

# Kvaliteta usluge u mrežama s implementiranim MPLS i SD-WAN tehnologijama

---

Pajeska, Igor

Master's thesis / Diplomski 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:119:800767>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-02**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Igor Pajeska**

**KVALITETA USLUGE U MREŽAMA S  
IMPLEMENTIRANIM MPLS I SD-WAN  
TEHNOLOGIJAMA**

**DIPLOMSKI RAD**

**Zagreb, 2019.**

Zagreb, 5. travnja 2019.

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

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 5107

Pristupnik: **Igor Pajeska (0135225089)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Kvaliteta usluge u mrežama s implementiranim MPLS i SD-WAN tehnologijama**

### Opis zadatka:

Provesti analizu kvalitete usluga (Quality of Service) u MPLS mrežama i SD-WAN mrežama, uključujući prikaz osnovnih značajki višeuslužnih mreža i aplikacija koje pružaju, analizu problema osiguravanja kvalitete različitih usluga, usporedbu MPLS i SD-WAN mehanizama usmjeravanja, analizu labela i njihovih značenja, analizu zaglavlja paketa u domenama i tablica rutiranja, mehanizama realizacije, te analizu postupaka implementacije mehanizama za osiguranje QoS-a, metoda mjerenja kvalitete usluge i upravljanja prometom u mrežama.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

---

doc. dr. sc. Marko Matulin

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## DIPLOMSKI RAD

KVALITETA USLUGE U MREŽAMA S  
IMPLEMENTIRANIM MPLS I SD-WAN  
TEHNOLOGIJAMA

QUALITY OF SERVICES IN THE NETWORKS WITH  
IMPLEMENTED MPLS AND SD-WAN TECHNOLOGIES

Mentor: doc. dr. sc. Marko Matulin

Student: Igor Pajeska, 0135225089

Zagreb, rujan 2019.

## **SAŽETAK**

U radu su opisani različiti mehanizmi MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) i SD-WAN (*Software-Defined networking in a Wide Area Network*) usmjeravanja. Prikazane su karakteristike MPLS i SD-WAN mreže i parametri koji definiraju kvalitetu usluge. Napravljena je usporedba vremena kašnjenja za MPLS i SD-WAN pri čemu su dobiveni rezultati prikazani u adekvatnim dijagramima i tablicama.

Ključne riječi: MPLS, SD-WAN, kašnjenje, kvaliteta usluge

## **SUMMARY**

Different mechanisms of MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) and SD-WAN (*Software-Defined networking in a Wide Area Network*) routing are described in the paper. The characteristics of MPLS and SD-WAN networks and the parameters that define the quality of services are presented. A comparison of the delay time for MPLS and SD-WAN was made, yielding the results shown in the additional diagrams and tables.

Key words: MPLS, SD-WAN, delay, quality of service

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. ZNAČAJKE VIŠEUSLUŽNIH MREŽA .....	2
2.1. Općenito o višeuslužnim mrežama .....	2
2.2. Povijesni razvoj višeuslužnih mreža .....	2
2.3. Prednosti višeuslužnih mreža .....	3
2.4. Protokoli u višeuslužnim mrežama .....	3
2.4.1. SIP (Session Initiation Protocol) .....	3
2.4.2. RTCP protokol .....	5
2.4.3. QoS signalizacijski protokoli .....	5
2.5. Arhitektura višeuslužnih mreža .....	7
3. KVALITETA USLUGE .....	10
3.1. Propusnost .....	11
3.2. Kašnjenje .....	11
3.3. Varijacije kašnjenja i gubici .....	12
3.4. Iskustvena kvaliteta QoE .....	12
3.5. Arhitektura kvalitete usluge .....	13
4. SD-WAN UMREŽAVANJE .....	16
4.1. Arhitektura softverski definirane mreže .....	18
4.1.1. SDN kontroleri .....	19
4.1.2. Kontrolna i podatkovna ravnina .....	20
4.2. <i>Open Flow</i> protokol .....	22
4.2.1. Arhitektura <i>Open Flow</i> protokola .....	22
4.2.2. Tablice usmjeravanja <i>Open Flow</i> protokola .....	24
5. MPLS UMREŽAVANJE .....	26
5.1 Karakteristike MPLS mreže .....	26
5.2. Arhitektura MPLS mreže .....	27
5.3. Pozicija MPLS-a u OSI modelu .....	29
5.4. Operacije u procesu usmjeravanja paketa u MPLS domeni .....	30
5.5. MPLS aplikacije .....	31
5.5.1 MPLS TE .....	31
5.5.2. MPLS QoS .....	32
6. USPOREDBA MPLS I SD-WAN MREŽE .....	33
6. ZAKLJUČAK .....	39

LITERATURA.....	40
POPIS SLIKA .....	43
POPIS TABLICA.....	43

# 1. UVOD

Višeuslužne mreže se mogu definirati kao mreže za prijenos podataka za više od jedne vrste usluga. MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) je tehnologija koja osigurava tradicionalni model prosljeđivanja paketa kroz mrežu na mnogo brži i efikasniji način nego što su to uspijevale prijašnje tehnike. SD-WAN (*Software Defined Wide Area Network*) mreže predstavljaju oblik mrežne infrastrukture kojim se nastoje optimizirati mrežni resursi te samim time prilagoditi mrežu poslovnim potrebama, aplikacijama i prometu. SD-WAN bi mogao biti rješenje i odgovor na probleme osiguravanja QoE (*Quality of Experience*) i QoS (*Quality of Service*) u višeuslužnim mrežama.

Svrha ovog istraživanja je provođenje analize kvalitete usluga u MPLS i SD-WAN mrežama pri čemu su prikazane osnovne značajke višeuslužnih mreža i aplikacija, karakteristike MPLS i SD-WAN mreže kao i parametri osiguravanja kvalitete usluge. Nakon toga je prikazan usporedba MPLS i SD-WAN mreže pri čemu su uspoređeni dobiveni rezultati.

Materija diplomskog rada je podijeljena u sedam cjelina:

1. Uvod
2. Značajke višeuslužnih mreža
3. Kvaliteta usluge
4. SD-WAN umrežavanje
5. MPLS umrežavanje
6. Usporedba MPLS-a i SD-WAN-a
7. Zaključak.

U drugom poglavlju su opisane višeuslužne mreže i protokoli u višeuslužnim mrežama. U trećem poglavlju su opisani parametri kvalitete usluge dok su u četvrtom i petom poglavlju opisane glavne karakteristike MPLS i SD-WAN umrežavanja. U šestom poglavlju je prikazana usporedba MPLS i SD-WAN umrežavanja. Na kraju rada su izneseni relevantni zaključci na temelju prethodno razrađene tematike.



## 2. ZNAČAJKE VIŠEUSLUŽNIH MREŽA

### 2.1. Općenito o višeuslužnim mrežama

Višeuslužne mreže MSN (*Multi Service Network*) se mogu definirati kao mreže za prijenos podataka za više od jedne vrste usluga. Njima se omogućava i integracija različitih tipova usluga kao što su prijenos govora, podataka i multimedije pri čemu se prijenos obavlja preko iste prijenosne infrastrukture neovisno o prijenosnom mediju. Tako dizajnirana mreža stvara i osigurava uvjete kako bi se održala dovoljna razina kvalitete usluge za prijenos podataka za više od jedne vrste aplikacije. Tradicionalne mreže ne pružaju dovoljnu iskorištenost resursa te se ustraje na paketskom načinu prijenosa podataka kojim se zamjenjuje komutacija kanala. Korisniku je potrebno omogućiti da mu u svakom trenutku budu dostupne željene usluge (aplikacije) uz zahtijevanu razinu kvalitete usluge.

Porastom podatkovnog prometa, povećava se i interes za nadogradnju višeuslužne mreže pa je tako postalo prirodno uvoditi tehnologiju komutacije paketa i u postojeće telefonske mreže da bi se smanjili troškovi rada. Jedna od karakteristika višeuslužnih mreža je u tome da ona omogućava pružanje usluga koje se obrađuju neovisno. Takve usluge se mogu lagano pružati od strane davatelja usluga koji se veže na rubove javne prijenosne mreže umjesto da je sastavni dio mreže. Uz pomoć standardnih protokola se odvija komunikacija između poslužitelja i prijenosnog sloja.

### 2.2. Povijesni razvoj višeuslužnih mreža

Razvoj višeuslužnih mreža je započeo 80-tih godina prošlog stoljeća kada se počelo razmišljati o uvođenju novih rješenja kako bi se mreža unaprijedila. Povod tome su bili nedostaci klasične PSTN (*Public Switched Telephone Network*) mreže koji su se počeli sve više isticati, a to je nemogućnost inteoperabilnosti više simultanih usluga poput digitalnog prijenosa govora i podataka. Došlo se do zaključka kako se unaprjeđenje mora bazirati na optici kako bi se uklonili prijašnji nedostaci.

Stvoreni su novi standardi za transmisiju SONET (*Synchronous Optical Network*), multipleksiranje SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) i komutaciju ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). Time je integrirana nova mreža pod nazivom ISDN (*Integrated Services Digital Network*), a operatorima je omogućena implementacija ATM jezgrene mreže na kojoj su bile moguće govorne usluge i prijenos podataka komutacijom ćelija.

Daljnijim razvojem tehnologije postali su vidljivi određeni nedostaci kod ATM jezgrene mreže kao što su cijene uređaja, održavanje, prevelika zaglavlja kod ATM ćelija te je došlo do faze gdje se ATM komutacija želi zamijeniti proizvodima koji se temelje na IP-u (*Internet Protocol*).

Telekomunikacijske mreže bazirane na IP tehnologiji postale su osnovi alat svake poslovne organizacije. O njenoj učinkovitosti direktno ovise i poslovni uspjesi i rezultati. IP mreže koriste se za prijenos svih podataka, od Internet prometa, glasovnih i video usluga do kritičnih poslovnih podataka. Uloga mehanizama QoS (*Quality of Service*) postaje vrlo važna kako bi se različitim vrstama prometa pružio odgovarajući tretman.

### **2.3. Prednosti višeslužnih mreža**

Prema [1], prednosti višeslužnih mreža su:

- davatelj usluge ne mora biti sastavni dio mreže,
- sva inteligencija koja je potrebna za upravljanje i signalizaciju se nalazi u samoj mreži,
- prijenosna mreža je optimirana za prenošenje i komutiranje velike količine podataka,
- prisutni su različiti pristupni mediji kao što su bakreni vodovi, LDMS (*Local Multipoint Distribution Service*) i mobilni sustavi.

Sva komunikacija između poslužitelja i prijenosnog sloja se temelji na otvorenim standardiziranim protokolima.

### **2.4. Protokoli u višeslužnim mrežama**

Važniji protokoli u višeslužnim mrežama su sljedeći:

- SIP (*Session Initiation Protocol*),
- RTCP (*Real-time Transport Control Protocol*),
- QoS signalizacijski protokoli.

