strane virtualne stvarnosti i njoj srodnih tehnologija narasti sa 0,2% ukupno generiranog prometa multimedijalnog sadržaja do 1,2% prometa generiranog od strane multimedijalnog sadržaja, kao što su video igre ili video, [6].

Navedene statistike su prikazane na slici 4.

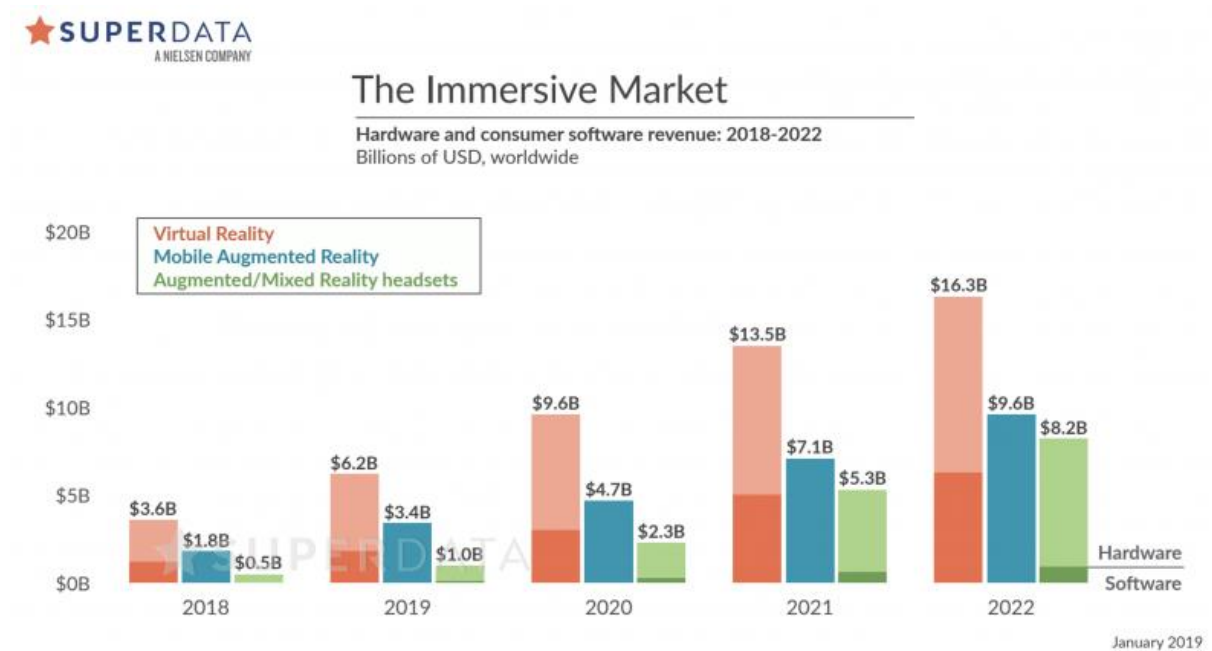


Slika 4. Prikaz generiranog prometa virtualne i proširene stvarnosti, [6]

Nadalje, na navedene trendove u razvoju dostupnosti i razini korištenja tehnologije virtualne i proširene stvarnosti utječe i sve veći broj korisnika pametnih mobilnih terminalnih uređaja, tablet uređaja i nosivih uređaja. Očekuje se da će do

2022. pametni mobilni terminalni uređaji biti zaslužni za 54,7% spojenih uređaja na Internet i 93% ukupno generiranog prometa, [6].

Sve to utječe na primjenu uređaja virtualne i proširene stvarnosti kod raznih korisnika, kao i na ukupnu zaradu, odnosno trend rasta tržišta navedenih tehnologija. Godišnji rast prihoda na tržištu tehnologija virtualne stvarnosti u pogledu hardverskog i softverskog djela prikazan je na slici 5, [8].



Slika 5. Prikaz rasta prihoda na tržištu tehnologija umjetne stvarnosti, [8]

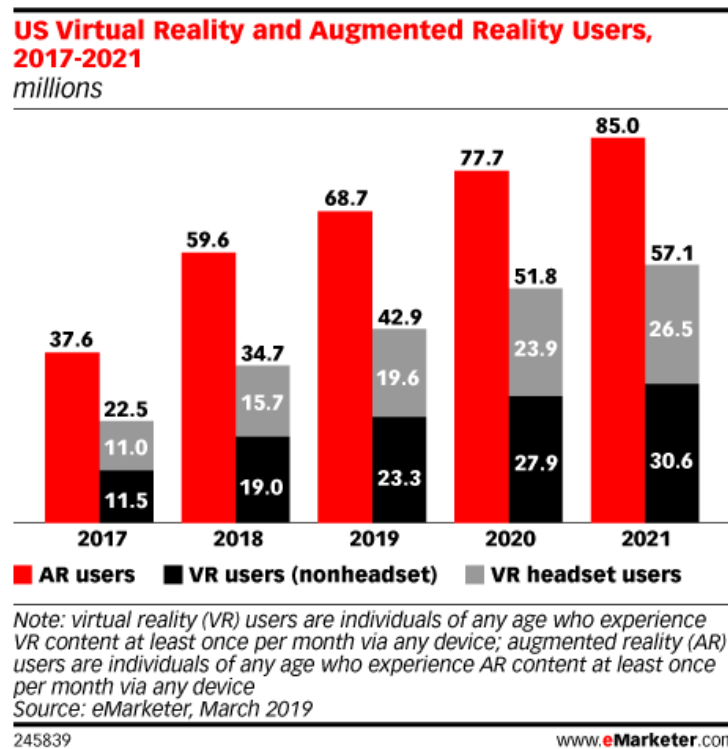
Rast broja korisnika na tržištu tehnologija virtualne i proširene tehnologije ne odvija se istim intenzitetom. Trenutni broj korisnika više preferira aplikacije proširene stvarnosti u odnosu na aplikacije virtualne stvarnosti. Jedan razlog je taj da aplikacije proširene stvarnosti ne zahtijevaju skupocjene HMD sustave kako bi im se prikazao sadržaj, u odnosu na aplikacije proširene stvarnosti koji zahtijevaju, u većini slučajeva, samo pametni mobilni terminalni uređaj. Međutim, iako je trenutno stanje takvo da korisnici preferiraju više aplikacije proširene stvarnosti, to ne znači da se neće dogoditi rast i na strani korisnika koji koriste aplikacije virtualne stvarnosti, [8].

Rastu korisnika virtualne stvarnosti doprinijeti će i smanjivanje cijena razvoja i izrade novih HMD sustava za korisnika, te će ti sustavi biti dostupniji krajnjim korisnicima, [9].

Neki od razloga zbog kojih trenutno uređaji virtualne stvarnosti nisu dostupni korisnicima, prema [9] su:

- cijena
- kvaliteta iskustva (ergonomija, tehničke poteškoće, mrežni zahtjevi)
- nedostatak kvalitetnog sadržaja
- regulacija
- nevoljkost privatnih i poslovnih korisnika za novu tehnologiju
- i drugi.

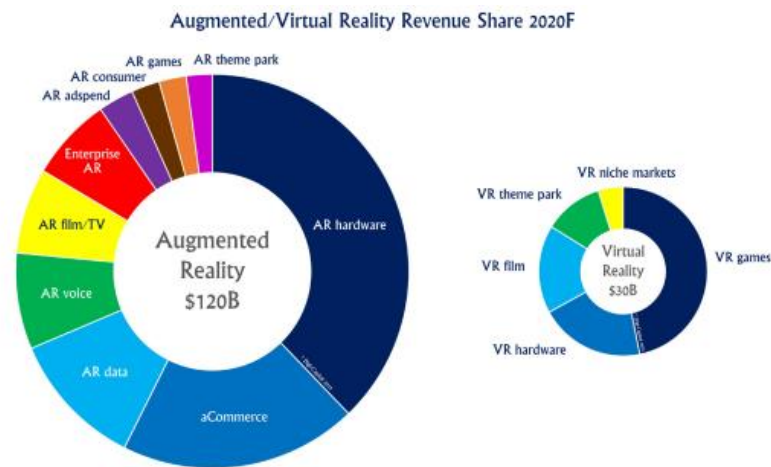
Upravo zbog gore navedenih razloga kompanije zadužene za razvoj hardverskih i softverskih rješenja rade na poboljšanju istih. Rast korisnika virtualne i proširene stvarnosti u Sjedinjenim Američkim Državama prikazan je na slici 6, [10].



Slika 6. Rast korisnika virtualne i proširene stvarnosti u Sjedinjenim Američkim Državama, [10]

Također, ovaj trend potvrđuje i [11], prema kojem se predviđa da će se aplikacije proširene stvarnosti koristiti u većem broju upravo zbog sve veće dostupnosti prenosivih pametnih terminalnih uređaja. Dok s druge strane, aplikacije virtualne stvarnosti fokusirati će se na trodimenzionalne filmove, video igre i druge poslovne svrhe.

Prikaz udjela prihoda u područjima proširene i virtualne stvarnosti prikazan je na slici 7.



Slika 7. Prikaz udjela prihoda u AR i VR aplikacijama, [11]

3.3. Utjecaj pete generacije mobilne komunikacijske tehnologije na trend korištenja aplikacija u virtualnoj stvarnosti

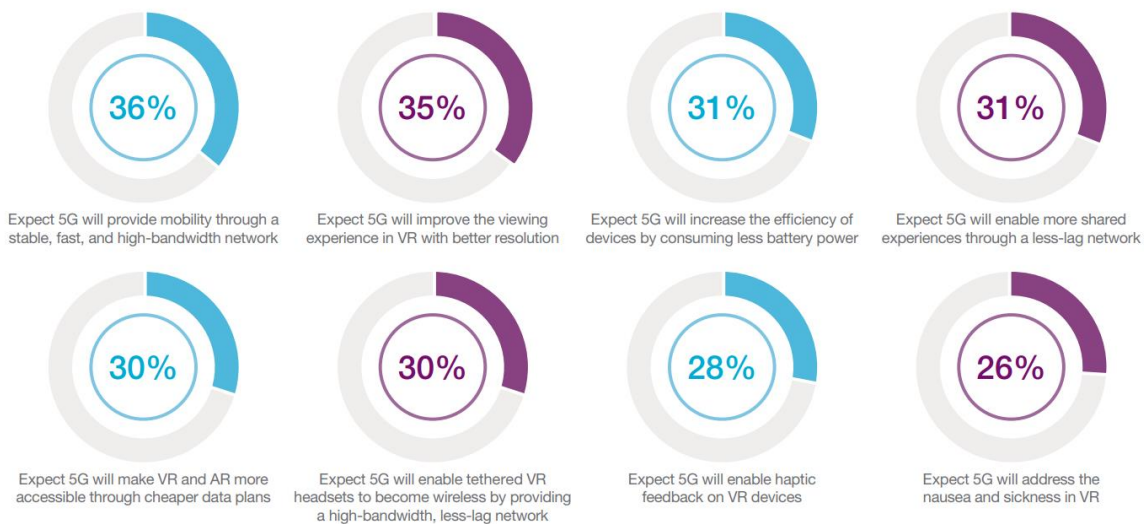
Svakom novom generacijom mobilne komunikacijske tehnologije korisnici dobivaju sve raširenije mogućnosti kao što su međusobno umrežavanje, pregledavanje multimedijskog sadržaja i mnoge druge. Dolaskom četvrte generacije mobilne komunikacijske tehnologije većina korisnika je dobila mogućnost gledanja video sadržaja na svojim mobilnim terminalnim uređajima. Tako će i s dolaskom nove, po redu, pete generacije mobilne komunikacijske tehnologije doći do napretka u virtualnoj stvarnosti, [12].

