

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 6855

**ANALIZA SUBJEKTIVNIH I OBJEKTIVNIH MJERA  
KVALITETE MOBILNIH VIŠEKORISNIČKIH VIDEO POZIVA  
OSTVARENIH PUTEM TEHNOLOGIJE WEBRTC**

Nika Gibanica

Zagreb, lipanj 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 6855

**ANALIZA SUBJEKTIVNIH I OBJEKTIVNIH MJERA  
KVALITETE MOBILNIH VIŠEKORISNIČKIH VIDEO POZIVA  
OSTVARENIH PUTEM TEHNOLOGIJE WEBRTC**

Nika Gibanica

Zagreb, lipanj 2020.

Zagreb, 13. ožujka 2020.

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 6855

Pristupnica: **Nika Gibanica (0036506615)**  
Studij: Računarstvo  
Modul: Programsko inženjerstvo i informacijski sustavi  
Mentor: izv. prof. dr. sc. Lea Skorin-Kapov

Zadatak: **Analiza subjektivnih i objektivnih mjera kvalitete mobilnih višekorisničkih video poziva ostvarenih putem tehnologije WebRTC**

### Opis zadatka:

Projekt otvorenog koda WebRTC (engl. Web Real-Time Communication) razvijen je kako bi omogućio stvarnovremensku audio-video komunikaciju unutar internetskog preglednika. WebRTC omogućuje povezivanje web preglednika u mrežu ravnopravnih korisnika (engl. peer to peer, P2P), bez obzira na vrstu uređaja koji se koristi. Komunikacija se također može ostvariti preko središnje komunikacijske točke (engl. Multipoint Control Unit, MCU). Vaš zadatak je provesti ispitivanje iskustvene kvalitete u slučaju konferencijskog video poziva ostvarenog putem pametnih telefona između više od dvoje sudionika korištenjem tehnologije WebRTC. Nadalje, potrebno je tijekom poziva mjeriti parametre na razini mreže (npr. gubitci, kašnjenje, propusnost) i prikupljati parametre na razini aplikacije (npr. rezolucija, brzina kodiranja) te analizirati utjecaj tih parametara na subjektivne ocjene iskustvene kvalitete prikupljene od strane sudionika. Svu potrebnu literaturu i uvjete za rad osigurat će Vam Zavod za telekomunikacije.

Rok za predaju rada: 12. lipnja 2020.

# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Tehnologija WebRTC .....	3
2.1. Razvoj WebRTC-a .....	3
2.2. Arhitektura sustava .....	6
2.3. Komunikacija .....	7
2.4. WebRTC API.....	9
2.4.1. MediaStream.....	11
2.4.2. PeerConnection.....	11
2.4.3. DataChannel.....	12
3. Iskustvena kvaliteta.....	13
3.1. Kvaliteta usluge .....	13
3.2. Čimbenici koji utječu na iskustvenu kvalitetu .....	15
4. Ispitivanje iskustvene kvalitete mobilnog višekorisničkog poziva ostvarenog tehnologijom WebRTC u stvarnim uvjetima.....	19
5. Analiza rezultata.....	24
5.1. Analiza subjektivnih ocjena sudionika.....	24
5.2. Analiza degradacija video poziva .....	26
5.3. Objektivne mjere.....	27
5.3.1. Grupa 1.....	28
5.3.2. Grupa 2.....	29
5.3.3. Grupa 3.....	29
5.3.4. Grupa 4.....	30
5.4. Rasprava .....	31
6. Zaključak.....	35
Literatura.....	36
Sažetak .....	39
Summary .....	40
Popis slika.....	41

## Pojmovnik

**Flash** – softver koji omogućuje uključivanje animacija i interaktivnog sadržaja u web stranice.

**HTML** (engl. *HyperText Markup Language*) - prezentacijski jezik za izradu Web stranica.

**HTTP** (engl. *HyperText Transfer Protocol*) - protokol za komunikaciju između poslužitelja i klijenta u obliku zahtjeva i odgovora preko TCP veze.

**ICE** (engl. *Interactive Connectivity Establishment*) - protokol zasnovan na algoritmu koji je iterativni proces u kojem dva uređaja, oba smještena iza NAT-a, razmjenjuju adrese u pokušaju međusobne komunikacije.

**JavaScript** - skriptni programski jezik koji omogućava korisnicima dinamičku interakciju s Web aplikacijom.

**Jingle** - proširenje protokola XMPP koji se koristi za upravljanje VoIP sjednicama i videokonferencijama preko IP mreža.

**JSON** (engl. *JavaScript Object Notation*) - format za razmjenu podataka, služi za reprezentaciju JavaScript objekata u obliku string.

**MOS** (engl. *Mean Opinion Score*) - mjera koja predstavlja ukupnu kvalitetu sustava; aritmetička sredina prema svim pojedinačnim vrijednostima na unaprijed definiranoj skali koju subjekt dodjeljuje njegovom mišljenju o izvedbi kakvoće sustava.

**NAT** (engl. *Network Address Translation*) - proces pretvaranja IP adrese koja se koristi u jednoj mreži u IP adresu koja se koristi u drugoj mreži.

**SIP** (engl. *Session Initiation Protocol*) - signalizacijski protokol za pokretanje, modificiranje i raskid sjednice.

**STUN** (engl. *Session Transversal Utilities for NAT*) - mrežni protokol koji omogućava klijentima koji se nalaze iza jednog ili više NAT usmjerenja pronalazak njegove javne IP adrese, vrstu NAT-a iza kojeg se nalazi i vanjski port dodijeljen od strane NAT uređaja kao i originalni port unutarnjeg računala.

**TURN** (engl. *Traversal Using Relays around NAT*) - protokol koji omogućava uređajima iza NAT usmjerenja da primaju podatke preko TCP ili UDP veza.

## 1. Uvod

U današnje vrijeme prijenos podataka i informacija lakši je nego ikada, a skup tehnologija WebRTC (*Web Real-Time Communication*) pruža dodatno olakšanje korisnicima. Omogućuje komunikaciju u stvarnom vremenu koristeći internetski preglednik bez drugih posrednika. Tehnologija nudi podršku za audio i video komunikaciju, ali moguće je prenijeti bilo kakav skup podataka između korisnika.

Cilj tehnologije WebRTC je pronaći efikasno rješenje za stvarno-vremensku komunikaciju između uređaja kombinirajući postojeće metode i primjenjujući ih na internetske preglednike [1]. Potrebno je omogućiti korisnicima audio i video komunikaciju u visokoj kvaliteti i realnom vremenu bez obzira na operacijski sustav ili uređaj koji koriste.

Prva verzija WebRTC-a nastala je kao programska podrška otvorenog koda 2011. godine unutar standarda organizacija W3C (*World Wide Web Consortium*) i IETF (*Internet Engineering Task Force*) [2]. WebRTC se može primijeniti kao dodatak mnogim web-aplikacijama budući da je API (engl. *Application Programming Interface*) dostupan u JavaScriptu. Prijenos audio i video sadržaja odvija se po načelima sustava s ravnopravnim sudionicima (engl. *peer-to-peer*). Danas većina popularnih preglednika poput Google Chrome-a, Mozilla Firefox-a i Opere podržava ovu vrstu tehnologije što pogoduje korisnicima koji žele na jednostavan način ostvariti komunikaciju s obitelji, prijateljima i kolegama ne koristeći neki drugi posrednik i ne morajući instalirati poseban računalni program ili nadogradnju za internetski preglednik. Početkom 2019. godine Transparency Market Research objavio je izvješće u kojem predviđa da će WebRTC tržište porasti do vrijednosti od 55 milijardi dolara do 2026. godine s prosječnom godišnjom stopom rasta od 17,9% [23]. U izvješću se također predviđa porast globalne potražnje za WebRTC tehnologijom, prvenstveno zbog sve većeg prepoznavanja njenog potencijala u sektorima kao što su telekomunikacije, IT, e-trgovina i Internet stvari (engl. *Internet of Things, IoT*).

Cilj ovog rada je predstaviti i analizirati subjektivne ocjene kvalitete mobilnog višekorisničkog video poziva ostvarenog tehnologijom WebRTC te objektivne metrike kvalitete videa. Za analizu iskustvene kvalitete provest će se ispitivanje tijekom kojeg će se prikupiti subjektivne ocjene za pojedine slučajeve koji se razlikuju u vrijednostima parametara mobilnog višekorisničkog poziva.

Rad se sastoji od 5 poglavlja. Sljedeće poglavlje govori o tehnologiji WebRTC. Uz povijesni razvoj opisana je i arhitektura sustava te način odvijanja komunikacije putem tehnologije WebRTC. U trećem poglavlju opisan je pojam iskustvene kvalitete. U četvrtom poglavlju opisani su načini mjerenja objektivnih metrika kvalitete videa i korišteni alati prilikom provođenja ispitivanja iskustvene kvalitete mobilnog višekorisničkog video poziva ostvarenog tehnologijom WebRTC. U posljednjem poglavlju provodi se analiza i prikaz prikupljenih podataka. Nakon toga slijedi zaključak, popis literature te sažetci na hrvatskom i engleskom jeziku.

## 2. Tehnologija WebRTC

WebRTC (engl. *Web Real-Time Communication*) besplatan je projekt otvorenog koda koji omogućuje jednostavnu komunikaciju u stvarnom vremenu korištenjem Web preglednika. Osnovni zahtjevi prilikom korištenja WebRTC tehnologije su pristup Internetu te audio i video komponente (mikrofon i kamera) kojima je omogućen pristup Javascript API-ju. Potrebno je da WebRTC aplikacije obavljaju nekoliko stvari [4]:

- preuzimanje audio, video i drugih podataka od klijenta,
- prikupljanje informacija o mreži (IP adrese i priključci) i razmjena informacija s drugim klijentima,
- koordiniranje signalizacijske komunikacije za prijavljivanje pogrešaka te pokretanje i zatvaranje sjednica,
- razmjena informacija o mogućnostima medija i klijenta (razlučivost, kodeci),
- slanje audio, video i drugih podataka.

WebRTC nije zasebna tehnologija, već kolekcija standarda i protokola. Protokol za signalizaciju nije striktno definiran, već je moguće odabrati neki od postojećih protokola (SIP, Jingle i sl.) ili napisati vlastiti [5]. Time WebRTC pruža fleksibilnost implementacije komunikacijskih usluga u raznim topologijama (*point-to point*, *multi-to-many* ili *Multipoint-Conferencing Unit*), a po prvi put je omogućena izravna audio i video komunikacija u stvarnom vremenu između Web preglednika.

### 2.1. Razvoj WebRTC-a

Godinu dana nakon izdanja prve inačice Web preglednika Google Chrome, 2009. godine javila se ideja za tehnologiju WebRTC [11]. U to vrijeme Chrome-ov tim uočio je da ne postoji zadovoljavajuće rješenje za komunikaciju u stvarnom vremenu (RTC). Tada se komunikacija preko Weba odvijala korištenjem tehnologije Flash ili dodataka (engl. *plugin*), što je značilo



nisku kvalitetu i komplikacije prilikom instaliranja podrške za različite preglednike i operacijske sustave.

U svibnju 2010. godine kompanija Google kupila je tvrtke On2 i Global IP Solutions (GIPS) čime je započeo razvoj tehnologije WebRTC [13]. Tvrtka On2 razvila je niz video kodeka (Video Partition structured video codecs, VP8), a tvrtka GIPS razvijala je programsku podršku (engl. software) za audio i video. Spajanjem njihovih komponenti s JavaScript sučeljem te izbacivanjem audio i video kodeka zaštićenih patentom nastalo je rješenje za uspostavu komunikacije u stvarnom vremenu u pregledniku, bez korištenja dodataka, instaliranja pogreške ili nabavljanja licenci. Uz podršku standardizacijskih tijela W3C i IETF tehnologija se nastavila razvijati, a 2011. izgrađena je prva implementacija tehnologije WebRTC.

WebRTC tehnologija nova je metoda za prijenos podataka, a iako se razlikuje od klasične VoIP (*Voice over Internet Protocol*) tehnologije, može biti njen nasljednik. WebRTC, kao i klasične VoIP usluge, pruža mogućnost slanja audio sadržaja preko mreže, no ove dvije tehnologije u nekoliko se stvari drugačije (slika 2.1) [12].