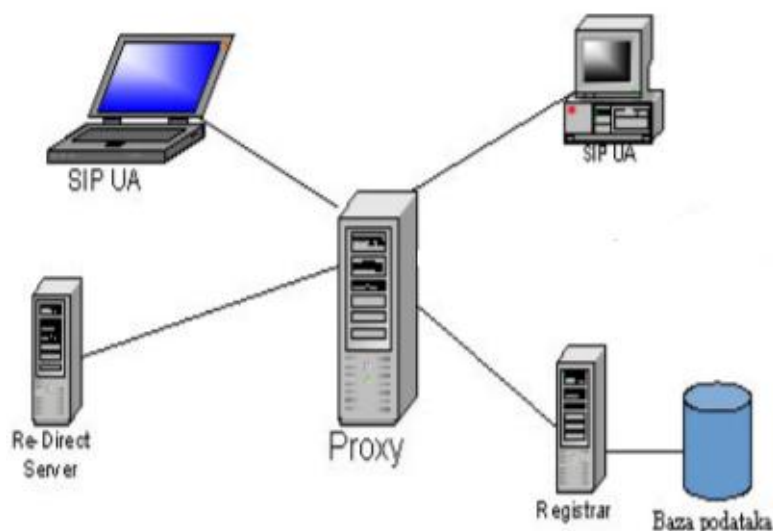
#### **2.4.1. SIP (Session Initiation Protocol)**

SIP protokol služi za upravljanje sesijom u višeslužnim mrežama, a njegov cilj je ujedno uspostava i održavanje sesije između dva ili više sudionika u komunikaciji. SIP ne može samostalno odgovoriti na zahtjeve takvih usluga, a ne može ni osigurati odgovarajuću razmjenu QoS signalizacijskih informacija. SIP predstavlja protokol aplikacijskog sloja

TCP/IP protokolnog složaja koji se koristi za uspostavu, promjenu i raskid sesije s jednim ili više sudionika u mrežama temeljenih na protokolu IP. Protokol je prihvaćen i od strane organizacijskog tijela 3GPP (*The 3rd Generation Partnership Project*) u standardizacijskom dokumentu TS 23.228 [3] kao glavni protokol za upravljanje višemedijskim uslugama sljedeće generacije. Izbor protokola se temelji na činjenici da su telekomunikacijske usluge podložne zahtjevima za promjenama u cilju unaprjeđivanja novih usluga. Prema [3], postoji šest različitih vrsta zahtjeva u SIP-u:

- INVITE – metoda koja pokazuje da je korisnik pozvan na sudjelovanje u nekoj sesiji. Za razgovor između dvije osobe pozivatelj šalje podatke o vrsti medija koje može primiti kao sve ostale parametre.
- ACK – potvrđuje da je klijent primio završni odgovor na INVITE zahtjev. Ova metoda se koristi samo s INVITE zahtjevom.
- BYE – klijent koristi BYE za slanje poruke poslužitelju da želi prekinuti komunikaciju.
- CANCEL – poništava sljedeći zahtjev, ali ne utječe na izvršene.
- OPTIONS – sadrži informacije o mogućnostima poslužitelja, ali ne uspostavlja vezu.
- REGISTER – prenosi informacije o lokaciji korisnika do SIP poslužitelja.

Na slici 1 su prikazani osnovni SIP mrežni elementi.



Slika 1. Osnovni SIP mrežni elementi [4]

### **2.4.2. RTCP protokol**

RTCP protokol podržava veliki broj funkcionalnosti uključujući kontrolu RTP (*Real-time Transport Protocol*) sesija, nadzor kvalitete i sinkronizaciju više RTP tokova medija. Temelji se na periodičkom prijenosu kontrolnih paketa između svih sudionika sesije, a primarna funkcija mu je osigurati povratne informacije o kvaliteti prijema vremenski osjetljivih podataka upotrebom izvještaja pošiljatelja i primatelja. Korištenjem upravljačkih poruka RTCP protokol obavlja prikupljanje i razmjenu statističkih podataka kao što su ukupan broj prenesenih RTP paketa i okteta, kašnjenje paketa i slično. Prikupljenim informacijama pošiljatelj se može prilagoditi dinamičkim promjenama mreže, a primatelj utvrditi zagušenje mreže. Prijenos detaljnih informacija i uključivanje dodatnih statističkih podataka u RTCP se ostvaruje korištenjem proširenog izvještaja koji osigurava operatorima dodatne informacije. Zadaća RTCP protokola je osigurati povratnu informaciju sudionicima sesije koristeći mehanizme distribucije koji se koriste za prijenos vremenski osjetljivih podataka te je stoga neophodno omogućiti pravovremen i pouzdan prijenos ovih poruka. Upravljanje zagušenjem je odgovornost protokola koji se nalaze ispod RTP/RTCP sloja u mrežnom sloju.

### **2.4.3. QoS signalizacijski protokoli**

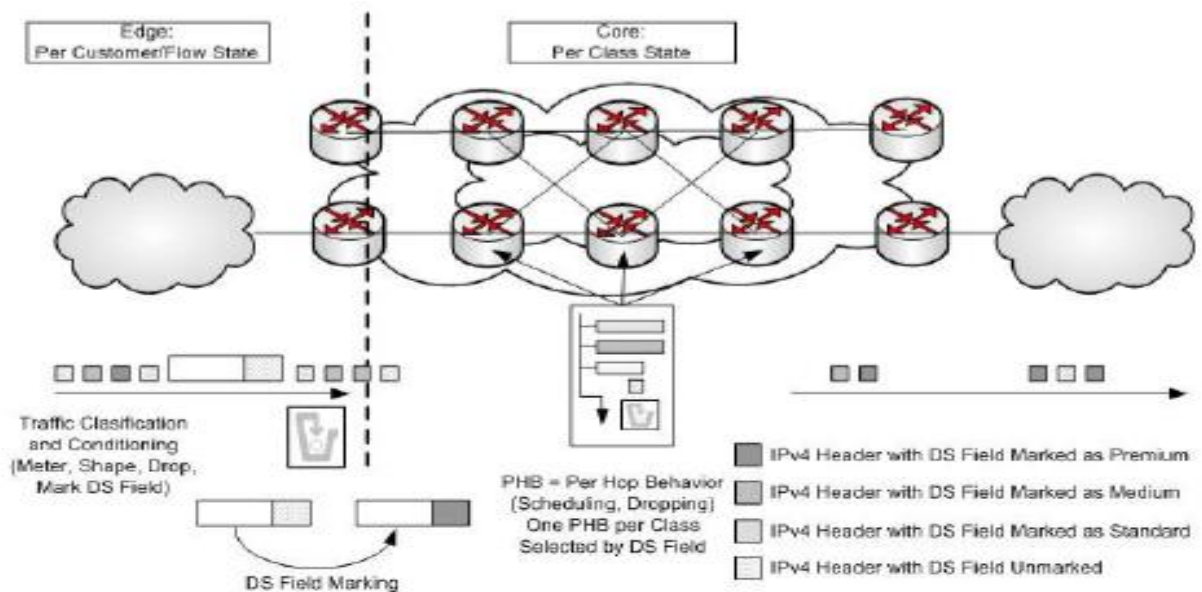
Prethodna dva protokola ne mogu funkcionirati bez QoS signalizacijskih protokola. Sve aplikacije imaju različite zahtjeve za kvalitetom usluge. Korisnik definira zahtijevani QoS pomoću parametara QoS-a te kreira ugovor s mrežnim operaterom.

Rješenja za osiguranje QoS u IP mrežama je *DiffServ* arhitektura koja predstavlja efikasno i stabilno rješenje. U svrhu optimiranja resursa, ova arhitektura se kombinira s MPLS tehnologijom koja omogućuje funkcionalnosti kao što su rezervacija resursa, tolerancija na pogreške i optimizacija iskorištenosti resursa. Integracija *DiffServ* i MPLS arhitekture predstavlja povoljno rješenje problema osiguranja QoS za višemedijski promet uz efikasno iskorištenje mrežnih resursa. Na slici 3 je prikazana *DiffServ* arhitektura.

Na slici 2 je prikazana QoS podrška, dok je slici 3 prikazana *DiffServ* arhitektura.



Slika 2. QoS podrška [5]



Slika 3. DiffServ arhitektura [5]

Rubni usmjeritelji pridružuju DSCP (*Differentiate Services Codepoint*) paketima na ulazu u DiffServ mrežu. Danas se koriste tri standardizirana signalizacijska protokola u višeslužnim mrežama, a to su:

- LDP (*Label Distribution Protocol*),
- CR-LDP (*Constraint-based Routing Label Distribution Protocol*),

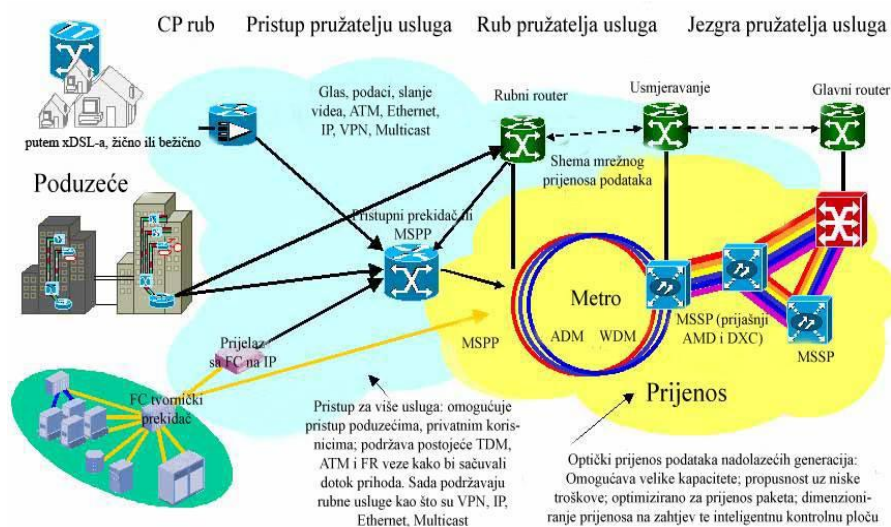
- RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering*).

CR-LDP i RSVP-TE omogućuju uspostavu LSP-a (*Label Switched Path*), rezervaciju propusnog opsega za LSP i LRR (*Fast ReRouting*) mehanizme što predstavlja ključ za ispunjavanje QoS zahtjeva. RSVP-TE je najčešće korišteni signalizacijski protokol višeslužnih mreža, dok LDP pruža samo osnovne funkcionalnosti.

### 2.3. Arhitektura višeslužnih mreža

Porast podatkovnog prometa je značajno utjecao na postojeću arhitekturu telekomunikacijske mreže. Konvergencija mreža (konsolidacija fiksne i pokretne mreže), usluga (*triple-play*, povezivost preko WLAN/2G/3G/4G) i korisničke opreme je budućnost višeslužnih mreža. Pojam vertikalnosti i horizontalnosti kod same arhitekture mreža naznačuje promjene u komutaciji, prijenosu i pristupnom dijelu mreža. Cilj mreža nove generacije da se arhitektura koja je danas vertikalno orijentirana okrene prema horizontalnom zasnivajući se na visokoj razini zajedničkih resursa kod prijenosa, kontrole i usluge.