Nastavno, s dolaskom pete generacije mobilne mreže, mrežni zahtjevi virtualne stvarnosti će biti zadovoljeni te će korisnici čak i izvan svojih poslovnih ili kućnih okruženja moći koristiti svoje uređaje za interakciju s drugim korisnicima. To se može prikazati kroz virtualne sobe za sastanke ili virtualnu interakciju s nekim strojem dok korisnik ili radnik nije fizički prisutan, [12].

Također, prema istraživanju provedenom od strane Ericssona, korisnici smatraju da će im peta generacija mobilne mreže omogućiti bolje korisničko iskustvo u korištenju tehnologije virtualne stvarnosti. Prema [12], korisnici vjeruju da će peta generacija pomoći u rješavanju sljedećih problema:

- poboljšati stabilnost mobilnosti
- poboljšati rezoluciju prikaza u virtualnoj stvarnosti
- smanjiti cijenu
- smanjiti mučninu prilikom gledanja sadržaja u virtualnoj stvarnosti
- i drugi.

Prema slici 8, prikazani su rezultati navedenog istraživanja.



Slika 8. Prikaz rezultata istraživanja, [12]

4. OPIS MREŽNIH PARAMETARA

Govoreći o mrežnim parametrima koje zahtijevaju moderni sustavi virtualne stvarnosti, neophodno je spomenuti i objasniti pojedine. Kao i kod svakog modernog terminalnog uređaja, tako i kod uređaja koji omogućuju prikaz virtualne stvarnosti, oni predstavljaju dio iskustvene podloge koja utječu na kvalitetu prikaza sadržaja krajnjem korisniku [13], [14].

Također, mrežni parametri se mogu promatrati kroz termin kvalitete usluge (engl. *Quality of Service* – QoS) i kvalitete iskustva (engl. *Quality of Experience* – QoE). Prema [13] i [14], QoS parametri se smatraju objektivnim parametrima, a oni se odnose na:

- kašnjenje
- *jitter*
- gubitak paketa
- širina pojasa
- greške u prijenosu (engl. *Error rate*)
- propusnost.

Nastavno, parametri kvalitete iskustva se odnose na one parametre koje se mogu nazvati i subjektivnim parametrima. To se odnosi na korisnike koji kvalitetu svoje usluge definiraju prema subjektivnom doživljaju, a prema [13], može se odnositi na:

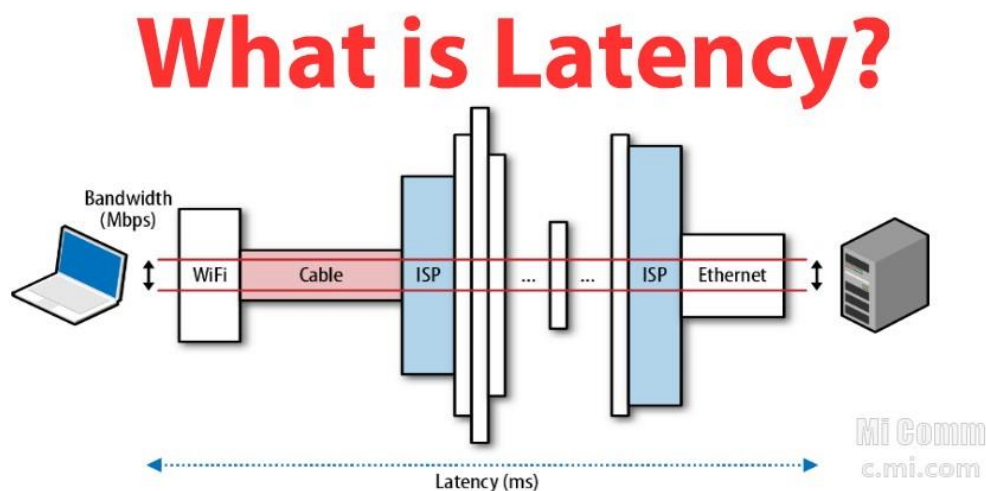
- razinu zadovoljstva
- razinu uživanja u usluzi
- razinu zabave
- razinu „uranjanja“
- razinu zadovoljstva s kvalitetom usluge
- i mnoge druge.

Zaključno, postoji veza između kvalitete usluge i kvalitete iskustva. Kako bi bila zadovoljena kvaliteta iskustva, parametri koji opisuju kvalitetu usluge moraju biti zadovoljeni. To je posebno bitno kod aplikacija virtualne stvarnosti gdje i najmanje odstupanje od dopuštenih parametara može izazvati nelagodu kod korisnika. Zato je iznimno bitno opisati koji su to mrežni parametri bitni za kvalitetu usluge, [13], [14].

4.1. Kašnjenje

Prema [14], kašnjenje označuje vrijeme potrebno da se paket prenese od izvorišta do odredišta. Drugim riječima, kašnjenje se odnosi na vremenski interval kada jedna komponenta sustava čeka na drugu komponentu sustava da nešto učini. Neki faktori koji utječu na kašnjenje, prema [14], [15] i [16] su:

- problemi s transmisijskim medijem
- greške na usmjernicima ili preklopnocima zato što svaki usmjernik zahtijeva vrijeme kako bi pregledao i promijenio zaglavlje paketa
- propagacijsko vrijeme, odnosno vrijeme koje je fizički potrebno paketu od izvorišta do odredišta
- kašnjenje zbog komprimiranja i dekomprimiranja
- kašnjenje zbog kodiranja i dekodiranja
- kašnjenje zbog čekanja u međuspremnicima usmjernika.



Slika 9. Prikaz kašnjenja u mrežnoj komunikaciji, [17]

Na slici 9 je prikazano kašnjenje kroz mrežu između dva uređaja.

U stranoj literaturi kašnjenje se može označiti s *latency* ili *delay*. Također, kašnjenje se u današnjoj digitalnoj paketnoj mreži označava, prema [14], [15] i [16], u dva parametra:

1. Jednosmjerno kašnjenje (engl. *One-way latency*): mjeri se tako da se računa ukupno vrijeme koje je potrebno paketu da putuje od izvorišta do odredišta.

2. Kružno kašnjenje (engl. *Round-trip latency*): mjeri se tako da se pridoda jednosmjerno kašnjenje do odredišta, vremenu koje je potrebno paketu da se vrati s odredišta nazad na izvorište. Za razliku od jednosmjernog kašnjenja, kod kružnog kašnjenja se uvijek isključuje vrijeme procesiranja na odredištu.

4.2. Jitter

Jitter je termin usko vezan uz kašnjenje, to je razlika u kašnjenju susjednih paketa iste sesije, odnosno *jitter* mjeri vremensku razliku u međudolaznim vremenima paketa. *Jitter* je inače parametar koji je vrlo bitan kod aplikacija koje su osjetljive na kašnjenje, kao na primjer, glasovni poziv putem internetske mreže (engl. *Voice over IP Protocol* – VoIP).

Kada se paketi šalju putem mreže, podložni su kašnjenju na putu od izvorišta do odredišta. Problem kašnjenja na transmisijskom putu se rješava pomoću takozvanih *jitter* međuspremnik. *Jitter* međuspremnik se postavlja tako da se zabilježe paketi koji kasne, zajedno s osnovnim podacima te zatim izračuna omjer paketa koji kasne i paketa koji su uspješno preneseni, [18].

Na slici 10 je prikazan *jitter* prilikom transmisije.



Slika 10. Prikaz *jittera* prilikom transmisije, [18]

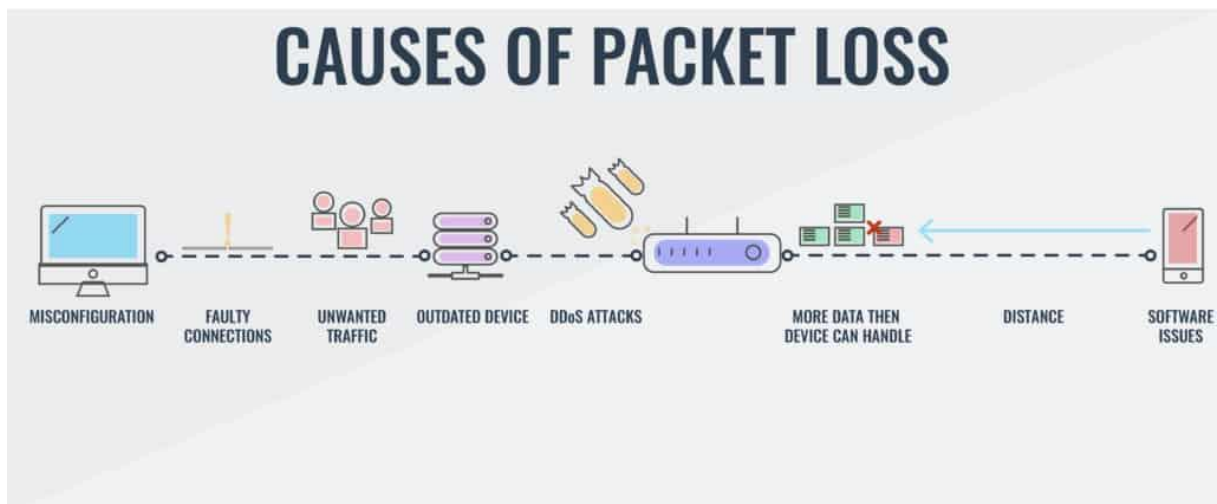
4.3 Gubitak paketa

Gubitak paketa je značajan parametar kvalitete usluge kod raznih vidova aplikacija. Sam po sebi, gubitak paketa je pojava koja će se pojavljivati prilikom prijenosa, te je neizbježan u realnim sustavima. Neki od razloga gubitka paketa, prema [19], [20] i [21], su:

- nedostatna pojasna širina i zagušenje: događa se kada previše uređaja pokušava istovremeno komunicirati na mreži.

- nedostatan hardver: ako usmjernici, preklopnici, vatrozidovi i drugi uređaji ne mogu podnijeti promet koji se prenosi preko mreže, odnosno ako ne mogu primiti više paketa u svoje međuspremnike, oni će odbaciti pakete.
- bežična mreža: kod bežičnih mreža, radiofrekvencijska interferencija je može uzrokovati gubitke paketa. Neki od razloga su slab signal, ograničena udaljenost i kriva konfiguracija.
- žičana mreža: kod žičnih mreža, razlog gubitka paketa mogu biti loši kablovi. Ako kabel nije dobro složen ili ako je oštećen, to može utjecati na električni signal koji putuje tim kablom što uzrokuje gubitke paketa.