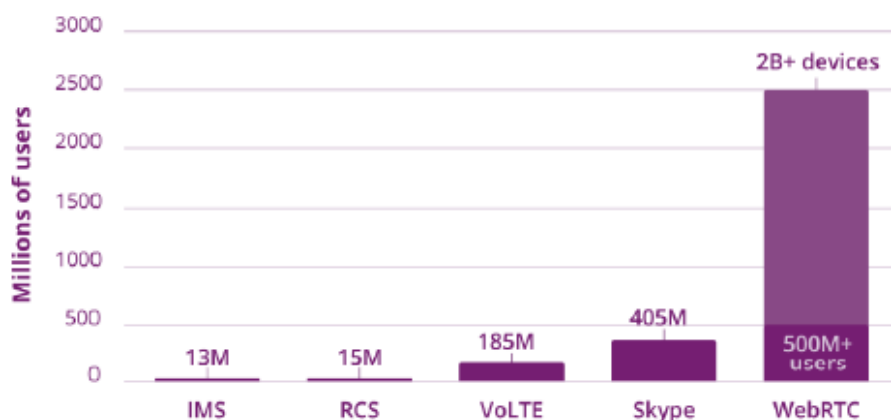
	<b>VoIP</b>	<b>WebRTC</b>
<b>Signalizacijski protokol</b>	SIP ili H.323	nije definiran
<b>Prijenos medija</b>	RTP/RTCP	RTP/RTCP
<b>Sigurnost</b>	SRTP za SIP, H.235 za H.323	SRTP
<b>NAT</b>	STUN/TURN/ICE za SIP, H.450.x za H.323	STUN/TURN/ICE
<b>Video kodek</b>	H.263, H.264	VP8
<b>Audio kodek</b>	G.7xx verzije	G.711, iLBC, iSAC

**Slika 2.1.** Razlika između implementacije klasične VoIP usluge i usluge koja se temelji na tehnologiji WebRTC [12]

Tijekom godina WebRTC stekao je popularnost, a posebno je važna 2016. godina kada bilježi znatan porast popularnosti. Pet godina nakon prve implementacije kompanija Google objavila je prikupljene podatke o korištenju i raširenosti WebRTC-a [15]:

- 2 milijarde Chrome preglednika koji koriste WebRTC,
- 1 milijarda minuta WebRTC audio/video poziva tjedno u pregledniku Chrome,
- 0.1% cjelokupnog web prometa,
- 1200 kompanija i projekata baziranih na tehnologiji WebRTC,
- 5 milijardi mobilnih aplikacija koje uključuju WebRTC.

Ovi podaci dokazuju da se WebRTC koristi mnogo više od bilo kojih prijašnjih VoIP tehnologija, a taj značajni porast prikazan je stupčastim dijagramom na slici 2.2.



**Slika 2.2.** Broj korisnika VoIP tehnologija pet godina nakon uvođenja tehnologije (2016) [15]

WebRTC je danas svugdje oko nas. Tehnologija je otvorenog koda te time besplatna i dostupna svima i stoga ju koriste brojne aplikacije. Tehnologiju WebRTC podržavaju svi poznati preglednici kao što su Google Chrome, Mozilla Firefox, Microsoft Edge, Opera i Safari, a neke od najpoznatijih aplikacija koje koriste WebRTC su [14]:

- Google Hangouts,
- Facebook Messenger,
- Discord,
- Houseparty,
- Whereby,
- Snapchat,

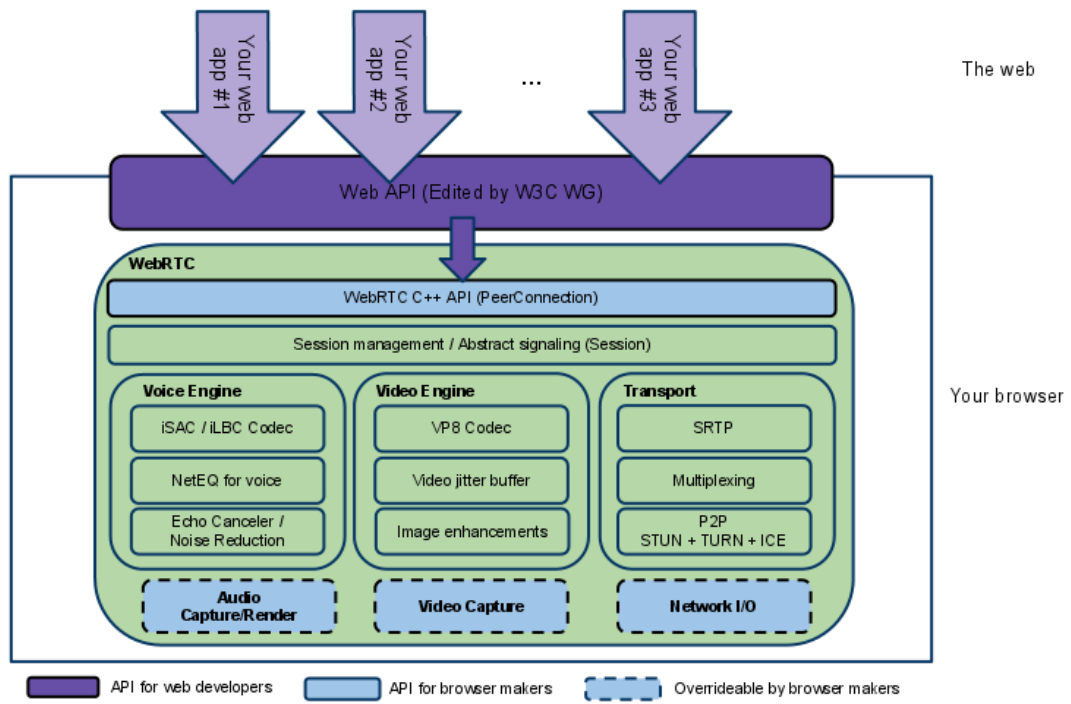
- GoToMeeting,
- Amazon Chime.

Korištenje WebRTC aplikacije postaje sve jednostavnije te nastaje sve više inovativnih aplikacija koje koriste WebRTC. Veliki značaj za rast popularnosti WebRTC-a imaju društvene mreže, ali i sve napredniji mobilni uređaji dostupni široj javnosti. Izvješće „*WebRTC Market Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2017 – 2025*“ navodi da će tržište WebRTC rješenja doseći vrijednost od 81,52 milijarde dolara do 2025. godine [13].

## 2.2. Arhitektura sustava

Za ispravan rad WebRTC koristi brojne tehnologije i protokole [7]. Cjelokupna arhitektura dijeli se na 2 sloja (slika 2.3.):

- sloj vezan za Web, Web aplikacije i Web API koji koriste Web programeri
- sloj koji je upravlja C++ API-jem i *peer-to-peer* vezom



Slika 2.3. Arhitektura WebRTC-a (slika preuzeta sa [7])

Web API je sučelje za razvoj Web aplikacije koji koristi treća strana. WebRTC C++ API je mehanizam koji koriste Web aplikacije za izbjegavanje korištenja dodataka u komunikaciji u stvarnome vremenu [7].

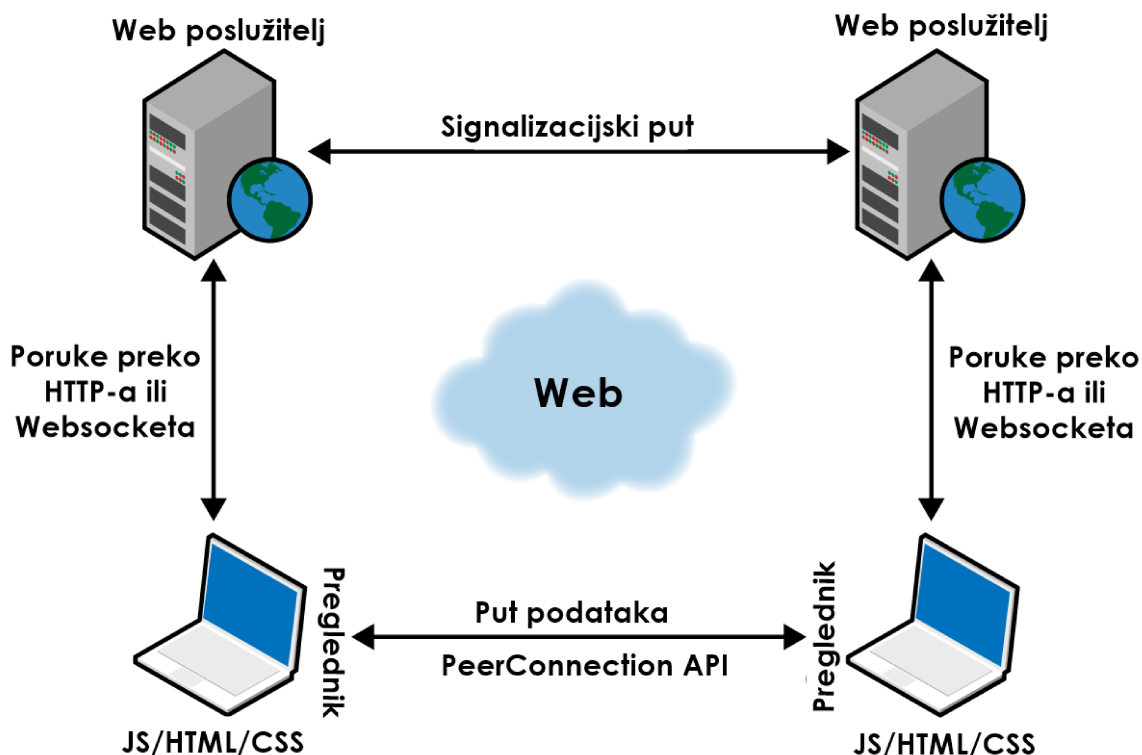
Glasovni mehanizmi su komponenta vezana za audio medij i uspostavu veze od zvučne kartice do mreže i između korisnika. Mogući audio kodeci su iSAC, iLBC i Opus. NetEQ je dinamički spremnik za spremanje dolaznih paketa u slučaju kolebanja kašnjenja u mreži i algoritam koji se koristi za prikrivanje negativnih učinaka varijacije kašnjenja i gubitka paketa te na taj način osigurava da kašnjenje bude što je moguće manje, zadržavajući pri tome najvišu kvalitetu zvuka. Video mehanizam služi kao okvir za video medij - od kamere do mreže i od mreže do zaslona. Transport (sjednica) sadrži komponente potrebne za sjednicu - međuspremnik za slučaj kolebanja kašnjenja u mreži, *peer-to-peer* komunikacijske komponente, STUN (*Simple Traversal of UDP (User Datagram Protocol) through NAT*)/TURN (*Traversal Using Relays around NAT*), RTP (*Real-Time Protocol*) te mehanizme za prikrivanje grešaka i smanjenje kašnjenja [7].

### 2.3. Komunikacija

Prijenos sadržaja tehnologijom WebRTC odvija se po načelima sustava s ravnopravnim sudionicima (engl. *peer-to-peer communication*) [1]. To su decentralizirani sustavi međusobno povezanih sudionika bez hijerarhijske organizacije ili centralnog koordinatora. Nakon što se klijenti povežu, podaci se prenose vezom između klijenata te ne putuju preko poslužitelja. Kako bi takva komunikacija bila ostvariva, WebRTC mora omogućiti internetskim preglednicima pristup medijskim sadržajima, pronaći put u mreži kojim bi se komunikacija odvila, razmijeniti podatke o medijskim uređajima, preglednicima, specifikacijama uređaja, lokaciji mreže i druge podatke između sudionika komunikacije te povezati sudionike *peer-to-peer* vezom pomoću objekta *RTCPeerConnection*.

Arhitektura WebRTC-a inspirirana je SIP (*Session Initiation Protocol*) trapezoidom (slika 2.4.). U tom modelu oba Internet preglednika pokreću web aplikaciju preuzetu s web poslužitelja, a signalizacijske poruke koriste se za uspostavu i prekid komunikacije među njima.