U počecima se arhitektura temeljila na fizičkoj, odnosno električnoj razini mrežne usluge. Na slici 4 je prikazana arhitektura mreže. Noviji pristupi su zahtijevali cjelovito tretiranje komunikacije između terminala tako da se integralno tretiraju transmisijski i aplikacijski orijentirane funkcije.



Slika 4. Arhitektura višeslužnih mreža

U današnje vrijeme koristi se slojeviti pristup organizaciji svih komunikacijskih funkcija. Prema modelu OSI RM (*Open System Interconnection Reference Model*), svaki otvoreni sustav je moguće opisati pomoću skupa slojeva vertikalno poredanih od najnižeg prema najvišem. Pri tome je potrebno odrediti broj slojeva i funkcije koje će se u slojevima obavljati. Slojevi se mogu proširivati i nadograđivati te se s ovakvom infrastrukturom pridonosi da se protokoli i mrežne usluge lakše razumiju čime se povećava i sama kvaliteta usluge [6].

Postoje osnovni principi kojima se određuju granice između slojeva i broja slojeva, a to su:

- svaki sloj treba izvesti vrlo dobro definiranu funkciju,
- granice između slojeva trebaju biti definirane kako bi se smanjio tok informacija između sučelja,
- funkcija svakog sloja treba biti izabrana prema dobro definiranim međunarodnim protokolima,
- veliki broj slojeva daje jasniju sliku pri raščlanjivanju procesa u mreži,
- u slučaju potrebe za različitom razinom apstrakcije treba posegnuti za kreiranjem novog sloja.

OSI model ima sedam komunikacijskih slojeva i sučelja među njima. Svrha samog modela je omogućavanje modularnosti opreme u komunikacijskom lancu i interoperabilnost opreme različitih proizvođača. U tablici 1 je prikazan odnos između OSI referentnog modela i TCP/IP protokolnog složaja.

Tablica 1. OSI referentni model [6]

OSI	TCP/IP
Aplikacijski sloj	Aplikacijski sloj
Prezentacijski sloj	
Sloj sesije	
Transportni sloj	Transportni sloj
Mrežni sloj	Internet sloj
Podatkovni sloj	Sloj pristupa mreži
Fizički sloj	

Slojevi prikazani u tablici 1 obavljaju sljedeće funkcije:

- aplikacijski sloj – procesi koji su prilagođeni korisničkom okruženju,

- prezentacijski sloj – odnosi se na sintaksu i semantiku podataka te omogućuje prikaz i predstavljanje u različitim tipovima podataka kako bi se računalo i mreža mogli razumjeti,
- sloj sesije – osigurava strukturu za komuniciranje između aplikacija,
- transportni sloj – pouzdan prijenos podataka između krajnjih komunikacijskih točaka odnosno s kraja na kraj mreže,
- mrežni sloj – određuje prijenosne puteve te uspostavlja, održava i raskida veze,
- podatkovni sloj – omogućava pouzdani prijenos informacija preko linka, pakiranje podataka u okvire i kontrolu pogrešaka,
- fizički sloj – podrazumijevaju se mehaničke, električne, funkcijske i proceduralne karakteristike koje omogućuju prijenos slijeda bita kroz fizički medij.



### 3. KVALITETA USLUGE

Usluge višeslužnih mreža zahtijevaju određeni stupanj kvalitete (QoS), te je shodno tome određen RTCP s glavnim ciljem da osigura povratnu informaciju o kvaliteti dostavljanja vremenski osjetljivih usluga. RTCP sam po sebi ne garantira QoS za vremenski osjetljive usluge iako se temelji na periodičkoj razmjeni kontrolnih paketa između svih sudionika sesije. Glavni ciljevi razine usluge se koriste kako bi se osigurale mjere adekvatnosti grupe resursa pod specificiranim uvjetima. GoS (*grade of service*) se odnosi na dio mrežnih performansi NP (*Network Performance*) koje su povezane prometom i definiraju se kao sposobnost mreže ili dijelova mreže pri osiguravanju funkcije koje se odnose na komunikaciju između korisnika. Ciljevi tih mrežnih performansi su izvedeni iz zahtjeva kvalitete usluge QoS koji predstavlja skup performansi usluge koje određuju stupanj zadovoljstva korisnika uslugom. Jedan od glavnih problema koji se manifestira u određivanju QoS standarda je raspodjela pojedine vrijednosti na svaki mrežni element i to na način da se postigne ciljna vrijednost kvalitete usluge od kraja do kraja. Sama kvaliteta usluge i pojmovi koji je opisuju predstavljaju važne elemente pružanja bilo koje usluge. Za profesionalno upravljanje QoS-om u telekomunikacijama, od velike važnosti je razumijevanje koncepta kvalitete i upravljanja kvalitetom, [6].

U nastavku su opisani sljedeći parametri kvalitete:

- propusnost,
- kašnjenje,
- varijacije kašnjenja,
- gubici.

### 3.1. Propusnost

Propusnost predstavlja maksimalnu brzinu prijenosa koja se može postići između dva kraja mreže i mjeri se u bitovima po sekundi. Određuje koliko podataka može proći kroz međupropusni kanal u bilo kojem trenutku. Propusnost je određena načinom implementacije fizičkog i logičkog sloja, te samom organizacijom konekcija unutar mreže. Za propusnost nije samo bitan kapacitet kanala, već i broj tokova podataka koji dijele zajedničku infrastrukturu između dvije krajnje točke. Neodgovarajuća propusnost povećava kašnjenje paketa te oni provode više vremena u redovima čekanja mrežnih uređaja. Ukoliko je mreža jako zagušena, paketi se mogu izgubiti ako je propusnost neodgovarajuća. Opseg u terminu uspješno prenesenih paketa je jednak odnosu ukupnog broja uspješno prenesenih paketa u promatranom vremenu, dok opseg u terminu prenesenih bajta predstavlja ukupni broj okteta koji su uspješno preneseni u određenom vremenu.

### 3.2. Kašnjenje

Kašnjenje predstavlja vrijeme prijenosa paketa između dvije točke u mreži te ovisi o sljedećim parametrima:

- vremenu propagacije signala kroz medij te o vrsti medija, te se na ovu komponentu kašnjenja može utjecati na fizičkoj ili logičkoj razini,
- vremenu procesiranja paketa na čvorovima mreže, odnosno potrebnom vremenu za razmjenu paketa između međuspremnik, obradu adresnih polja, ažuriranje paketa u sekvencu na prijemu i tako dalje,
- vremenu čekanja paketa u redovima koji ovise od usvojene strategije posluživanja redova na usmjerivaču, načinu upravljanja redova i trenutnom prometnom opterećenju.

Postoje dvije vrste kašnjenja:

- fiksno kašnjenje uključuje komponente kao što su serijalizacija, kodiranje, dekodiranje i propagacijska kašnjenja,
- promjenjivo kašnjenje je najčešće posljedica zagušenja i uključuje vrijeme koje paketi provode u mrežnim usmjerivačima dok čekaju pristup prijenosnom mediju.

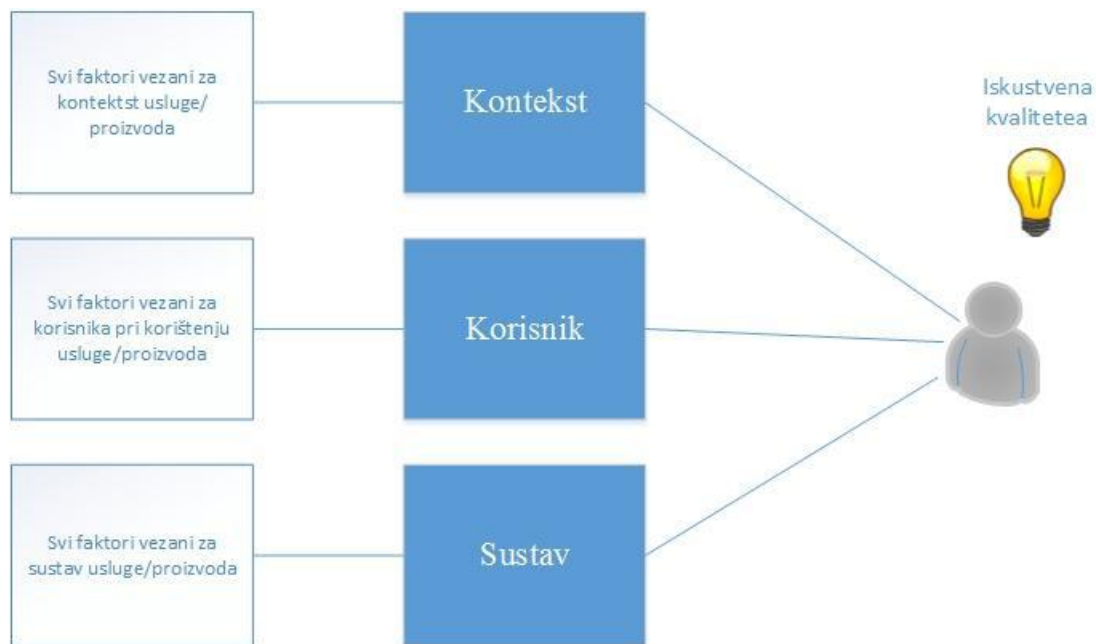
### **3.3. Varijacije kašnjenja i gubici**

Varijacije kašnjenja su razlike u vremenima kašnjenja paketa koji pripadaju istom toku. Ujedno to su mjere apsolutne vrijednosti prvog izvoda sekvence pojedinačnih izmjerenih kašnjenja. Takve varijacije nastaju zbog različitih faktora kao što su vrijeme obrade paketa ili različita dužina redova čekanja. Gubici nastaju zbog grešaka u prijenosu, oštećenih paketa ili zbog zagušenja u mreži, a predstavljaju postotak paketa koji ne stignu na odredište. U trenutku kada u mreži dođe do zagušenja, pojedini segmenti poruke se odbacuju zbog preopterećenja međuspremnika ili prekoračenja graničnog kašnjenja. Gubici na nižim slojevima su posljedice smetnji u kanalu i označavaju se s BER (*Bit Error Rate*).

BER predstavlja omjer broja pogrešno prenesenih bita u promatranom vremenu i ukupnog broja prenesenih bita u tom vremenu. Dijeli se na transmisijski i informacijski. Transmisijski predstavlja broj pogrešno primljenih bitova u odnosu na ukupni poslani broj, dok informacijski predstavlja broj dekodiranih bitova u odnosu na ukupan broj dekodiranih bitova. BER je kvalitetan parametar samo za prva dva sloja mreže. Zadovoljavajuća kvaliteta se postiže malim gubicima. U određivanju uzroka gubitaka vrlo često pomaže praćenje parametra i vremena gubitaka.