Na slici 11 ilustrativno su prikazani razlozi gubitka paketa.



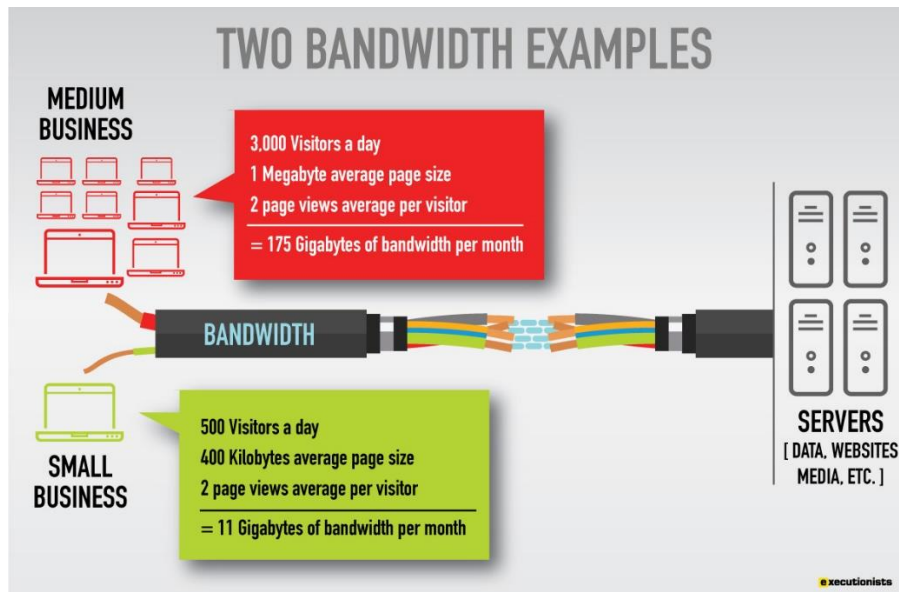
Slika 11. Prikaz nekih razloga gubitka paketa, [22]

Također, bitno je spomenuti da kod aplikacija koje ne koriste stvarnovremeni prijenos, gubitak paketa ima određenu toleranciju zbog retransmisije. S druge strane, kod aplikacija koje koriste stvarnovremeni prijenos, gubitak paketa predstavlja problem te se ne koristi retransmisija jer bi ona negirala svoj inače pozitivan učinak.

4.4 Kapacitet

Širina pojasa (engl. *bandwidth*) se odnosi na maksimalan kapacitet kanala dostupan na nekoj vezi kojim se prenose podaci od jednog čvora na drugi. Ne odnosi se na brzinu prijenosa podataka. Kapacitet se mjeri u bitovima u vremenskoj jedinici, na primjer, bitovima po sekundi (b/s), dok su sada normalne mjere, ustaljene

korištenjem, od gigabita po sekundi (Gb/s), pa nadalje. Na slici 12 prikazan je primjer kapaciteta kod malih i srednjih poslovnih korisnika, [14], [23].



Slika 12. Primjer korištenja kapaciteta kod malih i srednjih poslovnih korisnika, [24]

Dok kapacitet nema utjecaja na brzinu kojom se paketi prenose, ona ima utjecaj na to hoće li neki komunikacijski kanal podnijeti opterećenje. Na primjer, mreža s niskim kapacitetom će sporije prikazati elemente neke mrežne stranice, jer neće moći odmah procesirati toliku količinu podataka. To znači da svaka aplikacija ima svoje zahtjeve za kapacitetom, te da kapacitet utječe na performanse aplikacije. Nedovoljan kapacitet može uzrokovati zagušenje u mreži ako aplikacija ima veće zahtjeve za kapacitetom od dostupnog kapaciteta.

5. MREŽNI ZAHTJEVI RAZLIČITIH APLIKACIJA VIRTUALNE STVARNOSTI

Aplikacije popularne u današnjem svijetu, imaju različite zahtjeve korištenja od korisnika do korisnika. Te se aplikacije najčešće koriste za korištenje multimedijalnog sadržaja, koji može biti audio i video sadržaja, pa sve do igranja video igara u umreženom načinu (engl. *multiplayer gaming*).

Zbog svojih karakteristika, korištenje sadržaja u virtualnoj stvarnosti će imati različite zahtjeve od dosadašnjih u pogledu mrežnih karakteristika. To je zato što su se aplikacije uglavnom koristile na nekim od terminalnih uređaja koje su koristile izlazne jedinice, odnosno ekrane čije rezolucije nisu imale veliki utjecaj na ljudsko oko zbog udaljenosti gledanja. Kod virtualne stvarnosti se to mijenja jer je ljudsko oko iznimno blizu točkama projiciranja na HMD uređajima, te je iznimno bitno da se omogući kvalitetna reprodukcija kako bi se izbjegle eventualne neugodnosti za čovjeka. Parametri kao što su, na primjer, kašnjenje i niski kapacitet, degradiraju kvalitetu reprodukcije te ona postaje nepogodna za čovjeka.

Kako bi se kvalitetno pripremilo za efektivnu reprodukciju sadržaja za čovjeka, potrebno je proučiti različite mrežne zahtjeve kako bi se omogućila kvaliteta dostojna za neometan prikaz sadržaja u aplikacijama virtualne stvarnosti.

Također, treba uzeti u obzir činjenicu da je upravo zbog ograničenih mrežnih parametara trenutne mrežne infrastrukture, tehnologija virtualne stvarnosti ograničena na lokalnu upotrebu. Smatra se da će dolaskom novih infrastrukturnih rješenja umrežavanja korisnika i uređaja, kao što su nove tehnologije bežične lokalne mreže (engl. *Wireless Local Area Network – WLAN*) i nove generacije mobilne komunikacijske tehnologije, odnosno petom generacijom, mnogi problemi biti ispravljani.

5.1 Zahtjevi aplikacija virtualne stvarnosti za kvalitetnu reprodukciju sadržaja

Kako bi se kvalitetno reproducirao sadržaj namijenjen za aplikacije virtualne stvarnosti potrebno je ostvariti uvjet optimalnih mrežnih parametara. Kao jedan od

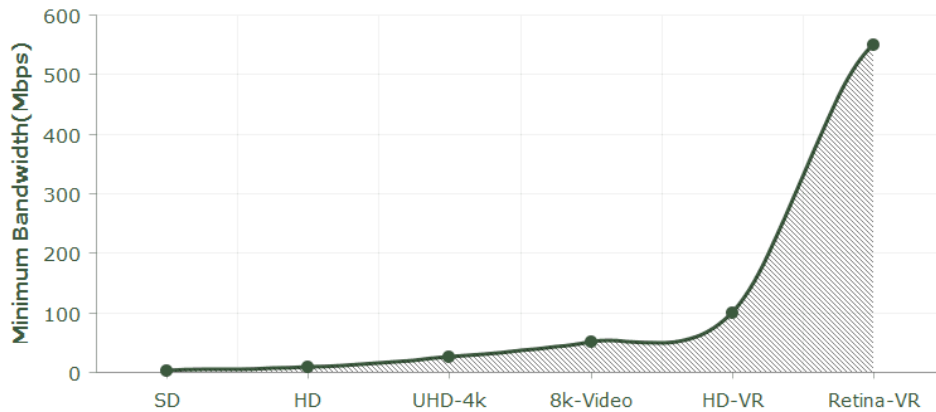
najbitnijih parametara za ostvarivanje kvalitetne reprodukcije navodi se kapacitet. Na primjer, dosadašnji zahtjevi za kapacitetom u svrhu reprodukcije video sadržaja putem potrebnih aplikacija, su ovisili o tome kolika je njihova rezolucija.

Na primjeru aplikacije *Netflix*, zahtjevi za dostupnom brzinom internetske veze su sljedeći:

- 0,5 Mb/s: obavezna brzina internetske veze
- 1,5 Mb/s: preporučena brzina internetske veze
- 3 Mb/s: preporučena brzina internetske veze za standardnu kvalitetu (engl. *Standard Definition* – SD)
- 5 Mb/s: preporučena brzina internetske veze za visoku kvalitetu (engl. *High Definition* – HD)
- 25 Mb/s: preporučena brzina internetske veze za ultra visoku kvalitetu (engl. *Ultra High Definition* – UHD), također poznata kao 4K rezolucija [25].

Kada se uzmu u obzir ti zahtjevi, te da je prosječna brzina pristupa Internetu po korisniku u Republici Hrvatskoj 6,4 Mb/s, dolazi se do zaključka da iskustvu virtualne stvarnosti mogu pristupiti samo korisnici s iznad prosječnom brzinom pristupa Internetu, [26].

Kada se uzmu u obzir različiti zahtjevi aplikacija virtualne stvarnosti, minimalni zahtjevi koje oni zahtijevaju u pogledu kapaciteta su iznad 100 Mb/s. Ako se pogleda slika 13, može se ustanoviti da čak i video sadržaj 8K rezolucije zahtijeva manje kapaciteta od minimalnog iskustva virtualne stvarnosti u visokoj rezoluciji (engl. *High Definition Virtual Reality* – HD-VR), [27].

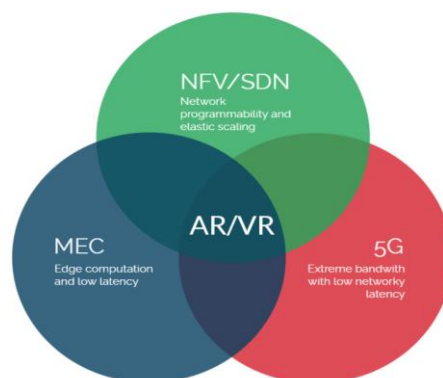


Slika 13. Zahtjevi za kapacitetom kod aplikacija virtualne stvarnosti, [27]

Nadalje, prema slici 13 se isto može uočiti vrlo velika razlika za zahtijevanim kapacitetom virtualne stvarnosti u visokoj rezoluciji do virtualne stvarnosti u takozvanoj *retina* rezoluciji, o kojoj će se više spomenuti u šestom poglavlju. Zahtjevi za minimalnim kapacitetom povećavaju iznimno velikim skokom od 100 Mb/s za virtualnu stvarnost u visokoj rezoluciji do čak 550 Mb/s za takozvanu virtualnu stvarnost *retina* rezolucije.

5.2 Tehnologije kojima će se omogućiti mrežni parametri za aplikacije u virtualnoj stvarnosti

Trenutno stanje mrežne infrastrukture u svrhu povezivanja uređaja virtualne stvarnosti s ostalim korisnicima je limitirano. Stvaraju se razna uska grla zbog vrlo visokih mrežnih zahtjeva aplikacija koje koriste tehnologiju virtualne stvarnosti. Vrlo su visoka kašnjenja, ograničen je kapacitet te sve to utječe na performanse zahtijevane od strane aplikacija virtualne stvarnosti.