Te poruke prenose se protokolom HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) ili WebSocket protokolom preko poslužitelja koji ih može izmijeniti po potrebi.



Slika 2.4. WebRTC trapezoid [6]

PeerConnection omogućuje podacima da ne putuju preko poslužitelja, već direktno između preglednika. Dva web poslužitelja mogu komunicirati koristeći standardni signalizacijski protokol poput SIP-a ili *Jingle*-a ili mogu koristiti vlastiti signalizacijski protokol. U najčešćem slučaju oba preglednika pokreću istu web aplikaciju te tada trapezoid postaje trokut [6].

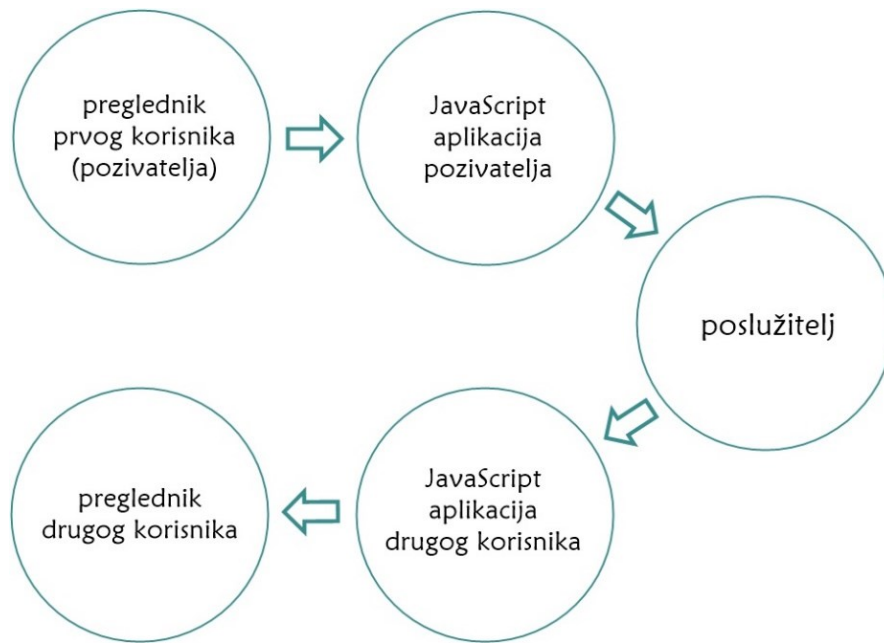
WebRTC web aplikacija (najčešće pisana u HTML-u ili JavaScript-u) komunicira s poslužiteljima preko standardiziranog sučelja za programiranje aplikacija (API) koji omogućuje ispravno korištenje i kontrolu poslužiteljskih funkcija u stvarnom vremenu. Web aplikacija može s poslužiteljima komunicirati ili proaktivno (npr. pretraživanje mogućnosti preglednika) ili reaktivno (npr. dobivanje obavijesti koje generira poslužitelj) [6].

Jednom kad se korisnik spoji na web aplikaciju, ona mu omogućuje povezivanje s drugim korisnicima uz razmjenu podataka poput liste podržanih audio i video koda. Ovaj se proces naziva signaliziranje i pregovaranje (engl. *Signaling and Negotiation*). Ipak, ponašanje tog procesa nije u potpunosti definirano, tj. programer može obaviti razmjenu podataka između korisnika na bilo koji način [1].

Podatke je moguće razmijeniti internetskim protokolom SDP (*Session Description Protocol*) tekstualnim porukama u formatu ključ-vrijednost. Razmjena poruka traje sve dok sudionici komunikacije ne predlože parametre koje svi podržavaju jer razmjena prve poruke ne znači nužno postavljanje parametara na vrijednosti koje obje strane podržavaju. Poruke se razmjenjuju preko web aplikacije na način da primjerice, prvi korisnik šalje SDP poruku sa svojim predloženim postavkama, drugi korisnik primi tu poruku i nakon tog stvara i šalje novu SDP poruku sa svojim predloženim postavkama koje ne moraju biti usklađene s postavkama prvog sudionika; nakon određenog broja razmijenjenih poruka proces može završiti uspješno ili neuspješno, a u slučaju neuspješnog procesa korisnicima se javlja kako nije moguće uspostaviti komunikaciju [1].

## **2.4. WebRTC API**

Dizajn API-ja WebRTC-a predstavlja izazov jer zahtjeva kontinuirani tok podataka kroz mrežu u stvarnom vremenu kako bi se omogućila izravna komunikacija između dva preglednika bez ikakvih drugih posrednika. Takav put podataka instancira se kroz niz interakcija (slika 2.5.).



**Slika 2.5.** Put podataka između korisnika

Ideja izvedbe WebRTC-a jest da se u potpunosti specificira kako kontrolirati prijenos medija dok se istovremeno način prijenosa signala pokušava ostaviti aplikacijskom sloju arhitekture. Razlog je taj da različite aplikacije mogu koristiti različite standardizirane signalne protokole ili čak razviti vlastite protokole [6].

Opis sjednice predstavlja važnu informaciju koja treba biti prenesena te specificira prijenos te informacije kao i tip podatka, format i sve konfiguracijske parametre potrebne za uspostavu putanje. Početna ideja bila je da se opis sjednice prenese u obliku SDP-a (*Session Description Protocol*), no IETF predložio je standard *JavaScript Session Establishment Protocol* (JSEP) koji pruža sučelje potrebno aplikaciji kako bi podržala lokalne i udaljene opise sjednica u kojima se pregovaranje odvija kroz bilo kakav signalizacijski mehanizam, kao i standardizirani način komunikacije s ICE (*Interactive Connectivity Establishment*) automatom [8].

JSEP pristup povjerava isključivo aplikaciji da vodi brigu o pokretanju signalizacijskog automata – aplikacija mora pozvati odgovarajući API u točnom trenutku, konvertirati opise sjednice i pripadajuće ICE informacije u definirane poruke signalizacijskog protokola [6].

Uzimajući u obzir sve prethodno navedene uvjete, API je dizajniran koristeći tri koncepta:

- `MediaStream`,
- `PeerConnection`,
- `DataChannel`.

### 2.4.1. `MediaStream`

`MediaStream` je apstraktni prikaz stvarnog toka podataka. To je zapravo naziv za radnje upravljanja podatkovnim tokom kao što su prikazivanje sadržaja toka, njegovo snimanje ili slanje udaljenom ravnopravnom korisniku. Definicija `MediaStream`a može se i proširiti tako da predstavlja tok podataka koji dolazi od udaljenog člana (udaljeni tok) ili se šalje prema udaljenom članu (lokalni tok) [6].

`LocalMediaStream` predstavlja tok podataka iz lokalnog uređaja (npr. kamera, mikrofon i sl.). Kako bi kreirala i koristila lokalni tok podataka, web aplikacija mora zatražiti pristup od korisnika funkcijom `getUserMedia()` te odrediti tip medija (audio ili video) čiji pristup zahtijeva. Izbornik uređaja u sučelju preglednika služi kao mehanizam za odobrenje ili odbijanje pristupa, a kada aplikacija završi s radom može sama ukinuti pristup pozivom funkcije `stop()` u `LocalMediaStream`u. *SRTP (Secure Real-Time Transport Protocol)* se koristi za prijenos podataka zajedno s informacijama kontrolnog protokola *RTCP (RTP Control Protocol)* koje se koriste za nadzor statistike prijenosa.

U višemedijskoj komunikaciji svaki se medij obično prenosi posebnom RTP sesijom s vlastitim *RTCP (Real-Time Transport Control Protocol)* paketima. Kako bi se rješio problem potrebe za otvaranjem nove NAT (*Network Address Translatin*) rupe za svaki tok podataka, IETF trenutno radi na mogućnosti da se smanji broj vrata transportnog sloja koje koriste aplikacije bazirane na RTP-u s ciljem kombiniranja višemedijskog prometa u jednu RTP sesiju [6].

### 2.4.2. `PeerConnection`

Proces povezivanja korisnika može biti kompleksan, stoga su kreatori WebRTC-a morali razviti jednostavan API pomoću kojeg programer ne mora voditi brigu o svim mrežnim



detaljima [1]. Najvažnija ulazna točka u WebRTC API-ju jest objekt `PeerConnection` koji omogućuje dvama korisnicima da komuniciraju direktno preko preglednika. Predstavlja povezanost s udaljenim ravnopravnim korisnikom koji najčešće pokreće još jednu instancu iste JavaScript aplikacije. Komunikacija se koordinira putem signalizacijskih kanala koje pruža skriptni kod stranice putem web poslužitelja (npr. `XMLHttpRequest` ili `WebSocket`) [6]. Nakon instanciranja `PeerConnection` objekta potrebno je implementirati funkcije koje upravljaju događajima (engl. *event handlers*) koji se pokreću u procesu uspostavljanja i odvijanja komunikacije između korisnika. Osim upravitelja događajima, `PeerConnection` sadrži i funkcije koje pokreću proces stvaranja veze između ravnopravnih korisnika. Funkcija `createOffer` inicira kreiranje SDP poruke za slanje potencijalnom sudioniku komunikacije, a povratna vrijednost funkcije je objekt koji sadrži podatke u uspjehu ili neuspjehu operacije [1]. Jednom kada su ravnopravni korisnici povezani, medijski tokovi (lokalno povezani s `MediaStream` objektima) mogu se slati izravno do udaljenog preglednika.

### 2.4.3. DataChannel

`DataChannel` API dizajniran je da omogući običnu uslugu prijenosa dopuštajući preglednicima da razmjenjuju generičke podatke dvosmjernom *peer-to-peer* metodom. Standardizacija u sklopu IETF-a donijela je opći konsenzus da se ne-medijskim tipovima podataka upravlja SCTP-om (*Stream Control Transmission Protocol*) enkapsuliranom u DTLS (*Data Transport Layer Security*). Enkapsulacija pruža sveobuhvatno rješenje kao i pouzdanost, provjeru autentičnosti i zaštitu prijenosa. SCTP je odabran zato što izvorno podržava više tokova s pouzdanim ili djelomično pouzdanim načinima isporuke te pruža mogućnost otvaranja nekoliko nezavisnih tokova. Svaki tok predstavlja jednosmjerni logički kanal kojim se isporučuje niz poruka koji može biti poslan po redu ili nasumično. Poredak isporuke poruka sačuvan je samo u slučaju da su sve poruke poslone po redu istim tokom. Ipak, `DataChannel` API osmišljen je kao dvosmjerni što znači da se svaki `DataChannel` sastoji od snopa dolaznih i odlaznih SCTP tokova.

### 3. Iskustvena kvaliteta

Razvojem tehnologije mrežni operatori i davatelji usluga posvetili su se i kvaliteti usluge koju pružaju korisnicima. Informacije o kvaliteti usluge važne su kako bi se optimizirao kapacitet, topologija mreže, ali i cijena usluge, a utječe i na uvođenje novih usluga te planiranje ulaganja [17].

Kvaliteta usluge može se mjeriti na dva vrlo različita, ali usko povezana načina. S jedne strane su svojstva mreže koja određujemo mrežnim parametrima poput kašnjenja (engl. *delay*), kolebanja kašnjenja (engl. *jitter*), gubitaka paketa, propusnosti i stopa pogreške. To su objektivni parametri jer ih je jednostavno izmjeriti i imaju neku brojčanu vrijednost te se lako uspoređuju. Objektivne parametre još se naziva i mjerilom kvalitete usluge (engl. *Quality of Service, QoS*). S druge strane je korisnik i njegovi zahtjevi za uslugom. Većina korisnika nije upoznata s pojmovima objektivnih mjerenja, već ih zanima samo zadovoljava li aplikacija njihove potrebe i očekivanja. Korisnici ocjenjuju kvalitetu aplikacije na temelju subjektivnih parametara kao što su zadovoljstvo, pouzdanost, lakoća korištenja, trošak, dizajn i sl. Objektivni i subjektivni parametri međusobno su povezani jer korisnik će rijetko biti zadovoljan ukoliko su uvjeti mreže loši pa stoga mrežni operatori moraju raditi na poboljšanju QoS parametara kako bi korisnici bili zadovoljni, ali isto tako, kvaliteta usluge nije jedino što utječe na zadovoljstvo korisnika uslugom.