### **3.4. Iskustvena kvaliteta QoE**

Iskustvena kvaliteta usluge je koncept koji se bavi mjerenjem korisničkog zadovoljstva korištenjem određene usluge, odnosno korisnički usmjeren koncept kojim se pokušava shvatiti korisničku percepciju usluge kako bi se povećalo zadovoljstvo korisnika uslugom te nije moguće stvoriti model za mjerenje iskustvene kvalitete koji bi vrijedio za sve usluge, ali se može definirati više pojedinih modela koji služe za mjerenje iskustvene kvalitete za različite tipove usluga. Na slici 5 su faktori koji utječu na iskustvenu kvalitetu.

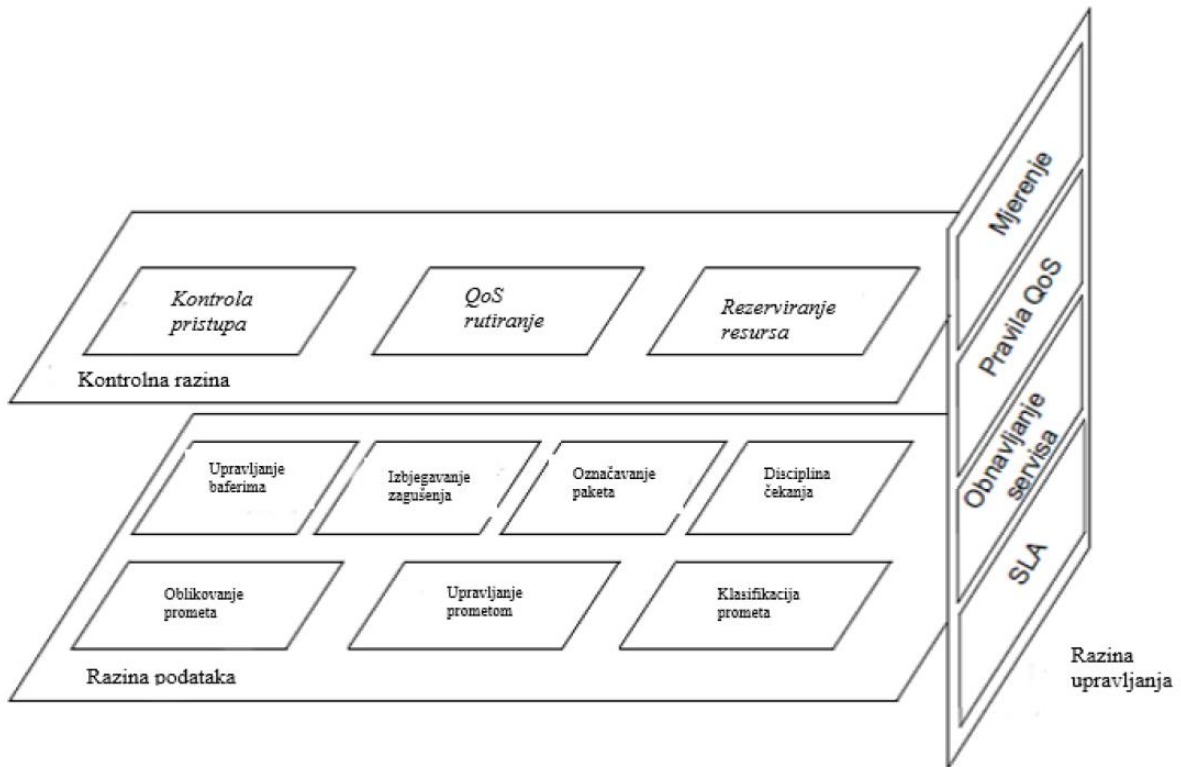


Slika 5. Utjecajni faktori na iskustvenu kvalitetu korisnika [6]

### 3.5. Arhitektura kvalitete usluge

Za osiguravanje parametara kvalitete usluge potrebna je kontrola pristupa, izbjegavanje zagušenja, upravljanje resursima, odgovarajući signalizacijski protokoli, protokoli za usmjeravanje, *gateway* protokoli i transportni protokoli. *Gateway* protokoli omogućavaju komunikaciju između fiksne i bežične mreže. Važno je raspodijeliti systemske i mrežne resurse te uspostaviti odgovarajuću QoS arhitekturu s pripadajućim mehanizmima koji ne trebaju biti vidljivi korisnicima jer je korisniku samo bitno da usluga bude kvalitetna. Pristup integracije podrazumijeva kako QoS mora imati mogućnost konfiguriranja, predviđanja i održavanja kako bi se ostvarile zahtijevane performanse s kraja na kraj, dok princip separacije podrazumijeva nužno razlikovanje funkcija prijenosa, kontrole i upravljanja. Važno je utvrditi po kojem principu će se implementirati sustavi koji podržavaju QoS koncept. Glavna namjena arhitekture je definirati generičke mrežne mehanizme koji kontroliraju odgovor mreže na zahtjeve za uslugom. Arhitektura se sastoji od tri razine kao što to prikazuje i slika 6 [9]:

- kontrolna razina – sadrži mehanizme koji se odnose na putanje prometa korisničkih podataka, odnosno upravljanje putevima prijenosa podataka,
- razina upravljanja – sadrži mehanizme koji se odnose na postupanje, administriranje i upravljanje aspektima prometa korisničkih podataka,
- podatkovna razina – sadrži mehanizme koji se neposredno primjenjuju na promet korisničkih podataka.



Slika 6. Arhitektura kvalitete usluge [10]

Pravila QoS-a predstavljaju skup propisa za administriranje, upravljanje i kontroliranje pristupa mrežnim resursima. Obnavljanje prometa se definira kao reakcija mreže u uvjetima kvara, te ju je potrebno razmatrati na svim slojevima. Mehanizmi upravljanja redovima rade s paketima koji čekaju na prienos i donose odluke o spremanju ili odbacivanju tih paketa. Rješenja o upravljanju usmjerivačima se razlikuju najviše u kriterijima odbacivanja paketa i izboru paketa koji će biti odbačeni. Postoji nekoliko disciplina odbacivanja kojima se odlučuje koje pakete odbaciti, a to su:

- *droptail* koji odbacuje novopristigle pakete i to je najraširenija strategija,
- *front drop* koji čuva novopristigle pakete na račun onih koji najduže čekaju u redu,
- *random drop* koji čuva novopristigle pakete na redu čekanja, uz odbacivanje slučajno izabranog paketa iz reda.

Mehanizmi kontrolne razine su odgovorni za konfiguriranje mrežnih čvorova, a kontrolna razina obuhvaća pristup, rezerviranje resursa i QoS usmjeravanje. Kontrolom pristupa koji može biti parametarski ili mjerno osnovan je određeno koji će promet biti pušten u mrežu. Kod parametarskog pristupa, kao glavni kriteriji se uzimaju najgori slučajevi parametara kvalitete usluge, dok se kod mjerno zasnovanog pristupa koriste trenutno mjerene vrijednosti parametara kvalitete usluge. Mehanizmi kontrole pristupa su izravno povezani s

mehanizmima rezervacije, te oni moraju uzajamno raditi kako bi se osigurao stvarni QoS. Izbor paketa koji se isporučuju u izlazne linkove kontroliraju mehanizmi raspoređivanja paketa. Nekoliko je glavnih pristupa a to su:

- FIFO (*First in first out queuing*),
- FQ (*Fair Queuing*),
- PQ (*Priority queing*),
- WFQ (*Weighted Fair Queuning*),
- CBQ (*Class Based Queuing*).

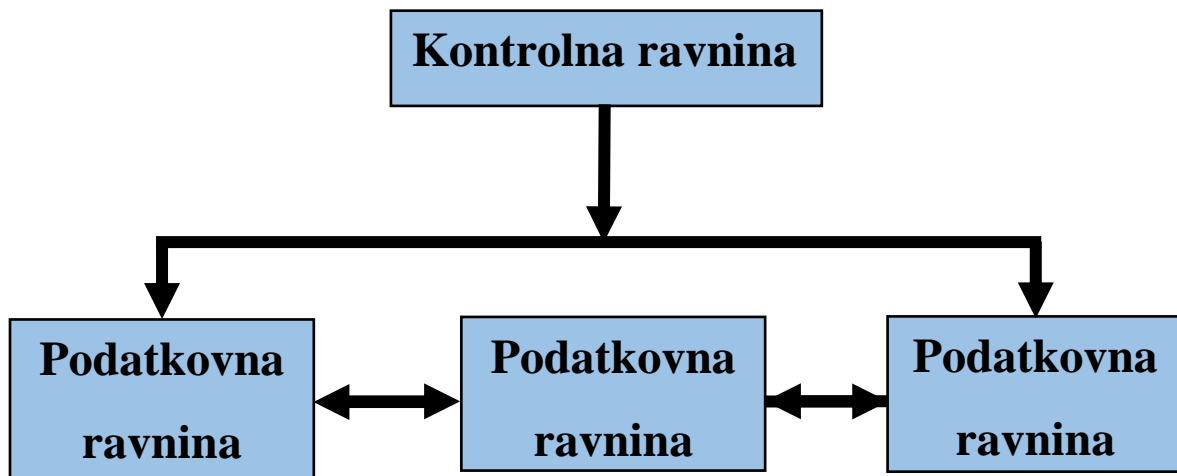
## 4. SD-WAN UMREŽAVANJE

SD-WAN (*Software Defined Wide Area Network*) mreže predstavljaju oblik mrežne infrastrukture kojim se nastoje optimizirati mrežni resursi te samim time prilagoditi mrežu poslovnim potrebama, aplikacijama i prometu. SD-WAN bi mogao biti rješenje i odgovor na probleme osiguravanja QoE i QoS u višeslužnim mrežama. Ovom mrežom se stvara programabilna infrastruktura koja se razlikuje od fizičkih uređaja i dosadašnjih konvencionalnih mreža jer se pomoću SDN kontrolera upravlja mrežnom arhitekturom i automatizacijom. SDN kontroleri nisu mrežni uređaji, oni mogu iskoristiti prednosti mjerila, pohrane podataka i dostupnosti suvremenih resursa računalstva u oblaku. Oni se izgrađuju na otvorenim platformama što im omogućuje korištenje i upravljanje mrežne opreme različitih proizvođača. Razdvajanjem upravljačkih i prijenosnih slojeva se uvelike povećava fleksibilnost i ubrzava vrijeme plasiranja novih aplikacija na tržište. Brže reakcije na prekide u mreži poboljšavaju dostupnost mreže, dok programibilnost olakšava IT organizacijama automatizaciju mrežnih funkcija smanjujući operativne troškove. Riječ je o mrežnoj infrastrukturi koja je dinamična isplativa i prilagodljiva u razvoju što ju čini savršenom za dinamičnu prirodu velike propusnosti današnjih aplikacija. [11]

Cilj softverski definiranih mreža je omogućiti mrežnim administratorima i inženjerima brzu reakciju na promjenu poslovnih zahtjeva putem centralizirane upravljačke jedinice. Obuhvaća više vrsta mrežnih tehnologija osmišljenih kako bi mreža bila fleksibilnija i kako bi podržala virtualnu infrastrukturu poslužitelja te ujedno zadovoljila velike potrebe propusnosti današnjih aplikacija. Svrha je odvojiti mrežno upravljanje i prosljeđivanje čime je omogućeno da mrežno upravljanje postane izravno programabilno i da se temeljna infrastruktura proširi. [12]

Trenutno je najzastupljenija metoda umrežavanja putem središnje upravljačke jedinice razdvajanjem upravljačke logike na računalne resurse izvan uređaja. SDN kontroleri pružaju centralizirani prikaz cjelokupne mreže i omogućuju mrežnim administratorima upravljanje osnovnim sustavima. Prvim standardom u SDN-u se smatra *OpenFlow*, dok je jedan od najčešće korištenih protokola *Southbound API (Application Programming Interface)*. *Northbound API* je protokol kojim je funkcija komunikacija s aplikacijama i pomaganje mrežnim administratorima da programski oblikuju promet i implementiraju usluge. *OpenFlow* je otvoreni standard za komunikacijski protokol koji omogućuje povezivanje upravljačke

razine s razinom prosljeđivanja ali ne predstavlja jedini dostupan razvojni protokol za softverski definirane mreže, [11]. Na slici 7 je prikazana infrastruktura softverski definirane mreže.