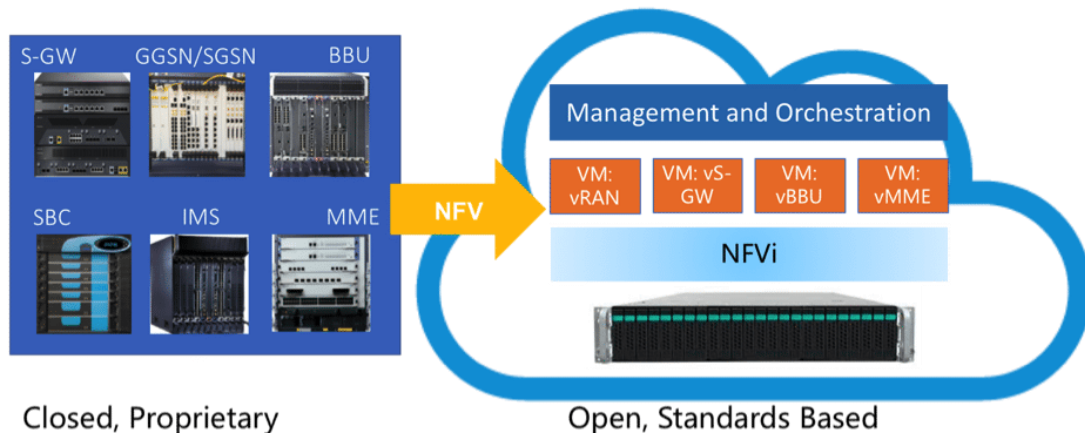


Slika 14. Interakcija između tehnologija koje će omogućiti kvalitetno iskustvo virtualne stvarnosti, [28]

Srećom, mnoge zapreke koje su do sada bile problem implementaciji virtualne stvarnosti se rješavaju uvođenjem novih tehnologija u domeni davatelja mrežnih usluga. Neke od tih tehnologija prikazane su na slici 14, [27], [28], [29].

5.2.1 Virtualizacija mrežnih funkcija

Virtualizacija mrežnih funkcija (engl. *Network Functions Virtualization* - NFV) je inicijativa pokrenuta od strane Europskog instituta za telekomunikacijske standarde (engl. *European Telecommunications Standards Institute* – ETSI). Inicijativa specificira probleme s dosadašnjim mrežama u smislu da sadašnji uređaji nisu dovoljno interoperabilni s uređajima drugih proizvođača. Tome problemu se doskočilo tako da se sve funkcije koje su prije bile isključivo na čipovima jednog proizvođača, a nisu bile kompatibilne s uređajima drugog proizvođača, prebace na softverski način rada, odnosno to se sada zove virtualna mrežna funkcija (engl. *Virtual Network Function* – VNF). Slika 15 prikazuje primjer prebacivanja funkcija sa šest različitih uređaja, s različitim funkcijama na jedan uređaj s virtualiziranim funkcijama, [28], [29].



Slika 15. Prikaz virtualizacije mrežnih funkcija u NFV, [30]

Ukratko, virtualizacija mrežnih funkcija omogućava da se umjesto kupnje novog dijela mrežne opreme, jednostavno instalira novi softverski modul unutar sučelja mrežne opreme koji će odrađivati neki dio posla. U smislu virtualne stvarnosti, virtualizacija mrežnih funkcija će postaviti temelje za bolje „uranjanje“ korištenja aplikacija virtualne stvarnosti, [28], [29].

5.2.2 Softverski definirane mreže

Softverski definirana mreža (engl. *Software-defined Networking* – SDN) je oblik mrežne arhitekture kojom se pokušava povećati fleksibilnost i skalabilnost mreže, a zatim ujedno i pojednostaviti istu. Cilj softverski definiranih mreža je odvajanje upravljačkog i podatkovnog dijela mreže kako bi se osigurala programabilna mreža.

Softverski definirane mreže se smatraju kontrolorima ponašanja neke mreže. One su odgovorne za ponašanje mreže, kojim načinom se odvija promet i mnoge druge funkcije. Softverski definirane mreže zajedno s virtualizacijom mrežnih funkcija nastoje omogućiti programabilnu, kompaktnu i cjenovno prihvatljivu mrežu koja će dinamično alocirati potrebne resurse prema krajnjem korisniku.

Dinamična alokacija resursa u virtualnoj stvarnosti bi značila da se korisnicima, kada promjene aplikaciju koju koriste, adekvatno dodjele potrebni resursi bez donošenja lošije kvalitete ili usluge drugim korisnicima, [28], [29]

5.2.3 Obrada podataka na rubu s višestrukim pristupom

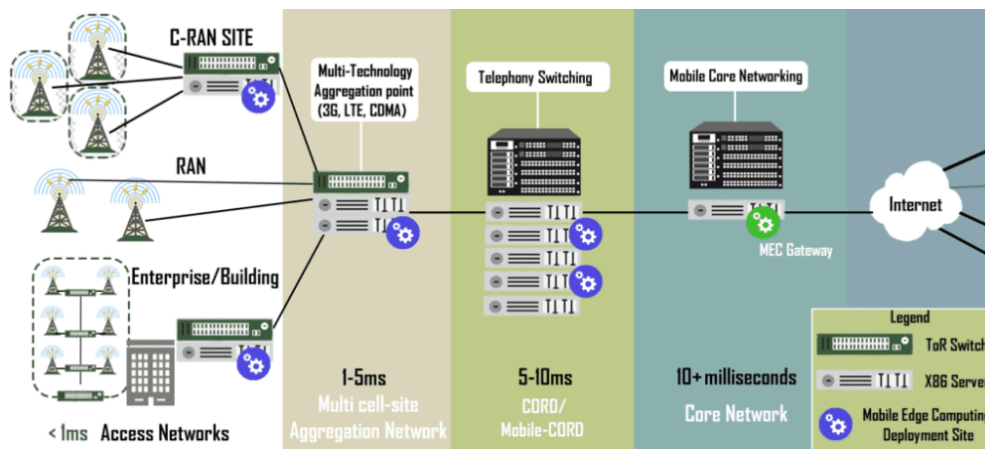
Obrada podataka na rubu s višestrukim pristupom (engl. *Multi-access Edge Computing* – MEC) je način donošenja virtualiziranih mrežnih funkcija što je bliže moguće korisniku. Obrada podataka na rubu s višestrukim pristupom rješava problem kružnog kašnjenja do podatkovnog centra tako da se svi resursi nalaze na rubu mreže.

Kod aplikacija virtualne stvarnosti, obrada podataka na rubu s višestrukim pristupom doprinosi boljoj stopi „uranjanja“ korisnika s virtualnim svijetom. Razlog je smanjenje kašnjenja, koje je iznimno bitno za korisničko iskustvo korištenja aplikacija virtualne stvarnosti. Neki od načina za smanjenje kašnjenja su korištenje funkcija poput kalibracije, spajanja i pretvaranja video prikaza na rubu mreže uz pomoć aplikacija i servisa koji se nalaze na rubnom poslužitelju, [28], [29].

5.2.4 Centrala redizajnirana u podatkovni centar

Centrala redizajnirana u podatkovni centar (engl. *Central Office Re-architected as a Datacenter* – CORD) je koncept kojim mrežni operatori uz spoznaju o prethodno definiranim tehnologijama, opremaju lokalne centrale kako bi postale podatkovni

centri. S ovom tehnologijom će se izbjeći kružna kašnjenja do podatkovnih centara preko zagušenih mreža. Slika 16 prikazuje implementaciju tehnologije u nekoj mreži.



Slika 16. Prikaz MEC i CORD implementacije u mreži, [29]

Nadalje, ovaj koncept će uz ostale tehnologije, ponajviše uz pomoć MEC-a, omogućiti veliku količinu resursa potrebnih za aplikacije virtualne i proširene stvarnosti. Time će se reducirati ili potpuno ukloniti kašnjenja koja bi inače nastala putovanjem u mreži, a sada će se taj sadržaj nalaziti na rubu mreže, [29].

5.2.5. Peta generacija mobilne mreže u pogledu aplikacija virtualne stvarnosti

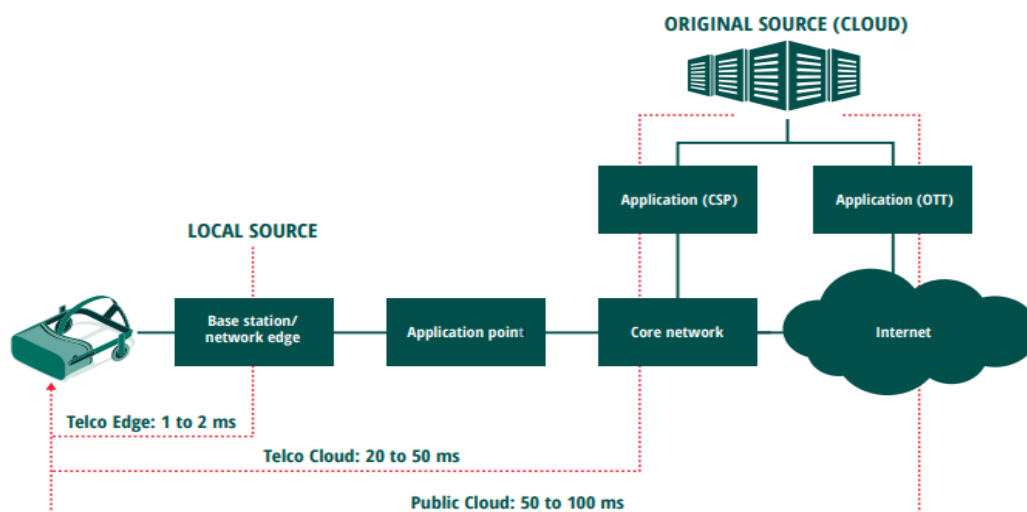
Peta generacije mobilnih mreža će doprinijeti iskustvu korištenja aplikacija virtualne stvarnosti zbog svojih napredaka u segmentu suzbijanja kašnjenja i povećanog kapaciteta. Peta generacija mobilnih mreža nastoji, uz implementaciju prethodno definiranih tehnologija, smanjiti kašnjenje u pristupnoj mreži do milisekunde. Nadalje, smatra se da će peta generacije mobilne mreže donijeti performanse ekvivalentne gigabitnoj žičanoj mreži.

Također, prema [31] očekuje se da će peta generacije mobilne mreže, u odnosu na dosadašnje stanje, donijeti:

- 10 puta bolju propusnost
- 10 puta smanjenje u kašnjenju
- 100 puta bolji prometni kapacitet
- 100 bolju učinkovitost mreže.