#### 3.1. Kvaliteta usluge

Pojam kvaliteta usluge (engl. *Quality of Service, QoS*) u literaturi ima nekoliko definicija, a prema ITU-T preporuci E.800 definira se kao „*skup kvalitativnih zahtjeva kolektivnog ponašanja jednog ili više objekata*“ [18]. Različite aplikacije zahtijevaju različitu kvalitetu usluge – kod nekih je potrebno minimalno kašnjenje i vrijeme odziva, a kod drugih je možda važnija kvaliteta slike. Postoji 5 kategorija QoS parametara prema kojima se određuje što je za pojedinu vrstu aplikacije odličje kvalitete (tablica 3.1.).

**Tablica 3.1.** Kategorije QoS parametara [19]

Kategorija	Parametri
Performanse	kašnjenje brzina
Format	rezolucija videa format spremljenih podataka način kompresiranja broj okvira
Sinkronizacija	razlika u početku audio i video sekvenci
Trošak	cijena povezivanja i prijenosa podataka trošak autorskih prava
Korisnik	subjektivna ocjena kvalitete slike i zvuka

Kvaliteta usluge može se promatrati na više razina: percepcijska razina, razina aplikacije i razina mreže (slika 3.1.). Korisnik ili aplikacija određuju zahtjeve, a komunikacijski sustav dužan je te zahtjeve zadovoljiti, pri tome zahtijevajući određene mrežne resurse [19].



**Slika 3.1.** Razine QoS-a [19]

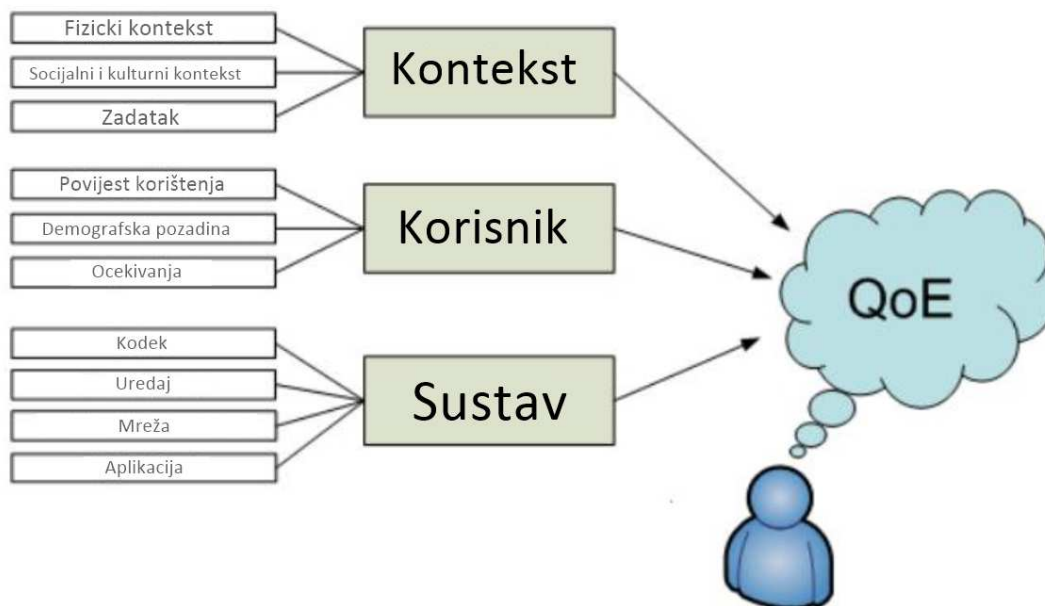
Odnos između razina kvalitete usluge je vrlo kompleksan: uz nepotpuna saznanja o percepcijskim karakteristikama korisnika potrebno je preslikati aplikacijske QoS parametre u mrežne. Važan element je translacija korisničkih i aplikacijskih QoS parametara poput, na primjer, kvalitete video signala – opisuje se brzinom prijenosa okvira (30 okvira/s), veličinom okvira (visina × širina, izraženo u pikselima), bojom (bit/piksel) i sličnim karakteristikama, u mrežne QoS parametre kao što su propusnost (veličina paketa, propusni opseg), karakteristike prometa (gubitak paketa, kolebanje kašnjenja, kašnjenje “od kraja do kraja”) i karakteristike performansi (korekcija grešaka, fragmentacija).

### **3.2. Čimbenici koji utječu na iskustvenu kvalitetu**

Iskustvena kvaliteta (engl. *Quality of Experience, QoE*) naziv je za mjeru procjene zadovoljstva korisnika proizvoda ili usluge. Rezultat je ispunjenja očekivanja korisnika u odnosu na proizvod ili uslugu te značajno ovisi o korisnikovim osjećajima, spoznajama, ponašanju i trenutnom stanju [16]. Temelji se na društvenoj psihologiji, kognitivnoj znanosti, ekonomiji i inženjerstvu, a usmjerena je na holističko razumijevanje cjelokupnih ljudskih zahtjeva u svrhu poboljšanja usluge.

Tri su skupine čimbenika koje utječu na iskustvenu kvalitetu (slika 3.2.)[20]:

- čimbenici sustava,
- korisnički čimbenici,
- kontekstni čimbenici.



**Slika 3.2.** Primjeri čimbenika koji utječu na iskustvenu kvalitetu [20]

**Čimbenike sustava** čine sva svojstva i karakteristike sustava koje utječu na iskustvenu kvalitetu korisnika. Odnose se na prijenos podataka, kodiranje, prostor za pohranu, prikaz, ali i komunikaciju između proizvođača i korisnika [16]. Čimbenici sustava mogu se podijeliti u četiri podkategorije:

- sadržajni - vrsta sadržaja i pouzdanost,
- medijski – čimbenici konfiguracije (kodiranje, brzina uzorkovanja...),
- mrežni – čimbenici prijenosa podataka mrežom (kašnjenje, propusnost...),
- povezani s uređajem – specifikacije sustava, značajke uređaja (razlučivost zaslona, veličina prikaza...).

**Korisnički čimbenici** su sve karakteristike korisnika koje utječu na njegovu subjektivnu ocjenu kvalitete usluge. Ove karakteristike mogu opisivati demografsku i socio-ekonomsku pozadinu, fizičko i psihičko stanje korisnika ili korisnikovo trenutno emocionalno stanje. Korisnički čimbenici mogu utjecati na percepciju na dvije razine: viša i niža razina kognitivne obrade. Na nižoj razini obrade, karakteristike vezane za fizičko, emocionalno i psihičko stanje

korisnika imaju važnu ulogu, dok na višoj razini obrade očekivanja, potrebe i spoznaja imaju važniju ulogu.

**Kontekstni čimbenici** su trenutne karakteristike okoline i sustava tijekom korištenja usluge. Ovi čimbenici mogu se razmatrati pojedinačno ili u kombinaciji, a dijele se na:

- fizički kontekst – svojstva lokacije i prostora, uključujući kretanje unutar i između lokacija,
- vremenski kontekst – doba dana, trajanje i učestalost korištenja usluge ili sustava,
- ekonomski kontekst – cijena, vrsta pretplate, proizvođač/pružatelj usluge,
- kontekst zadatka – vrsta zadatka, količina zadataka,
- društveni kontekst – prisutnost drugih ljudi, uključenost drugih ljudi u iskustvo, osobni odnosi, tehnički kontekst – odnos sustava u fokusu i drugih povezanih sustava i usluga uključujući uređaje, aplikacije, mrežu i dr.

Iskustvena kvaliteta važan je podatak prilikom projektiranja sustava stoga ocjenjivanje iskustvene kvalitete mora biti temeljeno na utjecajnim čimbenicima koji mogu biti kontrolirani i mjerljivi. Prilikom ispitivanja i mjerenja mišljenja korisnika najčešće se koristi prosječna ocjena mišljenja (engl. *Mean Opinion Score, MOS*) kao ljestvica kvantificiranja korisničkog iskustva jer se oznake ljestvice jednostavno mogu prevesti u brojeve (npr. ocjene od „loše“ do „odlično“ mogu se prikazati brojevima od 1 do 5). MOS ljestvica nije potpuno pouzdano rješenje za ocjenu iskustvene kvalitete jer korisnici često različito interpretiraju pojedine ocjene. Ako se uzorak s promijenjenim uvjetom od interesa uspoređuje s izvornim uzorkom, tada se MOS vrijednosti često nazivaju DMOS (engl. *Degradation MOS*). Obje ljestvice, MOS i DMOS, su diskretne, a korisnik prilikom odgovaranja može odabrati jednu od 5 vrijednosti (Tablica 3.2.) [21].

**Tablica 3.2.** MOS i DMOS ljestvice

<b>Ocjena</b>	<b>MOS</b>	<b>DMOS</b>
<b>1</b>	Vrlo loše	Izraženo pogoršanje, jako smeta
<b>2</b>	Loše	Podnošljivo, ali smeta
<b>3</b>	Prihvatljivo	Primjetno pogoršanje, malo smeta
<b>4</b>	Dobro	Čujno pogoršanje, ali ne smeta
<b>5</b>	Izvršno	Nečujno pogoršanje

## 4. Ispitivanje iskustvene kvalitete mobilnog višekorisničkog poziva ostvarenog tehnologijom WebRTC u stvarnim uvjetima

Na kvalitetu usluge temeljene na WebRTC tehnologiji utječu razni čimbenici, a mjerenje iskustvene kvalitete većinom se odvija u laboratorijskim uvjetima gdje su ti čimbenici kontrolirani. Ipak, stvarni uvjeti u kojima korisnici koriste uslugu često se razlikuju od onih u laboratoriju. Cilj provedenog ispitivanja jest identificirati i analizirati čimbenike koji utječu na iskustvo korisnika i njihovo zadovoljstvo uslugom tijekom korištenja usluge u stvarnim uvjetima.

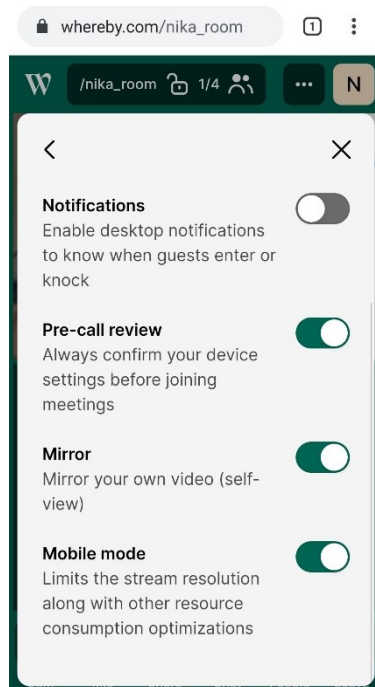
Ispitivanje iskustvene kvalitete mobilnog višekorisničkog poziva ostvarenog tehnologijom WebRTC provedeno je testiranjem 2 scenarija korištenjem aplikacije Whereby<sup>1</sup>. Ispitanici su podijeljeni u grupe po 2 člana, a u svakoj sjednici sudjelovao je i treći član – provoditelj ispitivanja. Svaki ispitanik koristio je vlastiti Android uređaj kojim se spojio putem bežične WiFi mreže ili korištenjem vlastitih mobilnih podataka na Internet te putem preglednika Google Chrome otvorio aplikaciju Whereby. Ovime je osigurano da svaki ispitanik ima stvarne uvjete za korištenje usluge.

Testni scenariji razlikovali su se u jednoj postavki aplikacije Whereby (slika 4.1.): tijekom prvog scenarija mobilna opcija (engl. *mobile mode*) u aplikaciji je uključena, a tijekom drugog scenarija isključena. Mobilna opcija ograničava rezoluciju i time optimizira korištenje resursa.