Slika 7. Infrastruktura softverski definirane mreže, [12]

*Open Flow* se u literaturi često spominje kao sinonim za softverski definirano umrežavanje ali je to samo jedan od elemenata u cjelokupnoj infrastrukturi. Pohrana informacija i računalstvo su iznimno profitirali inovacijama u virtualizaciji i automatizaciji ali su prisutna ograničenja u mreži. Softverski definirana umrežavanja omogućuju unaprjeđenje dosadašnjih podatkovnih centara što dovodi do fleksibilnijeg načina upravljanja mrežom.

Softverski definirana mreža može biti povezana i s drugom tehnologijom kao što je virtualizacija mrežnih funkcija NFV (*Network Function Virtualization*). NFV omogućuje virtualizaciju mrežnih funkcija temeljenih na uređajima kao što su balanseri opterećenja i akceleratori za WAN (*Wide Area Network*). Takvo centralizirano upravljanje omogućuje softverski definiranim mrežama da učinkovito prate virtualne funkcije mreže koje omogućuje NFV, [15].

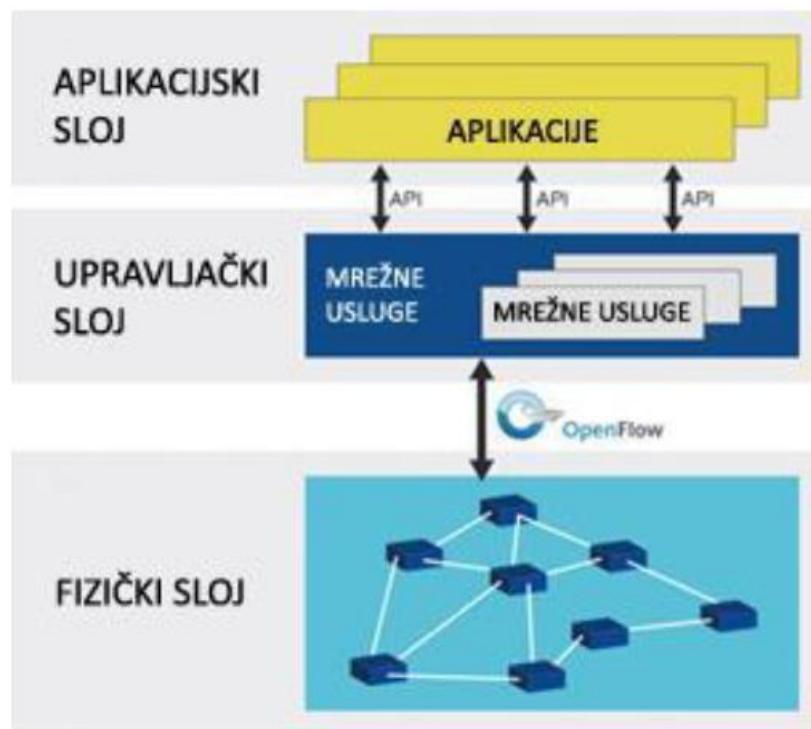


## 4.1. Arhitektura softverski definirane mreže

Razvojem mrežnih aplikacija velike propusnosti, povećavaju se i zahtjevi na brzini obrade podataka i samom upravljanju paketima u mrežnim uređajima poput usmjeritelja, komutatora i tome sličnih uređaja. Svrha koncepta softverskog upravljanja mrežom je upravo razdvajanje vertikalne mrežne infrastrukture na zaseban upravljački i podatkovni sloj te otvaranje drugih mogućnosti programabilnosti mreža. Ključnu ulogu u tome ima središnja upravljačka jedinica koja je odgovorna za upravljanje uređajima pod svojom domenom. Arhitektura softverski definirane mreže se sastoji od tri sloja:

- aplikacijski sloj,
- upravljački sloj,
- fizički sloj.

Na slici 8 je prikazana arhitektura softverski definirane mreže.



Slika 8. Arhitektura softverski definirane mreže, [17]

#### 4.1.1. SDN kontroleri

Upravljački sloj obavlja sve složene funkcije kao što su usmjeravanje, određivanje pravila te sigurnosne provjere, te se sastoji od jednog ili više poslužitelja. Softverski definirana upravljačka jedinica ili kontroler definira tok podataka koji se pojavljuje na podatkovnoj razini ili fizičkom sloju. Kontroler potvrđuje da je komunikacija mrežnim resursima dopuštena, odnosno on izračunava rutu i javlja informaciju o propuštanju tog toka duž određene rute. *Switch*-evi upravljaju daljnjim usmjeravanjem, a komunikacija između njih i kontrolera odvija se preko *OpenFlow* protokola i APJ-ji. Prema [16], u takvoj infrastrukturi kontroleri obavljaju sljedeće:

- definiranje mrežnih uređaja koji upotpunjuju infrastrukturu mreže,
- definiranje korisničke opreme kao što su prijenosna računala, stolna računala, printeri i mobilni uređaji,
- upravljanje topologijom mreže, održavanjem informacija o detaljima povezanosti između mrežnih uređaja i korisničke opreme na koju su izravno povezani,
- upravljanje prometnim tokom, održavanjem tablica usmjeravanja toka kojima upravlja kontroler i obavljanje svih potrebnih koordinacija s uređajima kako bi se osigurala sinkronizacija ulaznog toka s bazom podataka.

*Switch*-evi obavljaju sljedeće funkcije:

- prosljeđuje prvi paket prijenosa na kontroler omogućavajući kontroleru odluku treba li se tok podataka dodati u tablicu usmjeravanja *switch-a*,
- prosljeđuje dolazne pakete s odgovarajućeg porta na temelju tablice usmjeravanja koja može sadržavati informacije o prioritetima posluživanja koje određuje kontroler,
- može trajno ispustiti pakete na određenoj ruti ako to odredi kontroler, a ispuštanje paketa se može iskoristiti u sigurnosne svrhe, sprječavajući napade uskraćivanja usluga ili zahtjeve za upravljanje prometom.

Arhitektura softverski definirane mreže se može promatrati preko tri apstrakcijska sloja kao što su prosljeđivanje, distribucija i specifikacije. Apstrakcijski sloj prosljeđivanja je neovisan o fizičkim svojstvima mreže te obavlja ulogu izvršavanja i podrške aplikacijski prosljeđenim zahtjevima. Distribucijski sloj stvara temelj za rad mrežnih aplikacija uz logički

centraliziranu ulogu upravljanja mrežnim uređajima te prikupljanja informacija o njihovom radu i međusobnoj povezanosti. Apstrakcijskom sloju specifikacije pripada način na koji mrežne aplikacije realiziraju svoje primarne funkcije bez zadiranja u samu implementaciju na fizičkoj razini. Taj sloj funkcionira upotrebom virtualizacije i programskih jezika.

U velikim mrežama je gotovo nemoguće postaviti jedan kontroler za upravljanje svim mrežnim uređajima pa se u takvim slučajevima koriste zasebne softverski definirane domene. Prema [18], razlozi za korištenje domena su sljedeći

- privatnost: moguće je odabrati primjenu različitih pravila o privatnosti na različitim domenama softverski definiranih mreža. Domena može zatražiti da neke informacije o mreži u domeni ne budu otkrivene entitetima izvan mreže;
- skalabilnost: broj uređaja kojim kontroler može uspješno upravljati je ograničen. Ako se radi o velikoj mreži, mora se implementirati više kontrolera;
- dijeljena implementacija: transportna mreža se može sastojati od dijelova tradicionalne i novije infrastrukture. Dijeljenje mreže u više pojedinačno upravljanih domena omogućuje veću fleksibilnost.

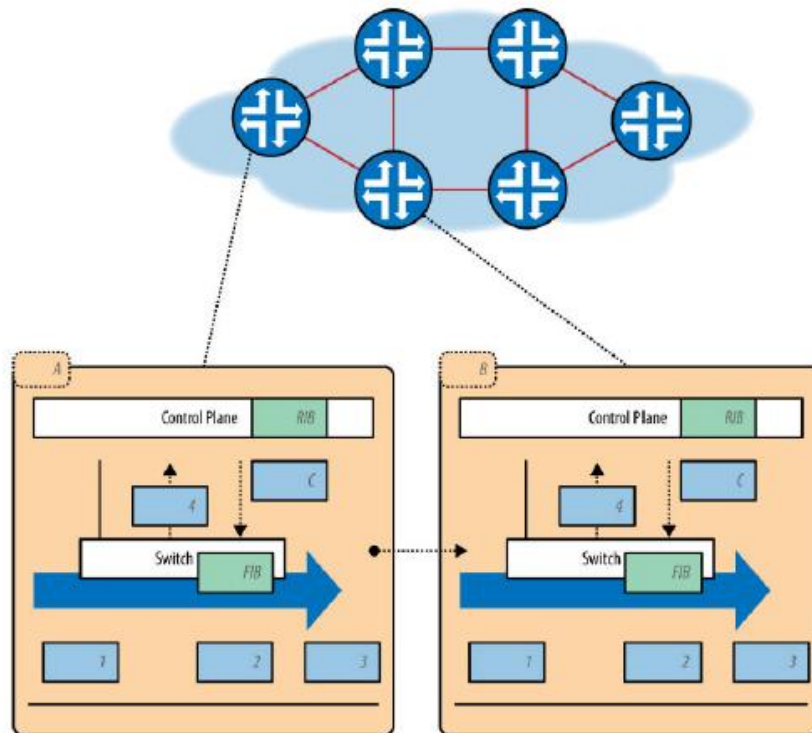
Postojanje mnogo različitih domena stvara potrebu za komunikacijom između pojedinačnih kontrolera što može biti omogućeno standardiziranim protokolom za razmjenu informacija usmjeravanja. Trenutno je u razvoju protokol SDNi (*Software Defined Networking interface*) koji je predviđen za povezivanje kontrolera domena softverski definiranih mreža. Njegove funkcije uključuju:

- postavljanje koordinata protokola što potječe od aplikacija kojima je poznat zahtjev za rutom, QoS i dogovorena pravila na razini usluge za različite SDN domene,
- informacije od dostupnosti razmjene podataka između domena kako bi se pojednostavilo usmjeravanje.