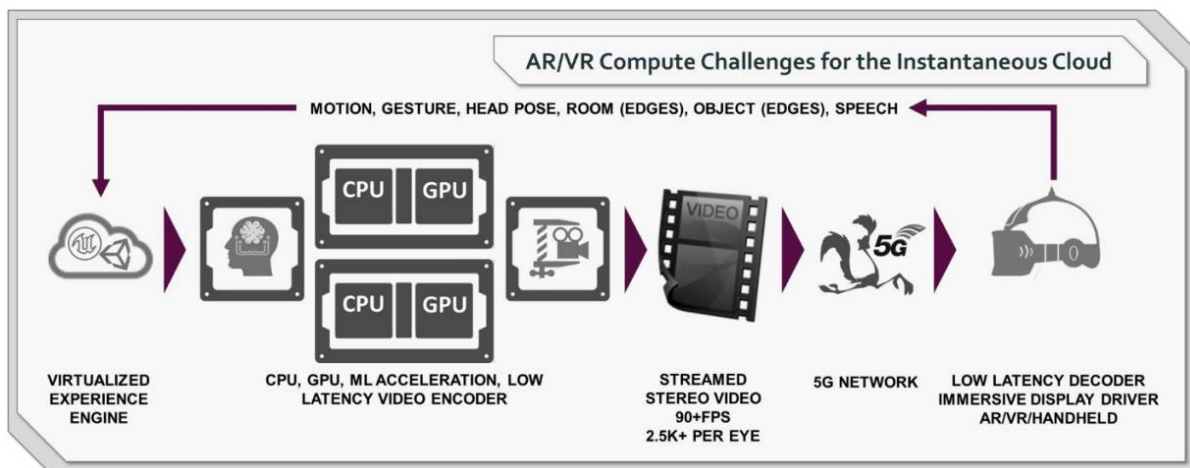
Povećani zahtjevi aplikacija virtualne stvarnosti će se nastojati postići s petom generacijom mobilne mreže. Boljim mrežnim parametrima poput boljeg kapaciteta, smanjenog kašnjenja i ostalih kritičnih točaka za kvalitetno iskustvo korištenja aplikacija virtualne stvarnosti, dostići će se iskustvo od kraja do kraja koje neće negativno utjecati na korisnika.

Na slici 17 je prikazana razina kašnjenja između uređaja koji koristi tehnologiju virtualne stvarnosti, odnosno aplikacije koje koriste tehnologiju virtualne stvarnosti, s elementima mreže pete generacije mobilne mreže. Može se uočiti da alokacijom potrebnih resursa na rubu za potrebe izvođenja aplikacija virtualne stvarnosti se postižu najmanja kašnjenja, odnosno ono iznosi od jedne do dvije milisekunde. Tolika razina kašnjenja je adekvatna za ljudski mozak da procesira virtualni svijet bez razvoja osjećaja mučnine. Također na slici 17, prikazane su razine kašnjenja između uređaja virtualne stvarnosti i elemenata koji su u jezgrenoj mreži operatori i elemenata koji su u javnoj internetskoj mreži, [32].



Slika 17. Prikaz razine kašnjenja između aplikacija virtualne stvarnosti i elemenata mreže pete generacije, [32]

S prethodno definiranim tehnologijama i novom infrastrukturom pete generacije mobilne mreže, ostvarit će se optimalno korištenje aplikacija virtualne stvarnosti. Korištenje aplikacije virtualne stvarnosti se slikovito može prikazati prema slici 18, [32].



Slika 18. Prikaz koraka pri korištenju aplikacija virtualne stvarnosti u petoj generaciji mobilne komunikacijske mreže, [33]

Nadalje, na slici 18 su prikazani koraci korištenja aplikacije koja se nalazi na nekom udaljenom poslužitelju. Na udaljenom poslužitelju se nalazi računalo koje je sposobno procesirati sve grafičke i računalne zadatke. Ti podaci se zatim pretvaraju u način podoban za prijenos medijem, odnosno kodiraju se. Podaci se zatim putem mreže pete generacije šalju do korisnika, odnosno do uređaja koji se koristi za potrebe aplikacija virtualne stvarnosti, [33].

6. OSJETLJIVOST APLIKACIJA VIRTUALNE STVARNOSTI NA NEODGOVARAJUĆE PERFORMANSE MREŽE

Kao i svaka aplikacija koja se koristi putem Internet mreže, tako i aplikacije koje korisnici koriste putem uređaja koji koriste tehnologiju virtualne stvarnosti, imaju određene točke osjetljivosti koje mogu degradirati korisničko iskustvo. Neke od tih točaka osjetljivosti su neodgovarajuće mrežne performanse. Kada performanse u mreži budu neadekvatne, onda iskustvo korištenja tih aplikacija može biti iznimno neugodno, čak i neupotrebljivo.

Kao što je već prije spomenuto, neadekvatna kvaliteta usluge vodi do neadekvatnog iskustva kvalitete. U pogledu virtualne stvarnosti, ako neka komponenta bude degradirana, ona može dovesti do iznimne mučnine. Ta mučnina može biti uzrokovana kašnjenjem iznad dopuštenih parametara (više od 15 milisekundi) ili na primjer, učitavanja videa ili dijela virtualnog svijeta prilikom okretanja kamere.

Neki od tih neodgovarajućih performansi su opisani u projektu *QoE4VR* koji se provodi na Fakultetu prometnih znanosti. Tamo je provedeno istraživanje u kojem su ispitanici dobili uređaj virtualne stvarnosti, odnosno takozvani HMD, te im je bilo prikazano par videa s različitim simuliranim neodgovarajućim performansama.

6.1. Utjecaj mrežnih performansi na korisničko iskustvo promjene rezolucije u aplikacijama virtualnoj stvarnosti

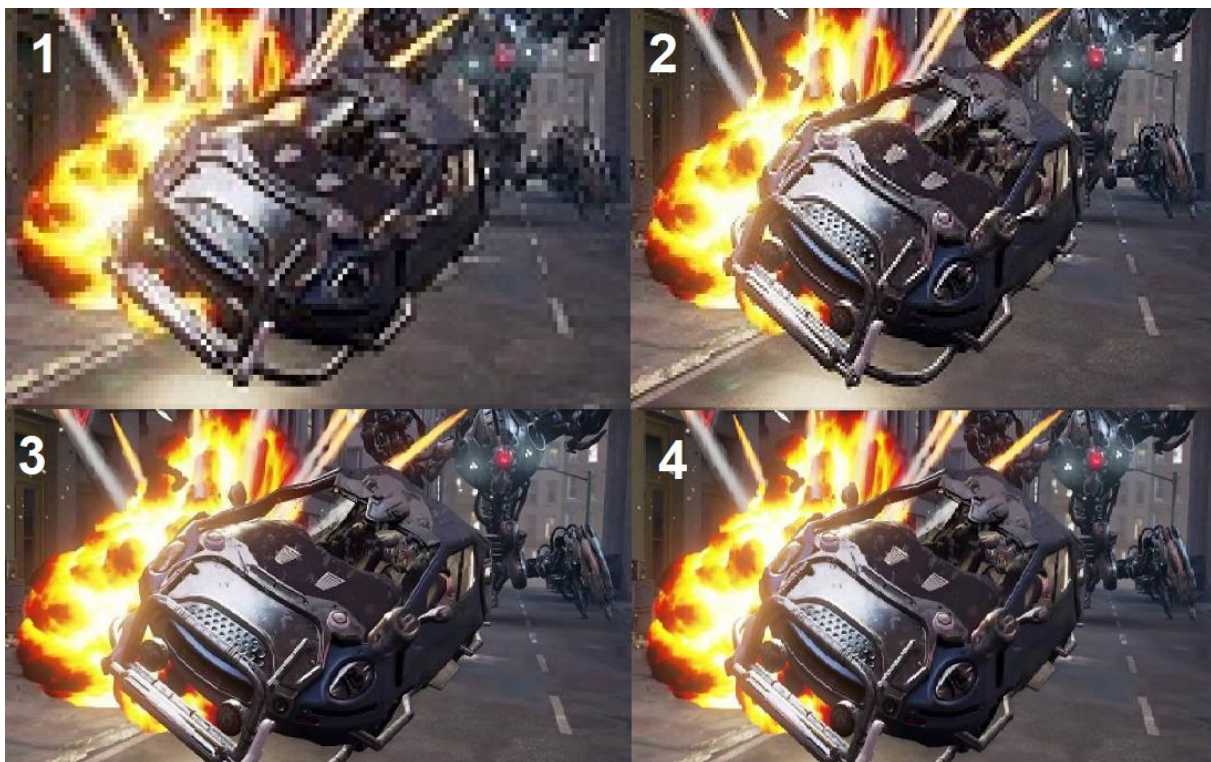
Prilikom korištenja aplikacija virtualne stvarnosti moguće su promjene rezolucije prikaza prilikom neodgovarajućih mrežnih performansi. Takve promjene mogu iznimno negativno utjecati na krajnjeg korisnika, odnosno mogu dovesti do neugodnosti ili čak mučnine zbog iznimno zamućene ili rascjepkane slike, odnosno video prikaza.

Prilikom istraživanja na projektu *QoE4VR*, provodio se i test degradacije rezolucije, odnosno promjene rezolucije prilikom gledanja videa u 360 stupnjeva.

6.1.1. Utjecaj promjene rezolucije u virtualnoj stvarnosti

S napretkom tehnologije virtualne stvarnosti i njenom primjenom u naočalama za virtualnu stvarnost, odnosno takozvani HMD uređajima, rezolucija prikaza slike se pokazala iznimno bitnim faktorom za korisničko iskustvo. Jedan od prvih komercijalnih uređaja virtualne stvarnosti, *Oculus Rift Development Kit 1*, imao je rezoluciju 1280x800 piksela, što bi značilo da je bilo dostupno 640x800 piksela po oku i kut gledanja od 90 stupnjeva. Kada se to pretvori u gustoću piksela, odnosno omjer piksela i kuta gledanja dobije se gustoća piksela u iznosu od 7 piksela po stupnju gledanja. Za usporedbu, ljudsko oko ima sposobnost detektiranja 60 piksela po stupnju gledanja. Takva gustoća piksela, kada se pretvori u rezoluciju, zove se rezolucija zjenice oka ili *retina rezolucija*, [34], [35].

S novijim uređajima virtualne stvarnosti ta se gustoća piksela povećava, jer s većom gustoćom piksela se omogućuje detaljniji prikaz stvari poput teksta, objekata u daljini i tako dalje. Kada se to pretvori u performanse mreže, na primjer gledanja video sadržaja ili igranja umreženih igara u virtualnoj stvarnosti, onda je jedna od metoda za rasterećenje mrežnih zahtjeva i degradacija rezolucije, [34], [35].