---

<sup>1</sup> [whereby.com](https://whereby.com)





**Slika 4.1.** Napredne postavke aplikacije Whereby

Ispitanici su tijekom ispitivanja za svaki scenarij bili dužni učiniti sljedeće:

1. Pokrenuti preglednik Google Chrome te se spojiti u određenu Whereby sobu putem vlastitog mobilnog uređaja.
2. U postavkama Whereby aplikacije odabrati odgovarajuću opciju (mobile mode uključen ili isključen).
3. U drugoj kartici preglednika otvoriti `chrome://webrtc-internals`.
4. Sudjelovati u višekorisničkom videopozivu u trajanju od 3 minute.
5. Nakon završetka videopoziva preuzeti log datoteke (*dump*) na kartici `chrome://webrtc-internals`.
6. Prekinuti komunikaciju i zatvoriti preglednik.
7. Ispuniti upitnik za odgovarajući scenarij.
8. Nakon provedenog ispitivanja proslijediti preuzete log datoteke ispitivaču.

Upitnik za pojedini scenarij sastoji se od dvije skupine pitanja. Prva skupina pitanja (slika 4.2.a) odnosi se na zadovoljstvo korisnika pojedinim aspektima aplikacije – audio kvaliteta, vide

kvaliteta, sinkronizacija audio i video komponenti te ukupna kvaliteta. Druga skupina pitanja (slika 4.2.b) odnosi se na moguće smetnje prilikom korištenja usluge poput zamućenja slike, pojave blokova u slici, zamrzavanja videa i nerazumljivog govora drugih korisnika te učestalost pojavljivanja tih smetnji.

Ocijenite u kojoj ste mjeri zadovoljni korištenom aplikacijom i sljedećim aspektima?

	5- Odlično	4 – Vrlo dobro	3 – Dobro	2 – Loše	1 – Jako loše
Audio kvaliteta					
Video kvaliteta					
Audio-video sinkronizacija					
Ukupna kvaliteta					

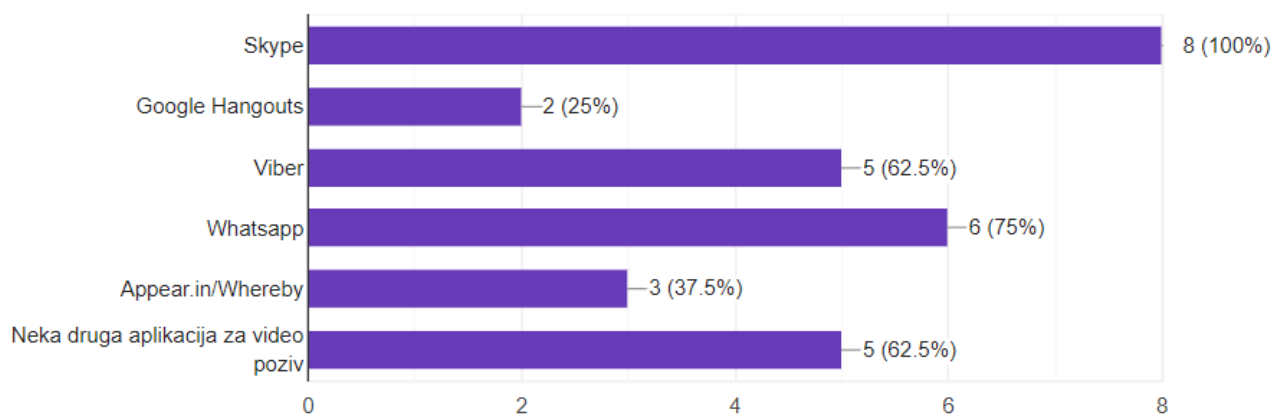
**Slika 4.2. a)** Skupina pitanja o zadovoljstvu korisnika

Jeste li primijetili sljedeće smetnje?

	Niti jednom	Jednom	Dva puta	Nekoliko puta	Često
Zamućena slika					
Blokovi u slici					
Zamrzavanje videa					
Nerazumljiv govor kod drugih sudionika					

**Slika 4.2. b)** Skupina pitanja o smetnjama prilikom korištenja usluge

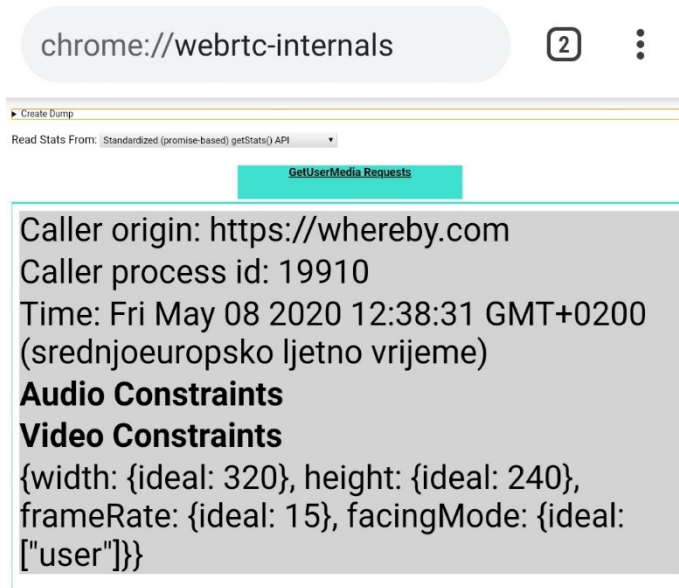
U ispitivanju je sudjelovalo 8 osoba (4 žene i 4 muškarca). Najmlađi ispitanik imao je 20 godina, a najstariji 54 godine. Polovica korisnika u posljednjih 30 dana koristila je aplikacije za video poziv često (2-3 puta tjedno), a druga polovica rijetko (1-3 puta mjesečno). Za uspostavu poziva do sada su koristili i pametni telefon i računalo, a polovica ih je ranije koristila audiovizualni poziv s više od dva sudionika. Aplikacije koje su sudionici prethodno koristili za uspostavu audiovizualnih poziva prikazane su na slici 4.3.



**Slika 4.3.** Aplikacije za audiovizualni poziv koje su sudionici prethodno koristili

Prije provođenja ispitivanja svi ispitanici dobili su upute o postupku ispitivanja i primjer upitnika te su ispitivanju pristupili dobrovoljno. Svaki sudionik ispitivanja nalazio se u vlastitom domu te koristio vlastiti mobilni uređaj i bio spojen na mrežu putem Wi-Fi konekcije ili mobilne mreže, a ispitivanje je za pojedinu grupu trajalo prosječno 20 minuta što uključuje uspostavu poziva, razgovor u trajanju od 3 minute, preuzimanje log datoteka, ispunjavanje upitnika te ponavljanje istog postupka za drugi testni slučaj.

Za praćenje tijeka WebRTC sjednice korištena je unutarnja kartica preglednika Google Chrome `chrome://webrtc-internals` (slika 4.3.). WebRTC internals sadrži podatke o aktivnim WebRTC sjednicama, a moguće je podatke preuzeti u obliku log datoteke u JSON formatu za kasniju analizu [22].



**Slika 4.4.** WebRTC internals

Za obradu i vizualizaciju webrtc-internals podataka korištena je usluga testRTC<sup>2</sup>.

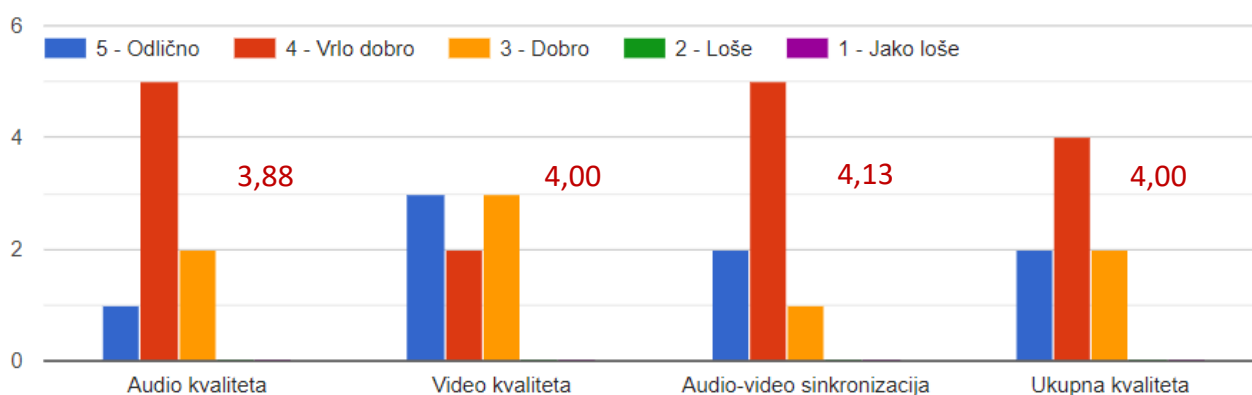
---

<sup>2</sup> [testrtc.com](https://testrtc.com)

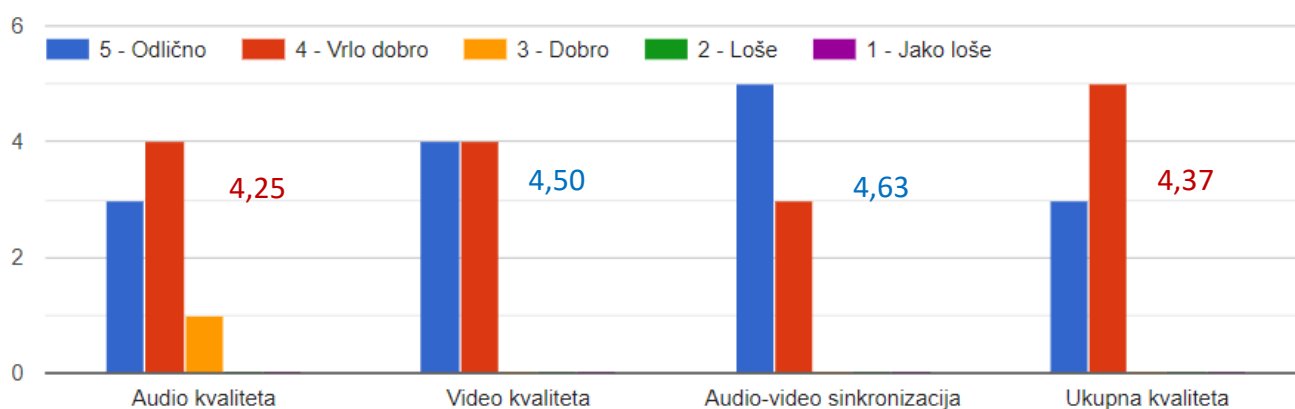
## 5. Analiza rezultata

### 5.1. Analiza subjektivnih ocjena sudionika

Na slikama 5.1. prikazane su subjektivne ocjene sudionika koje prikazuju njihovo zadovoljstvo audio kvalitetom, video kvalitetom, audio-video sinkronizacijom te ukupnom kvalitetom tijekom prvog testnog slučaja prilikom kojeg je uključen mobilni način u aplikaciji Whereby (slika 5.1.a) i drugog testnog slučaja tijekom kojeg je mobilni način isključen (slika 5.1.b).



Slika 5.1. a) Grafički prikaz distribucija subjektivnih ocjena korisnika za TS1



Slika 5.1. b) Grafički prikaz distribucija subjektivnih ocjena korisnika za TS2

Audio kvaliteta za TS1 ocijenjena je prosječnom ocjenom 3,88, a većina sudionika ocijenila ju je ocjenom 4 (vrlo dobro) dok ocjene niže od 3 (dobro) nije bilo. Za TS2 audio kvaliteta ocijenjena je prosječnom ocjenom 4,25, a iako je najveći udio ocjena 4 i nema ocjene manje od 3, broj ocjena 5 (odlično) je veći nego za TS1.

Video kvaliteta ocijenjena je s 4,00 u prosjeku za TS1. Jednak broj sudionika ocijenio je video kvalitetu za TS1 ocjenama 3 i 5, a nešto manji broj sudionika ocjenom 4. Nižih ocjena nije bilo. Za TS2 video kvaliteta ocijenjena je visokom prosječnom ocjenom 4,50 – polovica sudionika ocijenila je video kvalitetu ocjenom 5, a druga polovica ocjenom 4. Nižih ocjena nije bilo.