#### **4.1.2. Kontrolna i podatkovna ravnina**

Jedan od temeljnih načela softverski definirane mreže je odvajanje kontrolne i podatkovne cjeline. To odvajanje pruža mrežnom operateru određene prednosti u odnosu na centraliziranu programsku kontrolu. Kontrolna cjelina predstavlja lokalni skup koji se koristi za izradu ulaza tablice prosljeđivanja koje koristi podatkovna cjelina za prosljeđivanje

prometa između ulaznih i izlaznih portova na uređaju. Mrežna topologija se pohranjuje pomoću skupa podataka koji se naziva RIB (*Routing Information Base*). FIB (*Forwarding Information Base*) predstavlja ulazna tablica prosljeđivanja te se često zrcale između kontrolne i podatkovne cjeline uređaja. Prema [6], kontrolni entitet razvija pogled na topologiju mreže koji zadovoljava određena ograničenja, a može se programirati ručno, naučeno kroz promatranje ili izgraditi od dijelova informacija prikupljenih kroz diskurs s drugim instancama kontrolne cjeline. Na slici 9 je prikazana kontrolna i podatkovna cjelina određene mreže.



Slika 9. Kontrolna i podatkovna cjelina, [6]

Na slici je pri vrhu prikazana mreža *switchev-a* s proširenjem detalja kontrolne i podatkovne cjeline dvaju *switch-a*. Prema slici, paketi su primljeni od *switcha* A na lijevoj strani kontrolne cjeline te se prosljeđuju prema *switchu* B na desnoj strani. Kontrolna i podatkovna cjelina su odvojene, ali se nalaze u istom kućištu. Paketi se primaju na ulaznim portovima gdje se podatkovna cjelina nalazi. Kada je paket dostavljen kontrolnoj cjelini podatci koji se nalaze u paketu se obrađuju i rezultiraju promjenom RIB-a. Ako je primljeni paket došao od nepoznate MAC adrese, kontrolna cjelina vraća paket podatkovnoj cjelini koja prosljeđuje paket.

## 4.2. *Open Flow* protokol

*Open Flow* protokol je protokol koji je sličan bilo kojem drugom protokolu za umrežavanje kojem je cilj da put za podatke bude programiran. Međutim, *Open Flow* protokol je spoj klijent- server tehnologije i raznih protokola usmjeravanja. Neke od ključnih komponenata ovog protokola su postale dio zajedničke definicije softverski definiranih mreža, a to su:

- odvajanje kontrolne i podatkovne cjeline,
- korištenje standardiziranog protokola između kontrolera i agenta,
- pružanje mrežnog programiranja iz centraliziranog pogleda.

*Open Flow* je ujedno i skup protokola i API-ja te su trenutno podijeljeni u dva dijela:

- *Wire* protokol za uspostavu kontrolne sesije, definiranje strukture poruke za razmjenu promjene toka i prikupljanje statistika i definiranje temeljnih struktura *switche-a*.
- Konfiguracijski i upravljački protokol za dodjeljivanje fizičkih portova određenom kontroleru, definiranje visoke dostupnosti i ponašanja kod neuspjelog povezivanja s kontrolerom.

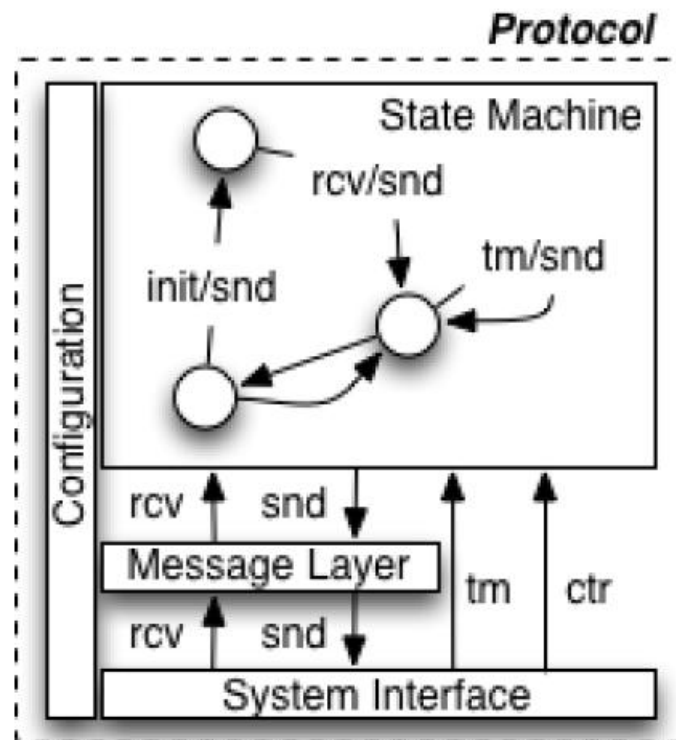
*Open Flow* je otvoreni protokol temeljen na standardima koji definira kako kontrolna cjelina može biti konfigurirana i kontrolirana s centralnog mjesta. Njegovim korištenjem kontroler može upravljati kako će se paketi proslijediti kroz mrežu. Protokol standardizira jedan centralni protokol koji može stvoriti tablice prosljeđivanja i upravljati njima zamjenjujući sve ostale tablice prosljeđivanja.

### 4.2.1. Arhitektura *Open Flow* protokola

Arhitektura *Open Flow-a* se može podijeliti prema četiri komponente kao što su:

- *Message Layer*,
- *State Machine*,
- *System Interface*,
- *Data Model*.

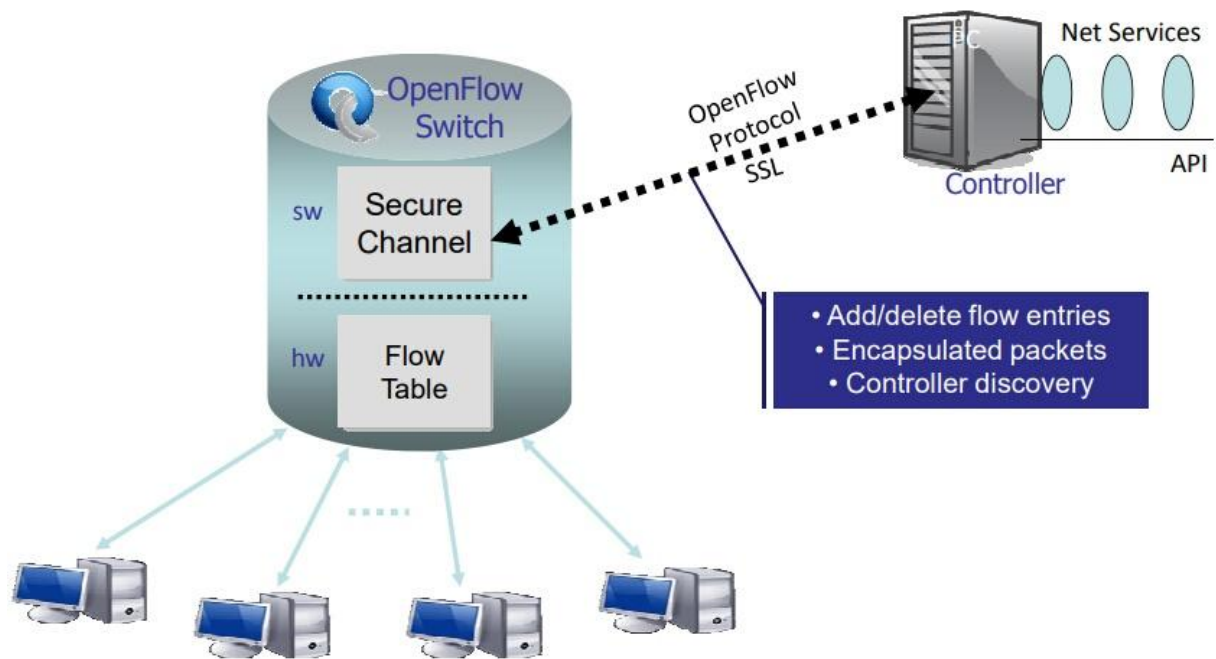
Spomenute komponente su prikazane na slici 10.



Slika 10. Komponente *Open Flow* protokola [17]

*Message Layer* je temelj protokola te definira ispravnu strukturu i semantiku poruka te podržava mogućnost konstruiranja, kopiranja, usporedbe, ispisa i rukovanja porukama. *State Machine* definira ponašanje protokola na nižoj razini te se koristi za opisivanje radnji kao što su pregovaranje, otkrivanje sposobnosti, kontrola prometnog toka, isporuka i tako dalje. *System Interface* definira kako protokol komunicira s okolinom te spaja obavezna i moguća sučelja zajedničkom namjenom kao što su TLS i TCP transportni protokoli. *Configuration* može obuhvatiti onoliko podataka kolika je veličina međuspremnika. Unutar *Data Model*a se nalaze *switchevi* koji održavaju relacijski model podataka koji sadrži attribute za svaku *Open Flow* apstrakciju. Prema [17], ti atributi mogu opisivati sposobnost apstrakcije, stanje konfiguracije ili neki skup aktualnih statistika.

Kontroler softverski definirane mreže komunicira s *Open Flow* kompatibilnim preklopnima koristeći *Open Flow* koji pokreće SSL (*Secure Sockets Layer*). *Switchev*-i su međusobno povezani i s krajnjim korisnicima koji čine izvorišta i odredišta tokova paketa. Na slici 11 je prikazana arhitektura *Open Flow* protokola.



Slika 11. Arhitektura *Open Flow* protokola, [18]

*Open Flow* se koristi za centralno upravljanje i usmjeravanje mrežnog prometa za routere i *switchev-e*. Poruke razmijenjene u *Open Flow* protokolu se mogu podijeliti u tri glavne skupine:

- poruke kontrolera,
- asinkrone poruke,
- simetrične poruke.