Slika 19. Prikaz utjecaja promjene rezolucije na prikaz u virtualnoj stvarnosti, [35]

Na slici 19 je prikazana degradacija rezolucije u virtualnoj stvarnosti poredane od najlošije do najbolje brojevima od jedan do četiri. Na gornje lijevom dijelu slike (broj 1) nalazi se slika s gustoćom piksela od 7,5 piksela po stupnju gledanja. Takav pikselizirani prikaz vide korisnici kada mrežne performanse (ili limitiranost hardvera) ograničuju kvalitetan prikaz krajnjem korisniku. Dalje, na gornje desnoj strani slike (broj 2) nalazi se slika s gustoćom piksela od 15 piksela po stupnju gledanja, gdje je već bolji prikaz korisniku te se malo bolje raspoznaju finiji detalji u virtualnome svijetu. Ovakav prikaz bi bio ekvivalentan dosadašnjem HD prikazu slike na konvencionalnim ekranima. Na donje lijevoj strani slike (broj 3) nalazi se prikaz s 30 piksela po stupnju gledanja gdje je već prikaz dovoljno dobar za korištenje bez većih smetnji, ekvivalent sadašnje *Full HD* kvalitete slike. I zadnje, na donjoj desnoj strani slike (broj 4) nalazi se kvaliteta prikaza s najboljom gustoćom piksela od 60 piksela po stupnju gledanja. Takvome se prikazu teži uvođenjem takozvane *retina* rezolucije, [35].

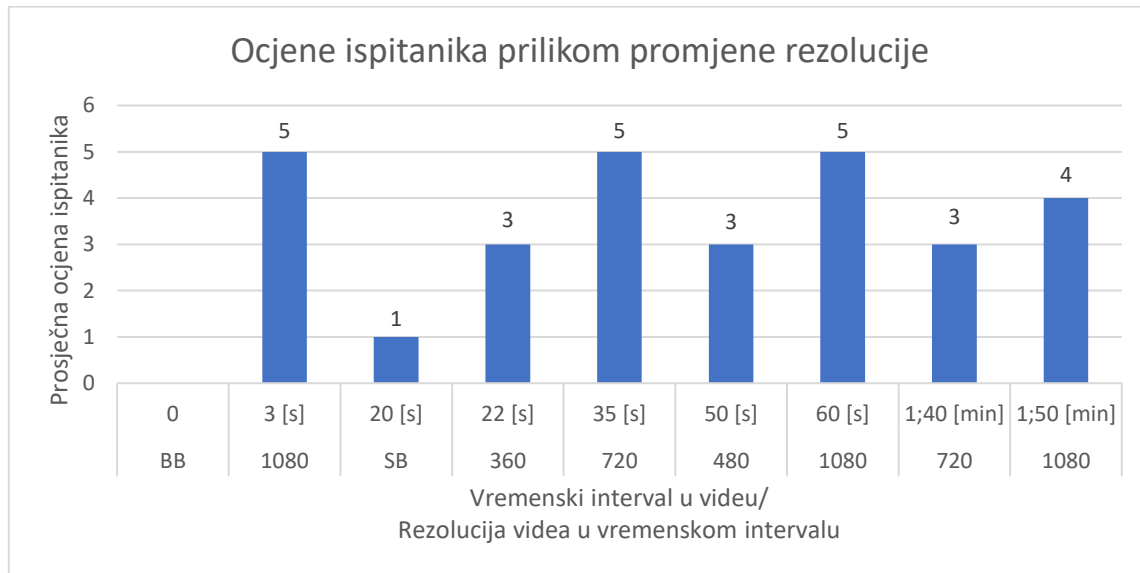
6.1.2. Rezultati istraživanja projekta QoE4VR

Prilikom prije spomenutog istraživanja kao dio projekta *QoE4VR*, ispitanici su imali priliku biti dio testiranja promjene rezolucije kao posljedice degradacije mrežnih performansi. Video prikaz odabran kao dio istraživanja je bio video snimljen u 360 stupnjeva te je prikazivao razgledavanje Buckinghamске palače. Ispitanici su imali priliku dati ocjenu od 1 do 5, ovisno o njihovoj razini ugodnosti gledanja videa u virtualnoj stvarnosti.

Video se odnosio na postupno mijenjanje kvalitete prikaza prilikom određenih vremenskih intervala, a također je postavljeno i učitavanje videa kako bi korisnicima bio stvoren umjetan osjećaj učitavanja videa. Potreba za time očitovala se u tome da se ispitanicima prikažu promjene u kvaliteti uslijed mijenjajućih mrežnih performansi, odnosno degradaciji ili poboljšanju prikaza videa.

Na grafikonu 1, prikazane su prosječne ocjene koje je dalo 20 ispitanika prilikom ispitivanja zadovoljstva prilikom utjecaja mijenjanja mrežnih performansi na video rezoluciju. Može se uočiti da ispitanici u prosjeku nisu dali ocjenu za oznaku *BB* koja je označavala *Black Screen Buffer* koji označavao učitavanje videa na samome početku prikazivanja videa dok je još na prikazu bila crnina. Korisnicima se prikazao krug u petlji koji označava učitavanje, te je bio tu kako bi se korisnicima simuliralo

učitavanje videa na mreži. Zatim se može uočiti kako je najmanju prosječnu ocjenu dobilo učitavanje prilikom reproduciranja videa, odnosno takozvani *Video Screen Buffer* koji se u istraživanju označava kraticom *SB*. Navedeno učitavanje bilo je postavljeno na dvadesetj sekundi reprodukcije videa te je iznimno negativno utjecalo na ispitanike.



Grafikon 1. Prikaz prosječne ocjene ispitanika prilikom promjene rezolucije
Izvor: [13]

Dalje, zanimljivo je pogledati da su prosječne ocjene od 3 do 5 bile za neke slučajeve drugačije od očekivanih. Rezolucija od 360p u dvadeset i drugoj sekundi videa, koja se smatra najlošijom, je imala istu ocjenu kao i rezolucija od 480p u pedesetj sekundi videa te rezolucija od 720p u vremenu od jedne minute i četrdeset sekundi. Tome treba pribrojiti subjektivan dojam ispitanika jer se rezolucija od 360p pojavila odmah nakon *SB* koji je iznimno negativno utjecao na ispitanike. Slično se može reći i za ostale slučajeve.

Ako je promjena rezolucije s niže na više, subjektivno lošije na bolju, onda je subjektivni dojam kod ispitanika bolji nego uslijed promjene rezolucije s više na nižu, a pogotovo kada je razlika u rezoluciji veća kao na primjer, s 480p na 1080p [13].

6.2. Utjecaj pada sličica po sekundi na korisničko iskustvo aplikacija virtualne stvarnosti

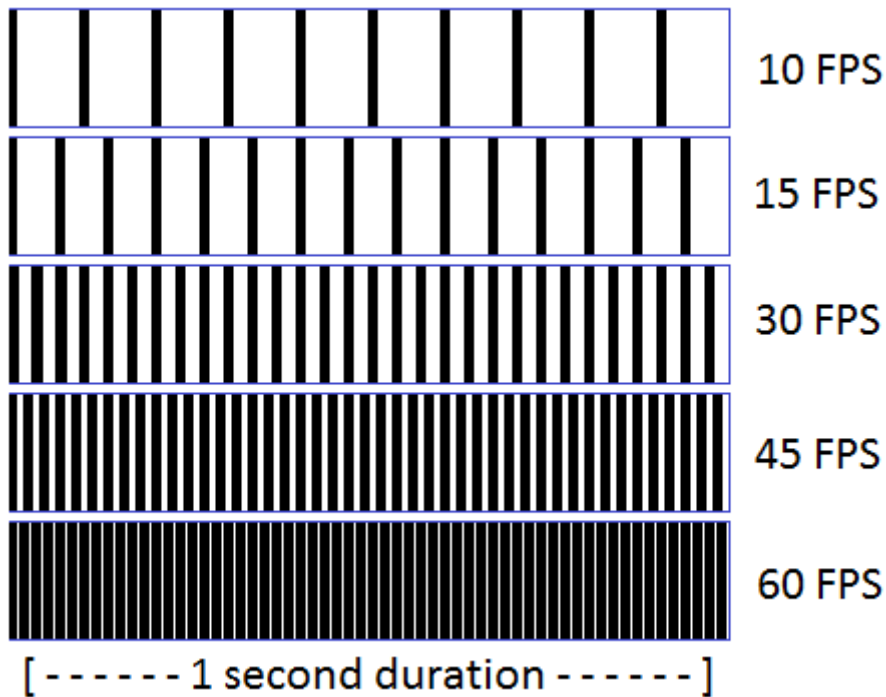
Sličice po sekundi (engl. *Frames per second* – FPS) je mjera kojom se mogu prikazati određene performanse neke aplikacije u svrhu kvalitete prikaza, odnosno

sličice po sekundi je brzina kojom se prikazuju slike na ekranu. Iznimno je bitan parametar u konvencionalnom iskustvu i iskustvu virtualne stvarnosti za korisničko zadovoljstvo korištenja neke aplikacije. Bitan je za video prikaz, a vrlo često se spominje i parametar kojim se ocjenjuje sposobnost nekog računala za obradu grafičkih i računarskih podataka koje neka video igra zahtijeva.

Također, kao što je i ranije spomenuto, u sklopu *QoE4VR* se provodilo istraživanje na korisničko iskustvo prilikom pada broja sličica u sekundi uslijed neodgovarajućih mrežnih performansi, [13], [36], [37].

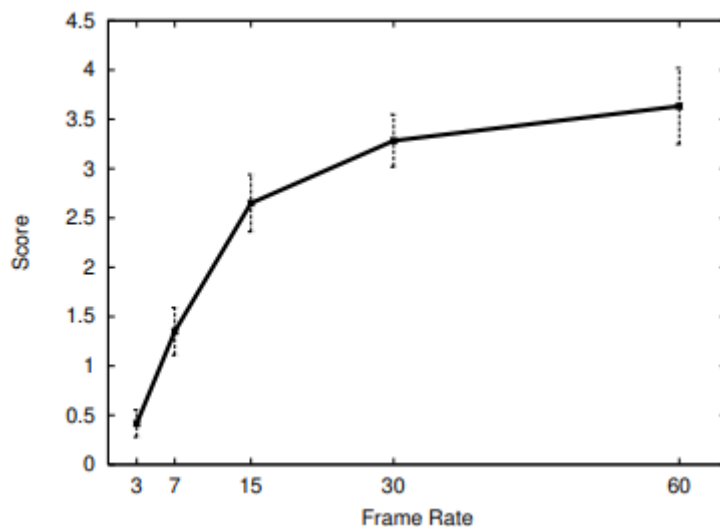
6.2.1. Utjecaj sličica po sekundi na korisničko iskustvo na primjeru video igara

Prema [36], broj prikazanih sličica po sekundi ima direktan utjecaj na korisničko iskustvo u video igrama. Takav utjecaj se može prevesti i na korisničko iskustvo prilikom promjene sličica u sekundi tijekom korištenja aplikacija u virtualnoj stvarnosti. Istraživanje prema izvoru [36] je pokazalo da su ispitanici s boljim performansama sličica po sekundi imali bolje rezultate nego ispitanici koji su imali lošije performanse. Takvi rezultati su posljedica toga da s većim brojem sličica po sekundi, korisnici prilikom aplikacija koje zahtijevaju od korisnika brze reakcije, imaju bolji prikaz tog virtualnog svijeta, [36].