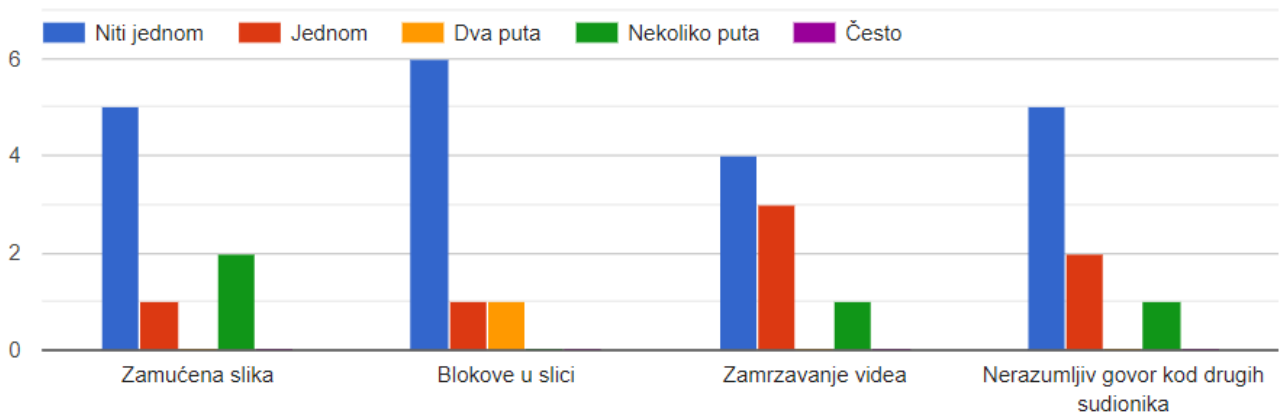
Audio-video sinkronizaciju sudionici su ocijenili prosječnom ocjenom od 4,13 za TS1 te prosječnom ocjenom 4,63 za TS2. Većina sudionika audio-video sinkronizaciju tijekom TS1 ocijenila je ocjenom 4, a niže ocjene od 3 nije bilo. Prosječna ocjena audio-video sinkronizacije za slučaj TS2 najviša je prosječna ocjena od svih mjera u oba testna sličaja jer ju je većina sudionika ocijenila ocjenom 5, a ostali ocjenom 4.

Ukupnu kvalitetu audio-video poziva tijekom TS1 sudionici su ocijenili prosječnom ocjenom 4,00, a većina dodijeljenih ocjena je 4 dok ocjene manje od 3 nije bilo. Za TS2 prosječna ocjena ukupne kvalitete je 4,37, također je većina dodijeljenih ocjena 4, no niže ocjene od 4 nije bilo.

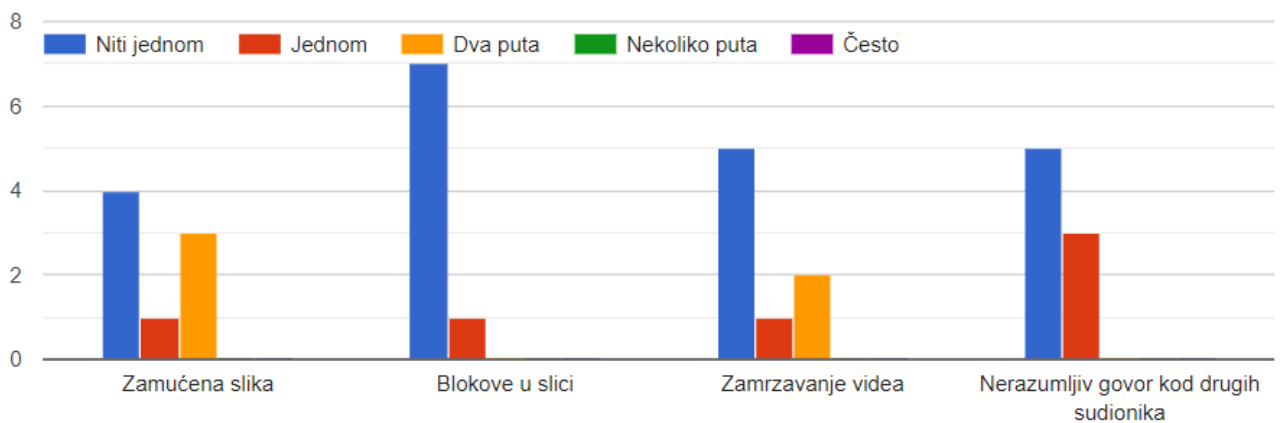
Iz grafičkih prikaza vidimo da su za testni slučaj 2 (tijekom kojeg je mobilni način isključen) prosječne ocjene veće za svaku ispitanu mjeru. Razlog tomu je što mobilni način ograničava rezoluciju te optimizira korištenje resursa i zbog toga je kvaliteta lošija, a sudionici su to opazili.

## 5.2. Analiza degradacija video poziva

Na slikama 5.2. prikazane su učestalosti slučajeva u kojima su sudionici primijetili da je došlo do zamućenja slike, pojave blokova, zamrzavanja video poziva ili nerazumljivog govora drugih sudionika.



**Slika 5.2. a)** Grafički prikaz učestalosti zamućenja slike, blokova u slici, zamrzavanja videa i nerazumljivog govora drugih sudionika za TS1



**Slika 5.2. b)** Grafički prikaz učestalosti zamućenja slike, blokova u slici, zamrzavanja videa i nerazumljivog govora drugih sudionika za TS2

Iz grafičkih prikaza se vidi da se svaka od degradacija dogodila barem jednom u svakom scenariju, iako su degradacije učestalije tijekom TS1. Zamućenu sliku tijekom video poziva

primijetilo je 37,50% sudionika tijekom TS1, a 50% sudionika tijekom TS2 čime je zamućena slika jedina degradacija koju je više sudionika primijetilo tijekom TS2 nego tijekom TS1.

Blokove u slici primijetilo je 25% sudionika tijekom TS1, a 12,5% tijekom TS2. Blokovi u slici su najrjeđe uočena degradacija te su se, prema odgovorima sudionika, pojavili samo jednom kod jednog sudionika prilikom TS2, a jednom i dva puta kod dva sudionika tijekom TS1.

Zamrzavanje videa primijetilo je 50% sudionika tijekom TS1, a 37,5% ispitanika tijekom TS2. Nerazumljiv govor kod drugih korisnika primijetilo je 37,5% sudionika i tijekom TS1 i tijekom TS2, no tijekom TS1 nerazumljiv govor bio je učestaliji kod jednog sudionika, dok se tijekom TS2 pojavio samo jednom ili nijednom.

### 5.3. Objektivne mjere

U tablici 5.1. prikazani su sudionici podijeljeni po grupama, a sudionicima su pridruženi modeli mobilnog uređaja koji su koristili kao i informacija o tome kako su sudionici bili spojeni na mrežu.

**Tablica 5.1.** Sudionici, korišteni mobilni uređaji i načini pristupa mreži

Grupa	#	Ime sudionika	Model mobilnog uređaja	Način pristupa mreži
1	1	Izabela	Samsung Galaxy S7 SM-G935F	Wi-Fi
	2	Sanja	Sony Xperia XZ1 G8341	Wi-Fi
2	3	Filip	Samsung Galaxy S10e SM-G970F	Mobilna mreža
	4	Toni	Samsung Galaxy S10e SM-G970F	Wi-Fi
3	5	Suzana	Samsung Galaxy A50 SM-A505FN	Wi-Fi
	6	Damir	Samsung Galaxy A10 SM-A105FN	Mobilna mreža
4	7	Alen	Samsung Galaxy S9 SM-G960F	Wi-Fi
	8	Lucija	Huawei P20 Lite ANE-LX1	Wi-Fi
ispitivač		Nika	Samsung Galaxy S10e SM-G970F	Mobilna mreža



Iz webrtc-internals log datoteke generirane nakon svakog testnog slučaja izvučeni su podaci o prijenosnoj brzini, gubitku paketa i kolebanju kašnjenja za audio i video tijekom višekorisničkog audiovizualnog poziva. U nastavku su prikazani prikupljeni podaci podijeljeni po grupama i testnim slučajevima.

### 5.3.1. Grupa 1

Sudionici u grupi 1 imali su sljedeće uvjete: sudionik 1 koristio je uređaj *Samsung Galaxy S7 SM-G935F* te bio spojen na mrežu putem Wi-Fi konekcije, a sudionik 2 koristio je uređaj *Sony Xperia XZ1 G8341* te također bio spojen putem Wi-Fi konekcije. Ispitivač je koristio uređaj *Samsung Galaxy S10e SM-G970F* i bio spojen putem mobilne mreže.

**Tablica 5.2. a)** Prikupljeni podaci za grupu 1 – TS1

TS1	Audio						Video					
	Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)		Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)	
	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>
Sudionik 1	46	51	0,0	0,1	17	20	172	235	0,0	0,1	0	40
Sudionik 2	48	45	0,1	0,0	16	13	223	46	0,1	0,0	0	31
Ispitivač	47	47	0,0	0,1	14	16	173	281	0,0	0,1	0	30

**Tablica 5.2. b)** Prikupljeni podaci za grupu 1 – TS2

TS2	Audio						Video					
	Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)		Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)	
	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>
Sudionik 1	48	51	0,0	0,1	22	24	468	383	0,0	0,1	0	46
Sudionik 2	50	47	0,2	0,0	23	20	543	255	0,2	0,0	0	51
Ispitivač	50	50	0,0	0,1	18	22	323	747	0,0	0,1	0	30

### 5.3.2. Grupa 2

Sudionici u grupi 2 imali su sljedeće uvjete: oba sudionika i ispitivač koristili su isti model uređaja - *Samsung Galaxy S10e SM-G970F*. Sudionik 3 i ispitivač bili su spojeni putem mobilne mreže, a sudionik 4 na mrežu je bio spojen putem Wi-Fi-ja.

**Tablica 5.3. a)** Prikupljeni podaci za grupu 2 – TS1

TS1	Audio						Video					
	Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)		Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)	
	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz
Sudionik 3	40	43	0,0	0,1	15	16	552	372	0,0	0,1	0	22
Sudionik 4	41	39	0,1	0,7	16	10	565	436	0,1	0,8	0	23
Ispitivač	40	39	0,7	0,0	12	19	385	766	0,8	0,0	0	28

**Tablica 5.3. b)** Prikupljeni podaci za grupu 2 – TS2

TS2	Audio						Video					
	Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)		Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)	
	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz
Sudionik 3	43	42	0,1	0,1	16	17	566	649	0,0	0,1	0	21
Sudionik 4	43	42	0,2	0,8	18	11	705	481	0,1	0,9	0	24
Ispitivač	42	44	0,7	0,1	12	22	537	759	0,7	0,1	0	29

### 5.3.3. Grupa 3

Sudionici u grupi 3 imali su sljedeće uvjete: sudionik 5 koristio je uređaj *Samsung Galaxy A50 SM-A505FN* i bio spojen na mrežu putem Wi-Fi konekcije, a sudionik 6 koristio je uređaj *Samsung Galaxy A10 SM-A105FN* i bio spojen putem mobilne mreže. Ispitivač je koristio uređaj *Samsung Galaxy S10e SM-G970F* i bio spojen putem mobilne mreže. Sudionici i ispitivač nalazili su se na istoj lokaciji (unutar iste kuće) tijekom ispitivanja.

Tablica 5.4. a) Prikupljeni podaci za grupu 3 – TS1

TS1	Audio						Video					
	Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)		Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)	
	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz
Sudionik 5	39	44	0,0	0,1	26	23	301	121	0,0	0,1	0	43
Sudionik 6	38	44	0,1	0,0	22	24	162	286	0,1	0,0	0	35
Ispitivač	38	43	0,1	0,1	21	26	159	272	0,1	0,1	0	32

Tablica 5.4. b) Prikupljeni podaci za grupu 3 – TS2

TS2	Audio						Video					
	Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)		Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)	
	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz
Sudionik 5	39	43	0,0	0,1	25	24	342	596	0,0	0,1	0	41
Sudionik 6	38	41	0,1	0,0	23	26	398	663	0,1	0,0	0	38
Ispitivač	39	41	0,1	0,1	22	25	390	629	0,1	0,1	0	35

#### 5.3.4. Grupa 4

Sudionici u grupi 4 imali su sljedeće uvjete: sudionik 7 koristio je uređaj *Samsung Galaxy S9 SM-G960F* i bio spojen na mrežu putem Wi-Fi konekcije, a sudionik 8 koristio je uređaj *Huawei P20 Lite ANE-LX1* i također bio spojen putem Wi-Fi-ja. Ispitivač je koristio uređaj *Samsung Galaxy S10e SM-G970F* i bio spojen putem mobilne mreže.