#### 4.2.2. Tablice usmjeravanja *Open Flow* protokola

Tablica usmjeravanja je osnovni dio logičke arhitekture te svaki paket koji ulazi u *switch* prolazi kroz jednu ili više tablica usmjeravanja, a svaka tablica usmjeravanja sadrži ulazne vrijednosti. Tablica usmjeravanja, odnosno njene ulazne vrijednosti se sastoje od šest komponenti:

- *MatchFields*: koristi se za odabir paketa čije se vrijednosti u poljima podudaraju, odnosno odgovaraju jedna drugoj,
- *Priority*: mogući prioriteti kod unosa tablice,
- *Counters*: ažuriraju se za moguće podudaranje paketa. Specifikacija *OpenFlow* protokola definira različite vremenske oznake, npr. broj primljenih 16 bajtova i

paketa po priključku, po tablici usmjeravanja ili po unosu tablice usmjeravanja, zatim broj ispuštenih paketa te trajanje usmjeravanja,

- *Instructions*: aktivnosti koje treba poduzeti ako se paketi podudaraju,
- *Timeouts*: maksimalno vrijeme mirovanja prije prekida toka.
- *Cookie*: vrijednost podataka koju odabire kontroler. Može se koristiti za popunjavanje statistike toka ili izmjene i brisanje toka. Ne koristi se prilikom obrade paketa.



## 5. MPLS UMREŽAVANJE

*Multi-Protocol Label Switching* (MPLS) ili višeprotokolno komutiranje labela je tehnologija koja osigurava tradicionalni model prosljeđivanja paketa kroz mrežu, na mnogo elegantniji, efikasniji i brži način nego što su to uspjevale prijašnje tehnike poput ATM-a ili *Frame Relay*-a. Bitna prednost tog postupka je da se informacije iz zaglavlja paketa analiziraju samo jednom, a dalje se postupak usmjeravanja paketa zasniva samo na provjeravanju labela koje zapravo predstavljaju identifikacijske oznake paketa i fiksne su duljine. MPLS mehanizmi predstavljaju moćan alat za osiguranje kvalitete usluge prema krajnjim korisnicima uz optimalno iskorištavanje mrežnih resursa.

### 5.1 Karakteristike MPLS mreže

Cilj razvoja MPLS-a je postizanje poboljšanja u vidu propusnosti i kašnjenja kod usmjeravanja temeljenom na IP-u. U mnogobrojnim pokušajima kombinacije IP i ATM tehnologije, sredinom 90-tih godina je došlo do razvoja MPLS mreže. Temeljili su se na sličnom pristupu, odnosno koristili su OSPF (*Open Shortest Path First*) protokol kojim su dodjeljivali pakete u mreži u kojoj se nalaze ATM komutatori koji su odgovorni za usmjeravanje. Drugi ciljevi razvoja MPLS mreže su bili:

- spajanje glasa, videa i aplikacija preko jedne IP mreže,
- mogućnost primjene IP mreža u smislu zadovoljavanja sve većih zahtjeva za IP prometom,
- omogućavanje diferencijalnih razina usluga baziranih na IP-u,
- virtualne privatne mreže.

S obzirom na to kako postoje aplikacije koje su osjetljive na veća kašnjenja, razvila se i potreba za uvođenjem MPLS tehnologije. Ovom tehnologijom se žele izbjeći nedostaci koji se pojavljuju kod tradicionalnog usmjeravanja. Tehnikom zamjena labela tijekom prijenosa paketa kroz mrežu, MPLS analizira zaglavlja paketa jednom za razliku od tradicionalnog kod kojeg se analiza provodi pri svakom koraku od usmjerivača do usmjerivača. Znatno je kraće vrijeme procesuiranja informacija u usmjerivačima u odnosu na IP tehnologiju, što će biti demonstrirano na analitičkim primjerima koji se nalaze u šestom poglavlju. Ovakvi usmjerivači se nazivaju LSR (*Label Switch Router*) koji obavljaju pregled i zamjenjuju stare oznake, što predstavlja efikasnije i brže usmjeravanje.

Tehnologija MPLS ima mnogobrojne prednosti u odnosu na druge opcije usmjeravanja podataka u mreži. Neke od prednosti su sljedeće:

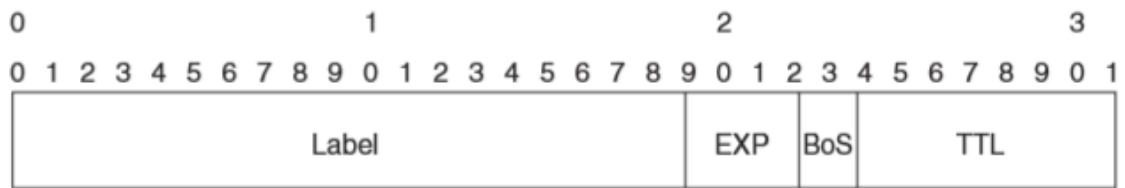
- funkcioniira i omogućava prijenos koji se bazira na okvirima i ćelijama,
- sposobnost izgradnje MPLS mreže u već postojeće mreže,
- podržava nekoliko aplikacija i može biti proširena u više segmenata kao što su MPLS i IP usmjerivači, QoS podrška za serijski orijentirane usluge, prometno inženjerstvo, kompatibilnost VPN (*Virtual Private Network*), ATM, višeslužni preklopnici i optički preklopnici,
- MPLS integrira brzinu i performanse značajki drugog sloja sa stabilnošću i inteligencijom trećeg sloja,
- tehnologija nije limitirana na bilo koji posebni protokol što omogućuje konsolidaciju višeslojnih tehnologija,
- sposobnost mreže da prilagodi veći broj korisnika s MPLS tehnologijom,
- podrška za beskonačno slaganje labela,
- tehnikom prosljeđivanja labela omogućava se brže i jednostavnije usmjeravanje za razliku od usmjeravanja temeljenog na IP usmjeravanju,
- smanjuje se vrijeme obrade procesa i povećava učinkovitost.

## 5.2. Arhitektura MPLS mreže

Glavni elementi MPLS mreže su:

- MPLS zaglavlje,
- LSR,
- LSP (*Label Switched Path*),
- NHLFE (*The Next Hop Label Forwarding Entry*),
- ILM (*Incoming Label Map*),
- FEC (*Forwarding Equivalence Class*),
- LDP (*Label Distribution Protocols*).

Zaglavlje MPLS se sastoji od 32 bita te se naziva umetnutim zaglavljem jer se MPLS zaglavlje umeće iza zaglavlja podatkovnog sloja i ispred zaglavlja mrežnog sloja. Na slici 12 je prikazano MPLS zaglavlje.



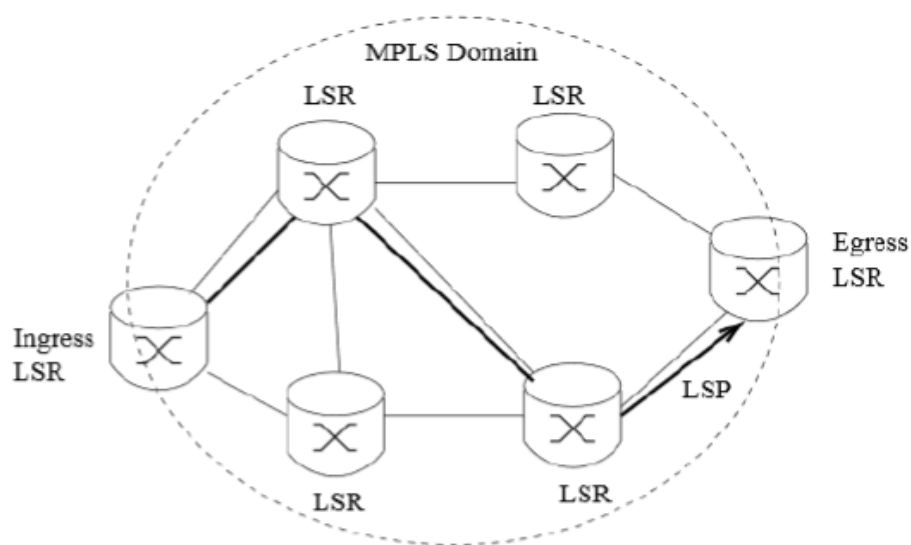
Slika 12. MPLS zaglavlje, [23]

Dijelovi zaglavlja prikazani na slici 12 su:

- Oznaka (*Label*),
- EXP (*Experimental use*),
- BoS (*Bottom of Stack*),
- TTL (*Time To Live*).

Oznaka je polje veličine 20 bita i opisuje putanju koju paket prolazi do odredišta, dok je EXP polje veličine 3 bita i koristi se pri određivanju tretmana paketa. BoS opisuje zadnju labelu u nizu koja se može nadovezati jedna na drugu i veličine je jednog bita. TTL je polje koje opisuje životni vijek MPLS paketa, te se smanjuje za 1 tijekom prolaska kroz LSR. Ako TTL iznosi nula prije odredišnog čvora, dolazi do odbacivanja paketa.

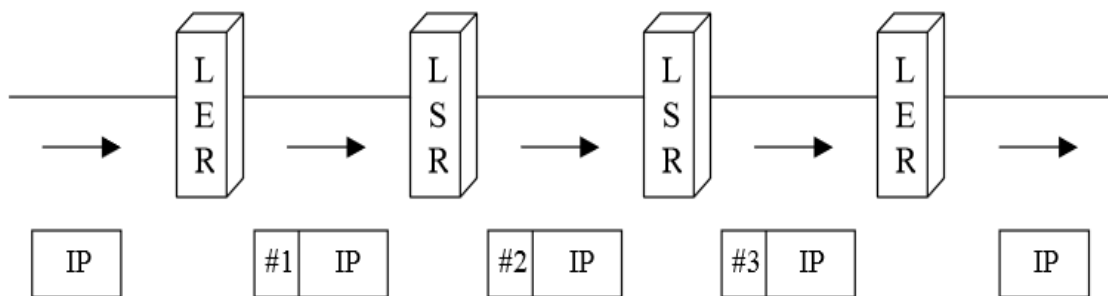
LSR je usmjerivač koji spada u fizički dio mreže koji podržava tehnologiju MPLS. Kompatibilan je s MPLS-om u pogledu primanja i transmisije označenih paketa na podatkovnom sloju. Na slici 13 su prikazane tri vrste LSR-a u mrežnoj domeni MPLS-a.



Slika 13. MPLS domena, [23]

Ulazni LSR prima neoznačeni paket kojem dodaje oznaku i šalje ga u MPLS domenu, dok izlazni LSR prima označene pakete kojim uklanja oznaku i isporučuje pakete dalje. To su rubni LSR-ovi. Posredni LSR prima označeni paket i pregledava oznaku, uklanja staru oznaku i dodaje novu kako bi se paket prosljedio unaprijed definiranom polju.

LSP sadrži niz povezanih LSR-ova koji komutiraju označene pakete, odnosno putanju u MPLS mreži kojom putuju označeni paketi jedne veze. Na LSP-u je ulazni LSR prvi, a izlazni zadnji. Na slici 14 je prikazan prolazak paketa kroz LSP.