Slika 20. Razlika između različitih iznosa sličica po sekundi, [37]

Prema slici 20 moguće je vidjeti koliko se sličica po sekundi prikazuje u vremenskom periodu od jedne sekunde. Na primjeru umrežene video igre, iznimno je velika razlika u uspješnosti između 60 sličica po sekundi i 30 sličica po sekundi. Za potrebe video igre koja nije umrežena, 30 sličica po sekundi je prihvatljivo. Prema slici 21 se može uočiti uspješnost korisnika prilikom igranja video igre u različitim iznosima sličica po sekundi, [36], [37].



Slika 21. Prikaz interakcije između uspješnosti unutar umrežene video igre i iznosa sličica po sekundi, [36]

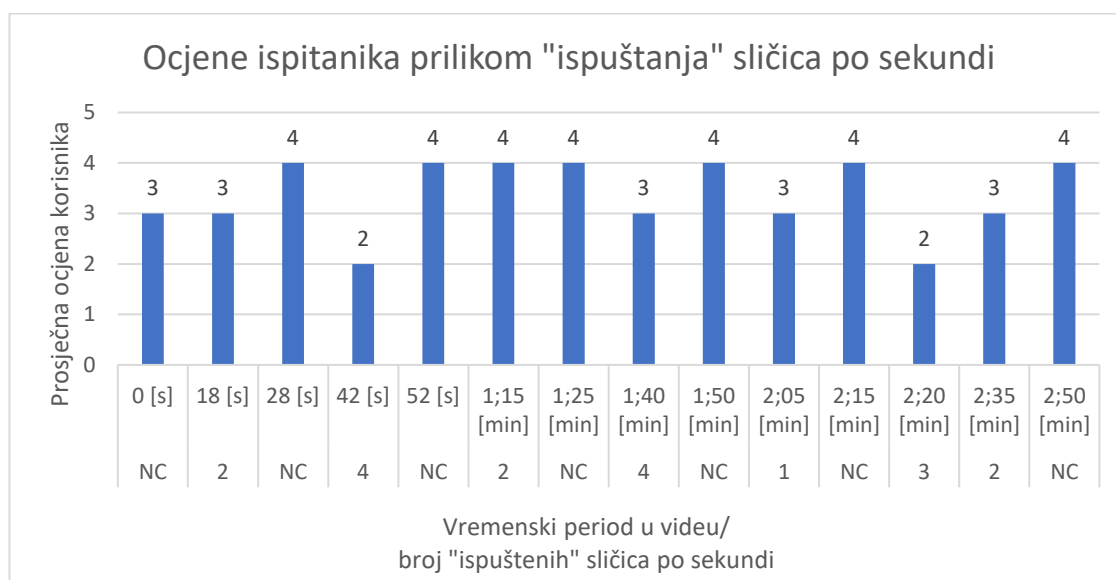
Što se tiče video igara i ostalih aplikacija u virtualnoj stvarnosti, one sežu prema cilju od 90 sličica po sekundi, zato što se ta granica smatra kao adekvatnom za duže sesije unutar svijeta virtualne stvarnosti, [38].

6.2.2. Rezultati istraživanja „ispuštanja“ sličica po sekundi prilikom neodgovarajućih mrežnih performansi

Također, kao dio istraživanja u sklopu projekta *QoE4VR* obavljalo se ispitivanje utjecaja takozvanog „ispuštanja“ sličica po sekundi prilikom neadekvatnih mrežnih performansi. Ukratko, to je pojava kojom se unutar slijeda sličica po sekundi uslijed neodgovarajućih mrežnih ili drugih performansi, ne pojavi određeni broj sličice. Tom pojavom se efekt prikaza čini iscjepkan te bitno utječe na kvalitetu iskustva korisnika.

U istraživanju se ispitanicima na pregled dao video koji je unutar određenog vremenskog perioda simulirao nepoželjnu pojavu ispuštanja sličica po sekundi. U određene vremenske intervale postavljena su ispuštanja sličica, a ona su rangirala od niti jednog ispuštanja, to jest, bez promjene i 4 ispuštanja sličica po sekundi.

Prema grafikonu 2 su prikazane prosječne ocjene ispitanika prilikom ispuštanja sličica po sekundi.



Grafikon 2. Odnos ocjena ispitanika prema broju ispuštenih sličica po sekundi unutar vremenskog perioda trajanja videa
Izvor: [13]

Zanimljivo je uočiti da je prosječna ocjena korisnika bila 4 od mogućih 5. Jedan od razloga je taj što se kod virtualne stvarnosti za optimalan prikaz treba omogućiti 90

sličica po sekundi što je mogući razlog zbog kojeg ispitanici nisu dali prosječnu ocjenu veću od 4.

Velike promjene u prosječnim ocjenama ispitanika dolaze kada se iz stanja *NC* koji označava *No Change*, odnosno stanje u kojem se nisu ispuštale sličice po sekundi. Najveću promjenu u prosječnim ocjenama ispitanika upravo označava prijelaz između stanja *NC* i stanja u kojem uslijed simuliranih neadekvatnih mrežnih performansi dolazi do ispuštanja sličica po sekundi. Na primjer, na prijelazu iz 41 sekunde u 42 sekundu dolazi do naglog ispuštanja sličica po sekundi te to predstavlja smetnju korisnicima.

Bitno je napomenuti da je upravo održavanje sličica po sekundi na adekvatnom nivou iznimno važno zbog reduciranja mogućnosti mučnine kod korisnika. Kao što je i bitno da se kašnjenje kod aplikacija virtualne stvarnosti svede na ispod 15 milisekundi, tako je i bitno da se održava adekvatan broj sličica po sekundi.

6.3. Utjecaj pada *bitrate*-a na korisničko iskustvo virtualne stvarnosti

Bitovi u sekundi (engl. *Bitrate*) je broj bitova po sekundi kojim se označava kvaliteta video i audio zapisa. Smatra se da što je veći *bitrate* nekog zapisa, onda je i kvaliteta tog zapisa bolje kvalitete. Također, *bitrate* određuje veličinu zapisa, koji se dobiva jednostavnim izračunom da je veličina zapisa jednaka umnošku iznosa *bitrate*-a i duljine trajanja zapisa [39].

Kao zadnji dio istraživanja u sklopu projekta *QoE4VR*, istraživao se utjecaj pada bitova u sekundi na korisničko iskustvo.

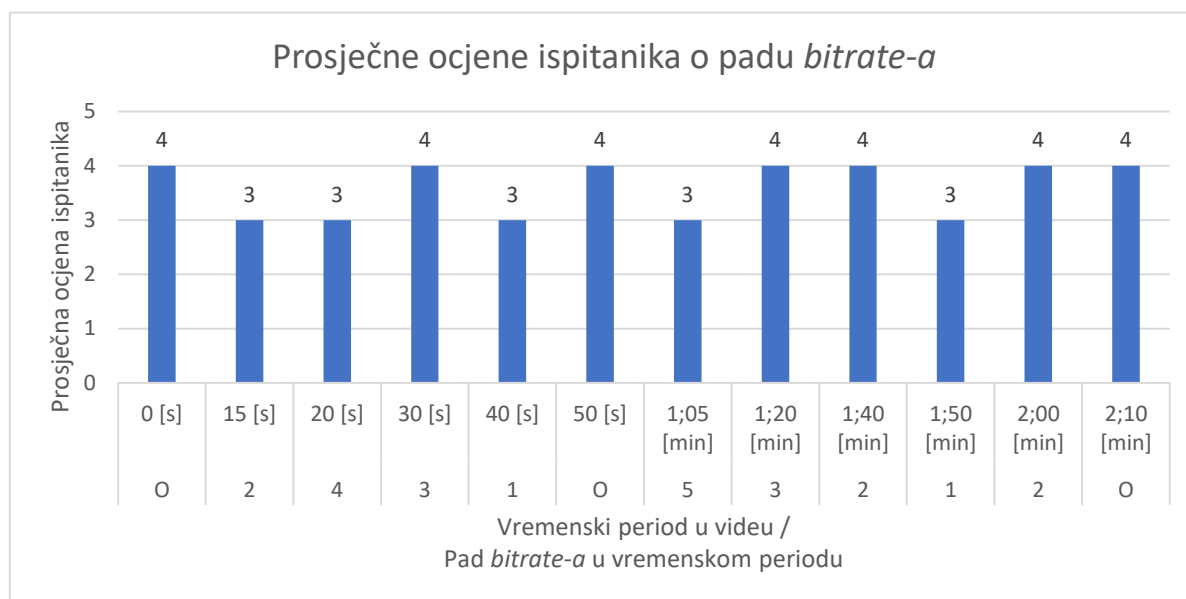
6.3.1. Bitrate u aplikacijama virtualne stvarnosti

Kao što je spomenuto, aplikacije virtualne stvarnosti zahtijevaju kapacitet za adekvatno korištenje. U potražnji kapaciteta utječe i *bitrate* u smislu da aplikacije s većim iznosom *bitrate*-a zahtijevaju i veći kapacitet zbog povećane kvalitete. Smanjeni *bitrate* utječe na kvalitetu prikaza slike tako da se, na primjer, spektar boja počne izlijevati te se slika može činiti mutnija nego što ona zaista jest. Pogotovo je to vidljivo na naočalama virtualne stvarnosti kada je prikaz puno bliži oku nego što je kod konvencionalnih zaslona, [39], [40].

Smanjenju zahtijeva *bitrate-a*, a u tom pogledu i kapaciteta, se dostiže korištenjem novih kompresijskih metoda. Jedna od tih metoda je i visoko učinkovito kodiranje videa (engl. *High Efficiency Video Coding* – HEVC), također poznat pod nazivom H.265. Ova metoda kompresije će omogućiti kvalitetniji prikaz uz manje gubitke *bitrate-a*, te će zahtijevati manji kapacitet. *Bitrate* se dijeli na varijabilni i konstantni.

6.3.2. Rezultati istraživanja

Unutar *QoE4VR* projekta se također provelo ispitivanje o korisničkom iskustvu prilikom smanjenja *bitrate-a* uslijed neodgovarajućih mrežnih performansi. Video zapis u 360 stupnjeva, koji je bio prikazan ispitanicima, imao je normalan *bitrate* od 8 Mb/s, a unutar nekih intervala bio se smanjivao u vrijednostima od 5 Mb/s do 1 Mb/s.



Grafikon 3. Prikaz odnosa prosječnih ocjena ispitanika i pada *bitrate-a* u vremenskom periodu.
Izvor: [13]

Prema grafikonu 3 se mogu vidjeti ocjene koje su ispitanici dali prilikom gledanja videa s uređajem virtualne stvarnosti. U prosjeku bi se moglo reći da korisnici općenito ili nisu vidjeli razliku u padu *bitrate-a* ili im nije smetala promjena. Utjecaj u odlučivanju može biti i da sadašnji uređaji virtualne stvarnosti još uvijek nemaju dovoljno razrađenu dubinu boja koja se dobije putem visokog iznosa *bitrate-a*.