**Tablica 5.5. a)** Prikupljeni podaci za grupu 4 – TS1

TS1	Audio						Video					
	Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)		Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)	
	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>
Sudionik 7	47	44	0,0	0,0	15	16	669	355	0,0	0,0	0	24
Sudionik 8	42	53	0,0	0,0	20	18	457	744	0,0	0,0	0	63
Ispitivač	48	41	0,0	0,0	14	19	557	628	0,0	0,0	0	25

**Tablica 5.5. b)** Prikupljeni podaci za grupu 4 – TS2

TS2	Audio						Video					
	Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)		Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)	
	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>
Sudionik 7	51	40	0,0	0,0	17	14	685	387	0,0	0,1	0	25
Sudionik 8	42	57	0,0	0,0	19	17	488	776	0,0	0,0	0	56
Ispitivač	48	45	0,0	0,0	13	21	570	629	0,0	0,0	0	29

## 5.4. Rasprava

Na temelju prikupljenih podataka, u tablici 5.6. prikazane su minimalne i maksimalne vrijednosti brzine prijenosa i kolebanja kašnjenja te prosječan gubitak paketa za pojedini testni slučaj, neovisno o grupi.

**Tablica 5.6. a)** Minimalne i maksimalne vrijednosti brzine prijenosa i kolebanja kašnjenja i prosječni gubitak paketa za TS1

TS1	Audio						Video					
	Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Prosječni gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)		Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Prosječni gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)	
	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>
min	38	39	0,1	0,108	12	10	159	46	0,1	0,108	0	22
max	48	53			26	26	669	766			0	63

**Tablica 5.6. b)** Minimalne i maksimalne vrijednosti brzine prijenosa i kolebanja kašnjenja i prosječni gubitak paketa za TS2

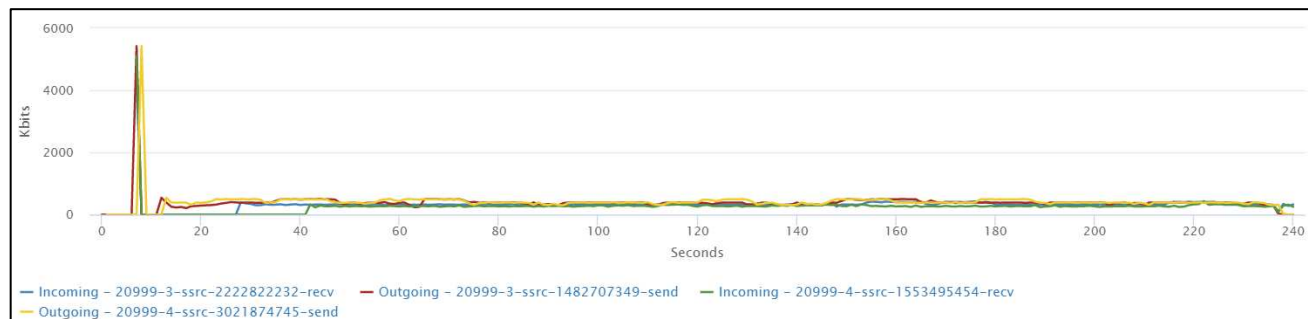
TS2	Audio						Video					
	Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Prosječni gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)		Prosječna brzina prijenosa (Kbits)		Prosječni gubitak paketa (%)		Kolebanje kašnjenja (ms)	
	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>	<i>ulaz</i>	<i>izlaz</i>
min	38	40	0,117	0,117	12	11	323	255	0,1	0,133	0	21
max	51	57			25	26	705	776			0	56

Iz tablica 5.6. možemo zaključiti da je minimalna brzina prijenosa audio podataka gotovo jednaka u oba slučaja, ali je maksimalna brzina nešto veća za TS2. Što se tiče brzine prijenosa video podataka, minimalna brzina značajno je veća za TS2 nego TS1, a maksimalna brzina također je veća. Kolebanje kašnjenja audio podataka gotovo je jednako u oba testna slučaja, no povećano je maksimalno kolebanje kašnjenja video podataka za TS1, dok je minimalno kolebanje kašnjenja gotovo jednako, no malo manje za TS2. Postotak gubitaka paketa veći je kod TS2 i u slučaju audio i u slučaju video podataka.

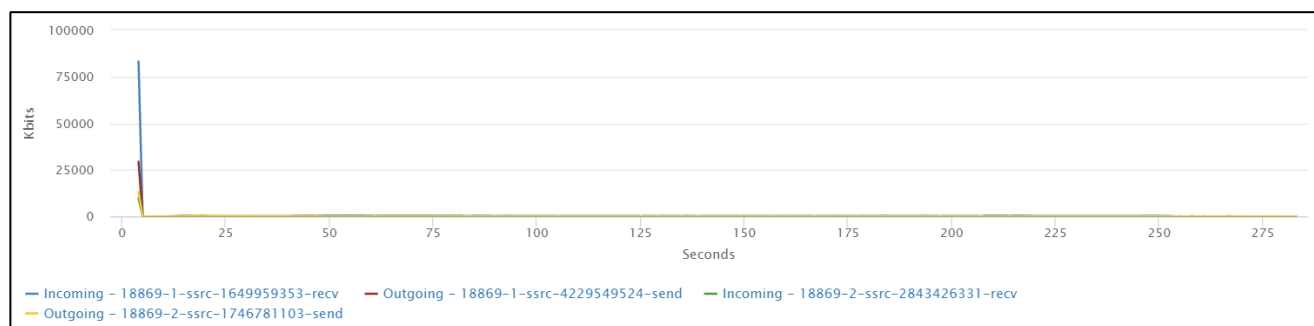
Ovime možemo doći do zaključka da je u prvom testnom slučaju tijekom kojeg je mobilni način uključen brzina prijenosa manja, ali dolazi do kolebanja kašnjenja i manjeg gubitka paketa, dok je u drugom testnom slučaju, kad je mobilni način isključen, brzina veća, no gubi se i više paketa, a kolebanje kašnjenja je manje. Ovo se podudara sa subjektivnim ocjenama sudionika jer su nižim ocjenama ocijenili TS1 prilikom kojeg je brzina prijenosa manja i dolazi do učestalijih degradacija video poiva. Osim toga, sudionici su tijekom TS2 primijetili učestaliju zamućenost slike tijekom video poziva do koje dolazi zbog gubitaka paketa koji je češći u TS2.

S obzirom na subjektivne ocjene ispitanika i objektivne rezultate, u nastavku su prikazani grafovi s promjenom brzine prijenosa, kolebanjem kašnjenja te postotkom gubitka paketa tijekom razgovora za najbolji i najlošiji slučaj. Na svim navedenim grafovima na x-osi nalazi se vrijeme u sekundama.

Na slici 5.3.a prikazan je graf prosječne brzine prijenosa za TS2 u grupi 2 za ispitivača. Na slici 5.3.b prikazan je najlošiji slučaj prilikom kojeg je brzina prijenosa bila najmanja – TS1 u grupi 1 kod sudionika 2.

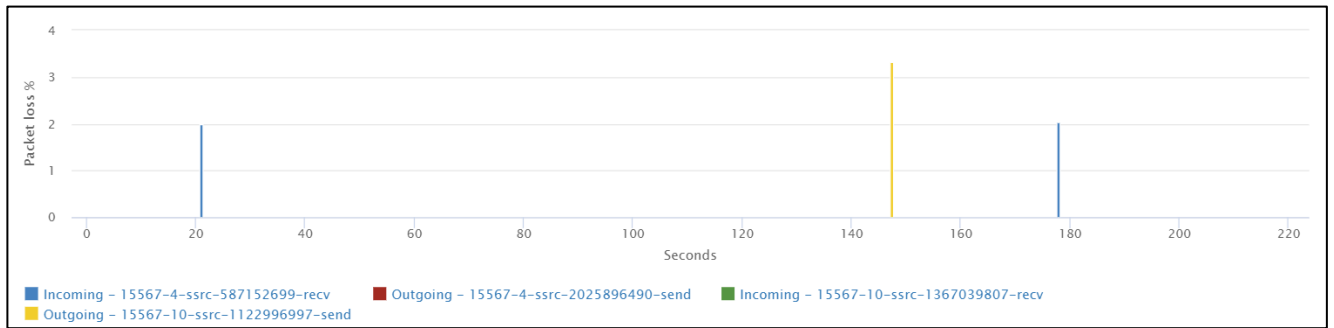


**Slika 5.3. a)** Prosječna brzina prijenosa videa za TS2 – povoljan slučaj

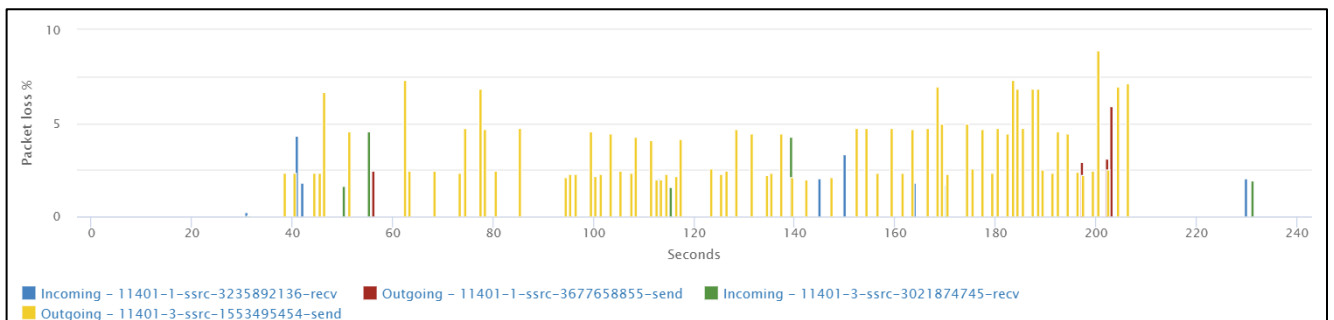


**Slika 5.3. b)** Prosječna brzina prijenosa videa za TS1 - najlošiji slučaj

Na slikama 5.4. prikazani su grafovi gubitaka paketa na najbolji i najlošiji slučaj. Najbolji slučaj s najmanjim postotkom gubitka paketa bio je tijekom TS1 za grupu 4 kod ispitivača (slika 5.4.a), a najveći postotak gubitaka paketa bio je za TS2 za grupu 2 kod sudionika 4, ali ni tada postotak gubitaka paketa nije premašio 1%.

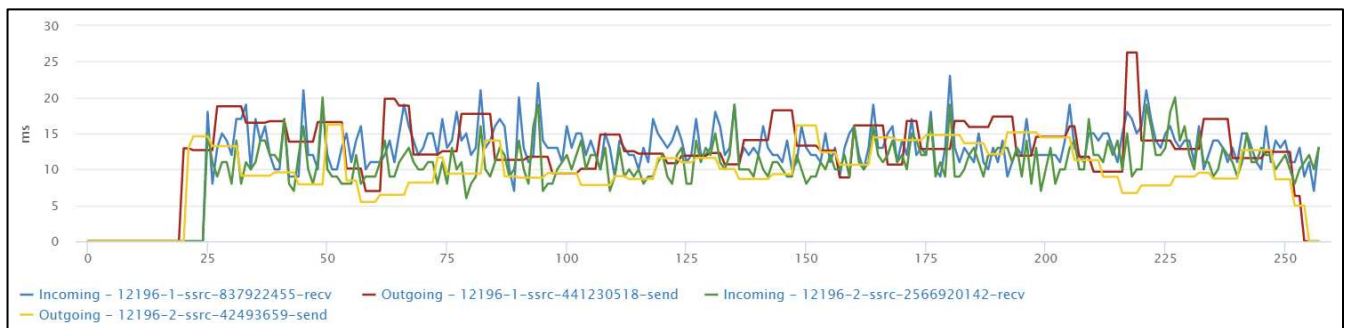


**Slika 5.4. a)** Postotci gubitaka paketa za video u najboljem slučaju



**Slika 5.4. b)** Postotci gubitaka paketa za video u najlošijem slučaju

Budući da je kolebanje kašnjenja audia otprilike jednako za sve slučajeve kod svih sudionika, na slici 5.5. prikazan je graf koji prikazuje kolebanje kašnjenja za audio kod jednog od sudionika (sudionik 5) za TS2.



**Slika 5.5.** Kolebanje kašnjenja za audio

## 6. Zaključak

WebRTC je tehnologija otvorenog koda koja omogućuje brzo i lako uspostavljanje dinamičkih veza s drugim web preglednicima što otvara vrata za novu vrstu komunikacije koja uključuje poruke, razmjenu datoteka, igre, audio i video razgovore te razmjenu gotovo bilo kakvih podataka. Izravna povezanost između ravnopravnih korisnika skraćuje vrijeme odziva čime igrice, video prijenosi, izvori podataka senzora i slični postaju brži i interaktivniji, tj. odvijaju se u stvarnom vremenu s minimalnim vremenskim odstupanjem. Ovu tehnologiju može se koristiti putem raznih uređaja i preglednika bez potrebe za preuzimanjem dodataka i korištenjem posrednika. Sigurna veza između korisnika omogućuje privatnu razmjenu informacija bez uplitanja posredničkog poslužitelja što smanjuje potrebu za velikim davateljima usluga i daje programerima slobodu da izrade nove tipove usluga i aplikacija. Uspješna razmjena binarnih tokova podataka između ravnopravnih korisnika uklanja potrebu za serijalizacijom, ponovnim kodiranjem i pretvorbom podataka u svakom koraku procesa. Time se postiže učinkovitije korištenje mreže i resursa te se stvara pouzdanija protočna struktura podataka koja izaziva manje grešaka.

U ovome radu provedeno je ispitivanje utjecaja objektivnih parametara prijenosa (brzina prijenosa, gubitak paketa, kolebanje kašnjenja) na iskustvenu kvalitetu korisnika u slučaju mobilnog višekorisničkog audio/video poziva ostvarenog tehnologijom WebRTC. Ispitivanje je provedeno u stvarnim uvjetima te nije bilo moguće utjecati na uvjete u mreži i ostale čimbenike okoline. Za uspostavu video konferencije korištena je aplikacija Whereby. Iz prikupljenih rezultata vidljiva je ovisnost iskustvene kvalitete o kvaliteti usluge. S obzirom na srednje vrijednosti ocjena za testne slučajeve, može se uočiti utjecaj pojedinih komponenti audio/video poziva na cjelokupnu kvalitetu usluge.

Kako bi se povećalo zadovoljstvo korisnika uslugom WebRTC potrebno je poznavanje raznih tehničkih i netehničkih čimbenika koji utječu na iskustvenu kvalitetu. Uzimajući u obzir rezultate ovoga rada može se zaključiti da je tehnologija WebRTC izrazito podložna utjecaju objektivnih parametara na iskustvenu kvalitetu korisnika te je stoga područje koje je potrebno dodatno istraživati.



## Literatura

- [1] Ivković I. *Web-aplikacija za snimanje i reproduciranje multimedijских datoteka korištenjem standarda WebRTC*, diplomski rad, FER, 2017.
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/WebRTC>, datum posljednjeg pristupa: 7. svibnja 2019.
- [3] Levent-Levi T. *What is WebRTC and What is it Good For?*, 15. prosinca 2019., <https://bloggeek.me/what-is-webrtc/>, datum posljednjeg pristupa: 15. travnja 2020.
- [4] Dutton S. *Getting started with WebRTC*, 23.7.2012., HTML5 rocks, <http://www.html5rocks.com/en/tutorials/webrtc/basics/>, datum posljednjeg pristupa: 15. travnja 2020.
- [5] Vučić D., Skorin-Kapov L. *The impact of mobile device factors on QoE for multi-party video conferencing via WebRTC*, International Conference on Telecommunications (ConTEL), Graz, Austrija, 2015.
- [6] Loreto S., Romano S. P. *Real-Time Communication with WebRTC*, O'Reilly Media, Sebastopol, SAD, 2014.
- [7] <https://webrtc.github.io/webrtc-org/fag/>, datum posljednjeg pristupa: 14. travnja 2020.
- [8] Uberti J., Jennings C. *Javascript Session Establishment Protocol*, 6. lipnja 2012., <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-rtcweb-jsep-01>, datum posljednjeg pristupa: 14. travnja 2020.
- [9] Manson R. *Getting Started with WebRTC - Explore WebRTC for real-time peer-to-peer communication*, Packt Publishing, Birmingham, UK, 2013.
- [10] Fosser E., D Nedberg L. O. *Quality of Experience of WebRTC based video communication*, Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [11] Lachappelle S. *What was the history of WebRTC inside Google before it was released to the public?*, 20.11.2013., <https://www.quora.com/What-was-the-history-of-WebRTC-inside-Google-before-it-was-released-to-the-public>, datum posljednjeg pristupa: 15. travnja 2020.
- [12] Levent-Levi T. *What is WebRTC?*, 8. ožujka 2012., <https://bloggeek.me/webrtc/> datum posljednjeg pristupa: 15. travnja 2020.

- [13] Griffin F. *Global WebRTC Market to Increase by Billions of Dollars in 2025*, Webrtcworld.com, <http://www.webrtcworld.com/topics/webrtc-world/articles/431933-global-webrtc-market-increase-billions-dollars-2025.htm>, datum posljednjeg pristupa: 15. travnja 2020.
- [14] Levent-Levi T. *10 Massive Applications Using WebRTC*, 18. prosinca 2018., <https://bloggeek.me/massive-applications-using-webrtc/>, datum posljednjeg pristupa: 15. travnja 2020.
- [15] Hart C. *WebRTC: One of 2016's Biggest Technologies No One Has Heard Of*, 3.1.2017., Webrtcworld.com, <http://www.webrtcworld.com/topics/webrtc-world/articles/428444-webrtc-one-2016s-biggest-technologies-no-one-has.htm>, datum posljednjeg pristupa: 15. travnja 2020.
- [16] Le Callet P., Möller S., Perkis A. *Qualinet White Paper on Definitions of Quality of Experience*, Technical Report Version 1.2., European Network on Quality of Experience in Multimedia Systems and Services, Novi Sad, Srbija, 2013.
- [17] *What is Quality of Experience (QoE)?*, 26. lipnja 2017., <https://www.fpz.unizg.hr/qoe4vr/index.php/2017/06/26/what-is-quality-of-experience-qoe/>, datum posljednjeg pristupa: 16. travnja 2020.
- [18] Vogel A., Kerherve B., Bochmann G., Gecsei J. *Distributed multimedia applications and quality of service: a survey*, Proceedings Of The 1994 Conference Of The Centre For Advanced Studies On Collaborative Research, Cascon, 1994.
- [19] Guo X., Pattinson C., *Quality of Service Requirements for Multimedia Communications*, Time and the Web, Staffordshire University, 1997.
- [20] Schatz R., Hoßfeld T., Janowski L., Egger S., *From Packets to People: Quality of Experience as New Measurement Challenge from Data Traffic Monitoring and Analysis: From measurement, classification and anomaly detection to Quality of experience*, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [21] ITU-T (G.1011), *Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks*, Multimedia Quality of Service and performance – Generic and userrelated aspects, 2015.
- [22] <https://webrtcglossary.com/webrtc-internals/>, datum posljednjeg pristupa: 8. svibnja 2020.

[23] Transparency Market Research: *WebRTC market is expected to reach \$ 54,944.9 by 2026*, 11. travnja 2019., <https://www.transparencymarketresearch.com/pressrelease/webrtc-market.htm>, datum posljednjeg pristupa: 10. lipnja 2020.

## Sažetak

WebRTC (*Web Real Time Communication*) je skup tehnologija koji omogućuje komunikaciju u stvarnom vremenu koristeći internetski preglednik bez drugih posrednika. Tehnologija nudi podršku za audio i video komunikaciju, ali moguće je prenijeti bilo kakav skup podataka između korisnika. WebRTC nastao je kao projekt otvorenog koda otvorenog koda, a podršku za WebRTC razvili su neki od najpopularnijih internetskih preglednika poput Google Chromea, Mozille Firefox i Opere. WebRTC se može primijeniti kao dodatak mnogim web-aplikacijama budući da je API dostupan u JavaScriptu. Prijenos audio i video sadržaja odvija se po načelima sustava s ravnopravnim sudionicima (engl. *peer-to-peer*).

U svrhu ispitivanja iskustvene kvalitete provedeno je ispitivanje u kojem se razmatrao utjecaj stvarnih uvjeta za vrijeme mobilnog višekorisničkog poziva ostvarenog tehnologijom WebRTC. U ispitivanju je sudjelovalo 8 osoba, a prikupljene su objektivne i subjektivne mjere iskustvene kvalitete. Prikupljeni podaci analizirani su te su izvedeni zaključci o ovisnosti kvalitete usluge i iskustvene kvalitete prilikom korištenja tehnologije WebRTC.

**Ključne riječi:** WebRTC, iskustvena kvaliteta, objektivne mjere, subjektivna mjerenja, komunikacija u stvarnom vremenu

## Summary

WebRTC (*Web Real Time Communication*) is a technology which enables real time communication without requiring an intermediary. The technology supports audio and video stream as well as exchanging arbitrary data between browsers. WebRTC is an open-source project and is supported by all popular Internet browsers such as Google Chrome, Mozilla Firefox and Opera. WebRTC can be used as an addition to various Web applications since its API is in JavaScript and it allows audio and video stream over a peer-to-peer connection.

The influence of objective quality measurements on users' quality of experience during mobile multi-party video calls using WebRTC technology has been elaborated. By conducting a subjective study with 8 participants, objective metrics and subjective QoE ratings were collected. Based on the analysis of the collected data, conclusions were drawn regarding the dependency between quality of service and quality of experience when using WebRTC.

**Key words:** WebRTC, Quality of Experience, objective metrics, subjective measures, real time communication

## Popis slika

Slika 2.1. Razlika između implementacije klasične VoIP usluge i usluge koja se temelji na tehnologiji WebRTC

Slika 2.2. Broj korisnika VoIP tehnologija

Slika 2.3. Arhitektura WebRTC-a

Slika 2.4. WebRTC trapezoid

Slika 2.5. Put podataka između korisnika

Slika 3.1. Razine QoS-a [19]

Slika 3.2. Čimbenici koji utječu na iskustvenu kvalitetu

Slika 4.1. Napredne postavke aplikacije Whereby

Slika 4.2. a) Skupina pitanja o zadovoljstvu korisnika

Slika 4.2. b) Skupina pitanja o smetnjama prilikom korištenja usluge

Slika 4.3. Aplikacije za audiovizalni poziv koje su sudionici prehodno koristili

Slika 4.4. WebRTC internals

Slika 5.1. a) Grafički prikaz distribucija subjektivnih ocjena korisnika za TS1

Slika 5.1. b) Grafički prikaz distribucija subjektivnih ocjena korisnika za TS2

Slika 5.2. a) Grafički prikaz učestalosti zamućenja slike, blokova u slici, zamrzavanja videa i nerazumljivog govora drugih sudionika za TS1

Slika 5.2. b) Grafički prikaz učestalosti zamućenja slike, blokova u slici, zamrzavanja videa i nerazumljivog govora drugih sudionika za TS2

Slika 5.3. a) Prosječna brzina prijenosa videa za TS2 – povoljan slučaj

Slika 5.3. b) Prosječna brzina prijenosa videa za TS1 - najlošiji slučaj

Slika 5.4. a) Postotci gubitaka paketa za video u najboljem slučaju

Slika 5.4. b) Postotci gubitaka paketa za video u najlošijem slučaju

Slika 5.5. Kolebanje kašnjenja za audio