Zanimljivo je promatrati porast ocjena u periodu od minute 1:50 do 2:00 kada se reprodukciju videa s jednim smanjenim *bitrate-om*, prebaci na reprodukciju videa s dva *bitrate-a* manje. Tu je prosječna ocjena s tri porasla na četiri. Na takvu ocjenu može utjecati i drugačiji kadar u videu. Kadar s više raznolikih boja je osjetljiv na smanjeni *bitrate* nego kadar s više istih boja. Štoviše, video s smanjenim *bitrate-om* izgleda „izmiješano“ zato što se objekti u videu zbog smanjene kvalitete prelijevaju te se gube finiji detalji.

7. ZAKLJUČAK

Napretkom tehnologije virtualne stvarnosti i mrežnih tehnologija poput pete generacije mobilne telefonije, korisnici će moći pristupiti novim virtualnim svjetovima. Novije izvedbe tehnologije virtualne i proširene stvarnosti će omogućiti udaljenu interakciju u poslovnim, edukacijskim i zabavnim sadržajima emulirajući fizičku prisutnost.

Očekuje se da će tržište virtualne i proširene stvarnosti porasti, te da će se novim komunikacijskim tehnologijama omogućiti veća razmjena podataka između korisnika. Pogotovo će to biti bitno za razne multimedijske sadržaje poput virtualnih sastanaka, video igara u virtualnoj stvarnosti te raznih drugih primjena.

Međutim, mrežni parametri poput kašnjenja, nedostatnog kapaciteta i drugih, čine neku od prepreka koje će se za optimalno korištenje tehnologije virtualne stvarnosti morati riješiti. Takvi parametri su adekvatni za sadašnje stanje aplikacija kojima se korisnici svakodnevno služe, ali daljnjim razvojem multimedijskog sadržaja morati će se raditi na unaprjeđenju mrežnih parametara.

Kako bi se dostigao potreban nivo mrežnih parametara za aplikacije u virtualnoj stvarnosti iznimno je bitno uvesti nove tehnologije koje to omogućuju. Tehnologije kao što su virtualizacija mrežnih funkcija, softverski definirane mreže i obrada podataka na rubu s višestrukim pristupom iznimno će biti u sklopu pete generacije mobilnih mreža kako bi omogućile optimalne mrežne performanse. Vrlo je bitno prebaciti što više resursa potrebnih za obradu podataka virtualne stvarnosti na rub.

Na kraju, potrebno je i optimizirati aplikacije virtualne stvarnosti kako bi bile spremne odgovoriti na neodgovarajuće mrežne performanse. Zbog korisničke kvalitete usluge bitno je primijeniti navedeno, jer su upravo korisnici i njihova zainteresiranost u nove tehnologije bitni za daljnji razvoj virtualne i proširene stvarnosti.

LITERATURA

- [1] Internet stranica: <https://ssvar.ch/definitions-and-characteristics-of-augmented-and-virtual-reality-technologies/> (Pristupljeno: srpanj, 2019).
- [2] Internet stranica: <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/what-is-virtual-reality.html> (Pristupljeno: srpanj, 2019).
- [3] Internet stranica: <https://www.realitytechnologies.com/virtual-reality/>. (Pristupljeno: srpanj, 2019).
- [4] Internet stranica: <https://www.engadget.com/2016/07/12/pokemon-go-augmented-reality/> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [5] Internet stranica: <https://blogs.cisco.com/sp/retail-and-ar-and-vr-5g-brings-it-home>. (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [6] Cisco: "*Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 White Paper*", veljača, 2019.
- [7] Internet stranica: <http://web.tecnico.ulisboa.pt/ist188480/cmuf/application.html> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [8] Internet stranica: <https://www.viar360.com/virtual-reality-market-size-2018/> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [9] Perkins Coie: "*2019: Augmented and Virtual Reality Survey Report*", 2019.
- [10] Internet stranica: <https://www.emarketer.com/content/virtual-and-augmented-reality-users-2019> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [11] The Farm51: "*Report on the current state of the VR market*", 2015.
- [12] Ericsson: "*Merged Reality: Understanding how virtual and augmented realities could transform everyday reality*", srpanj, 2017.

- [13] Matulin M., Mrvelj Š.: *Projekt QoE4VR*, Dostupno na: <https://www.fpz.unizg.hr/qoe4vr/index.php/2017/06/26/what-is-quality-of-experience-qoe/>. (Pristupljeno: srpanj, 2019).
- [14] Mrvelj Š.: "*Autorizirana predavnja iz kolegija Tehnologija telekomunikacijskog prometa I*", Zagreb, Fakultet Prometnih Znanosti, 2018.
- [15] Internet stranica: <https://www.techopedia.com/definition/2228/latency> (Pristupljeno: srpanj, 2019).
- [16] Internet stranica: <https://www.techopedia.com/definition/8553/network-latency> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [17] Internet stranica: <https://in.c.mi.com/thread-323126-1-1.html> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [18] Internet stranica: <https://howdoesinternetwork.com/2013/jitter> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [19] [Internet stranica: <https://www.pcworld.com/packet-loss> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [20] Internet stranica: <https://www.lifewire.com/how-to-fix-packet-loss-4176342> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [21] Internet stranica: <https://www.forcepoint.com/cyber-edu/packet-loss> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [22] Internet stranica: <https://www.comparitech.com/net-admin/minimize-packet-loss/> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [23] Internet stranica: <https://www.itpro.co.uk/broadband/30274/what-is-bandwidth> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [24] Internet stranica: <https://www.executionists.com/an-explanation-of-bandwidth/> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).

- [25] Internet stranica: <https://help.netflix.com/en/node/306> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [26] Internet stranica: <https://www.vidi.hr/Non-Tech/Hrvatska/Prosjecna-brzina-interneta-u-Hrvatskoj-je-6-4-Mbps> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [27] Internet stranica: <https://www.lanner-america.com/blog/reality-virtual-reality-networks-need-upgrading/> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [28] Internet stranica: https://www.infosysblogs.com/engineering-services/2019/01/ar-vr_technology_at_the_inters.html (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [29] Internet stranica: <https://www.lanner-america.com/blog/5-network-upgrades-will-enable-virtual-reality-augmented-mixed-reality-were-waiting/> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [30] Internet stranica: <https://www.rcrwireless.com/20180910/reader+forum/NFV-virtualized+acceleration-offloads#prettyPhoto> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [31] Internet stranica: <https://5g.co.uk/guides/5g-virtual-reality-and-augmented-reality/> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [32] Qualcomm: "*Augmented and Virtual Reality: the First Wave of 5G 'Killer' Apps*", 2017.
- [33] Solotko S.: "*The First Billion Users: Powering Virtual Reality with Advanced Video Encoding & Rendering*", TIRIAS Research, siječanj, 2018.
- [34] Internet stranica: <https://uploadvr.com/community-download-how-important-resolution-vr/> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [35] Internet stranica: <https://www.roadtovr.com/understanding-pixel-density-retinal-resolution-and-why-its-important-for-vr-and-ar-headsets/> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).

- [36] Claypool M., Claypool K., Damaal F.: "*The Effects of Frame Rate and Resolution on Users Playing First Person Shooter Games*", Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2006.
- [37] Internet stranica: <http://blog.logicalincrements.com/2014/06/frames-per-second-5-simple-tips-to-boost-your-fps/> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [38] Internet stranica: <https://help.irisvr.com/hc/en-us/articles/215884547-The-Importance-of-Frame-Rates> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [39] Internet stranica: <https://filmora.wondershare.com/video-editing-tips/what-is-video-bitrate.html> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).
- [40] Internet stranica: <https://blog.beamr.com/2016/10/28/immersive-vr-and-360-video-at-streamable-bitrates-are-you-crazy/> (Pristupljeno: kolovoz, 2019).

POPIS KRATICA

AR – Augmented Reality

CORD – Central Office Re-architected as a Datacenter

ETSI – European Telecommunications Standards Institute

FPS – Frames per Second

HD – High Definition

HD-VR – High Definition Virtual Reality

HEVC – High Efficiency Video Coding

HMD – Head-Mounted Display

MEC – Multi-access Edge Computing

MR – Mixed Reality

NFV – Network Functions Virtualization

QoE – Quality of Experience

QoS – Quality of Service

SD – Standard Definition

SDN – Software Defined Networking

UHD – Ultra High Definition

VNF – Virtual Network Function

VoIP – Voice over IP

VR – Virtual Reality

WLAN – Wireless Local Area Network

POPIS KORIŠTENIH SLIKA

Slika 1. Prikaz komponenti naočala za virtualnu stvarnost	4
Slika 2. Prikaz iz igre proširene stvarnosti, Pokemon GO	6
Slika 3. Prikaz spektra miješane stvarnosti.....	6
Slika 4. Prikaz generiranog prometa virtualne i proširene stvarnosti.....	8
Slika 5. Prikaz rasta prihoda na tržištu tehnologija umjetne stvarnosti.....	9
Slika 6. Rast korisnika virtualne i proširene stvarnosti u Sjedinjenim Američkim Državama	10
Slika 7. Prikaz udjela prihoda u AR i VR aplikacijama	11
Slika 8. Prikaz rezultata istraživanja.....	12
Slika 9. Prikaz kašnjenja u mrežnoj komunikaciji	14
Slika 10. Prikaz <i>jittera</i> prilikom transmisije	15
Slika 11. Prikaz nekih razloga gubitka paketa.....	16
Slika 12. Primjer korištenja kapaciteta kod malih i srednjih poslovnih korisnika.....	17
Slika 13. Zahtjevi za kapacitetom kod aplikacija virtualne stvarnosti	20
Slika 14. Interakcija između tehnologija koje će omogućiti kvalitetno iskustvo virtualne stvarnosti	20
Slika 15. Prikaz virtualizacije mrežnih funkcija u NFV	21
Slika 16. Prikaz MEC i CORD implementacije u mreži	23
Slika 17. Prikaz razine kašnjenja između aplikacija virtualne stvarnosti i elemenata mreže pete generacije	24
Slika 18. Prikaz koraka pri korištenju aplikacija virtualne stvarnosti u petoj generaciji mobilne komunikacijske mreže.....	25
Slika 19. Prikaz utjecaja promjene rezolucije na prikaz u virtualnoj stvarnosti.....	27
Slika 20. Razlika između različitih iznosa sličica po sekundi.....	31
Slika 21. Prikaz interakcije između uspješnosti unutar umrežene video igre i iznosa sličica po sekundi	31

POPIS KORIŠTENIH GRAFIKONA

Grafikon 1. Prikaz prosječne ocjene ispitanika prilikom promjene rezolucije.....	29
Grafikon 2. Odnos ocjena ispitanika prema broju ispuštenih sličica po sekundi unutar vremenskog perioda trajanja videa.....	32
Grafikon 3. Prikaz odnosa prosječnih ocjena ispitanika i pada <i>bitrate</i> -a u vremenskom periodu	34



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ završnog rada

pod naslovom **UTJECAJ MREŽNIH PARAMETARA NA KVALITETU**

APLIKACIJA U VIRTUALNOJ STVARNOSTI

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 5.9.2019 _____

Student/ica:

Luka Rašić

(potpis)