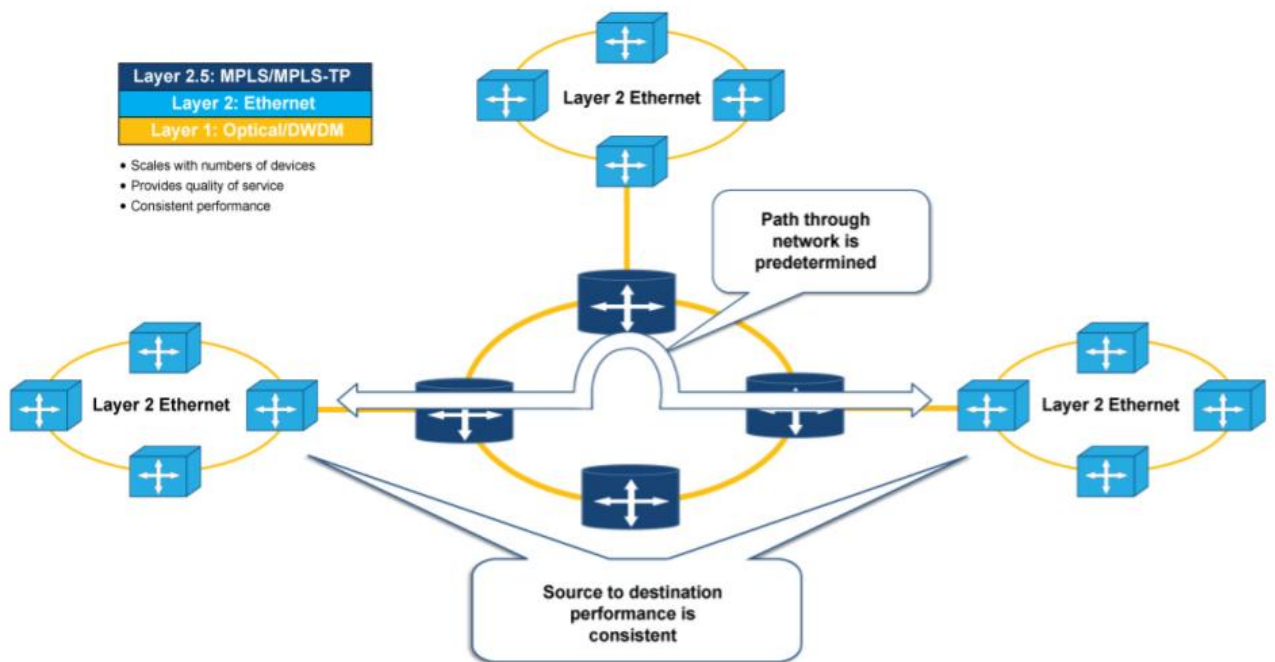


Slika 14. Prikaz prolaska paketa kroz LSP, [24]

NHLFE sadrži informacije o sljedećem skoku paketa i koristi se pri prenošenju označenog paketa mrežom. Svaka oznaka paketa je povezana s NHFLE, dok ILM predstavlja mapu dolaznih oznaka, poznata i kao tablica prosljeđivanja labela koja opisuje mapiranje između labele dolazećeg paketa i skupa NHFLE. ILM je najbližnja s tablicom usmjeravanja kod IP usmjernika. FEC predstavlja tok paketa koji se prosljeđuju istom putanjom, a jednako su tretirani s postupkom prosljeđivanja. Paketi koji se nalaze u istom FEC-u, imaju iste oznake, ali oni paketi koji imaju iste oznake ne moraju pripadati istom FEC-u. Onaj usmjerivač koji odlučuje kojoj klasi pripada koji FEC je ulazni LSR koji klasificira i dodaje oznaku paketu. LDP se koristi u procesu postavljanja puta.

### 5.3. Pozicija MPLS-a u OSI modelu

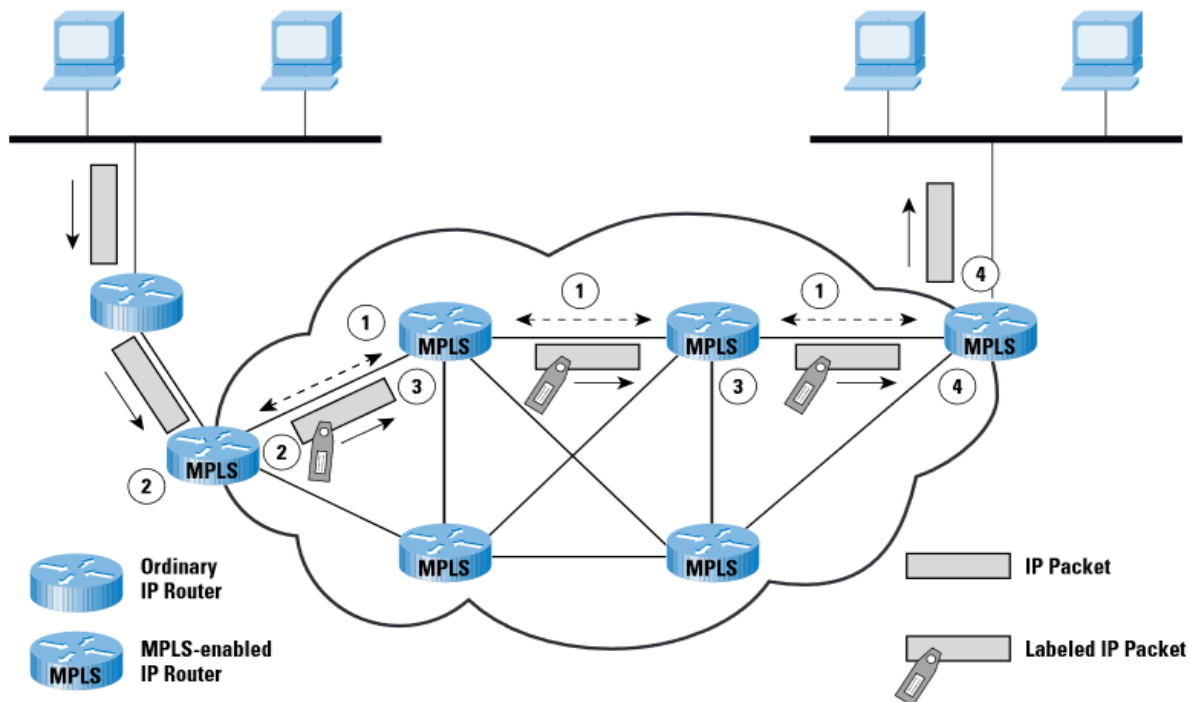
MPLS tehnologija se u OSI referentnom modelu nalazi između drugog i trećeg sloja. Ima funkcije pojednostavljenog konekcijskog prosljeđivanja paketa na drugom sloju te fleksibilnost i skalabilnost trećeg sloja. Upravo se iz tog razloga ne može sa sigurnošću utvrditi pripada li MPLS mrežnom ili podatkovnom sloju. Na slici 15 je prikazana pozicija MPLS-a u OSI modelu.



Slika 15. Pozicija MPLS-a u OSI referentnom modelu, [25]

#### 5.4. Operacije u procesu usmjeravanja paketa u MPLS domeni

Prema slici 16, operacije u procesu usmjeravanja paketa u MPLS domeni uključuju četiri koraka. Na slici 16 su prikazane MPLS operacije.



Slika 16. MPLS operacije, [26]

Prema slici 16, definirani su putevi kroz mrežu (LSP) i moraju biti uspostavljeni parametri kvalitete usluge (QoS) tijekom tog puta. Parametri kvalitete određuju:

- koliko je potrebno resursa kako bi se uspostavio put,
- politiku čekanja i odbacivanja koja se mora uspostaviti u svakom LSR-u za pakete.

Kako bi se to ostvarilo, koriste se unutarnji protokoli usmjeravanja kao što su OSPF koji definira dostupnost odredišta i usmjeravanja informacija. Protokol LDP specificira eksplicitnu rutu i dodjeljuje odgovarajuće vrijednosti labela.

U drugom koraku paket ulazi u MPLS domenu kroz ulazni LSR gdje se procesira kako bi se odredilo kojem mrežnom sloju usluga pripada, definirajući usluge. Odnosno, LSR dodjeljuje paket određenom FEC-u te određeni LSP dodajući oznaku paketu prosljeđuje paket.

U trećem koraku svaki LSR u MPLS domeni prima pakete i obavlja funkcije skidanja dolazeće labele i stavljanja prikladne odlazne labele na paket. U posljednjem koraku LSR čita zaglavlje IP paketa i prosljeđuje paket do odredišne destinacije.

## **5.5. MPLS aplikacije**

Funkcionalnost aplikacije je podijeljena na kontrolni i podatkovni dio, a aplikacije se razlikuju u kontrolnom dijelu dok u dijelu prosljeđivanja koriste istu oznaku. Najvažnije MPLS aplikacije su:

- MPLS TE (*MPLS Traffic Engineering*),
- MPLS QoS (*MPLS Quality of Service*).

### **5.5.1 MPLS TE**

MPLS TE predstavlja najvažniju aplikaciju MPLS-a. MPLS prometno inženjerstvo ima veliku ulogu u implementaciji mrežnih usluga koji zahtijevaju određene garancije za kvalitetu usluge (QoS). Mreže bazirane na MPLS tehnologiji koriste TE mehanizme kako bi se smanjila zagušenja u mreži i poboljšale performanse mreže. TE može izmijeniti postojeće sheme u svrhu efikasnijeg raspoređivanja prometnih tokova prema raspoloživim resursima. Svrha je smanjenje zagušenja u mreži i poboljšanje kvalitete usluge u vidu smanjenja kašnjenja tijekom dolaska paketa na odredište. Neke od glavnih funkcionalnosti MPLS TE su:

- izračunavanje puta,

- optimizacija resursa,
- distribucija informacija o linkovima,
- TE LSP signalizacija,
- MPLS prometno inženjerstvo s proširenjima za *DiffServ* arhitekturu,
- protekcijska shema u slučaju ispada nekog od linkova,
- tuneliranje i stavljanje labela.

### 5.5.2. MPLS QoS

Podrška za QoS kod MPLS-a je povezana s klasom usluga CoS. Osnovne funkcije su:

- klasifikacija prometa i označavanje,
- nadgledanje,
- stavljanje u redove i nasumično odbacivanje,
- raspoređivanje,
- odašiljanje.

Klasifikacija se provodi s obzirom na to da postoje različite vrste aplikacija te ih je potrebno na pravilan način tretirati u mreži. Kriteriji su izvorišna i odredišna adresa, tip protokola i aplikacije. Nadgledanje je postupak provjere poštivanja ugovora dolazećeg prometa, a odnosi se na interval i brzinu slanja. Kako ne bi došlo do odbacivanja, različiti prometni tokovi se slažu u redove.

## 6. USPOREDBA MPLS I SD-WAN MREŽE

Usporedba MPLS i SD-WAN mreže je napravljena analitičkim primjerom u cilju prikazivanja vremena kašnjenja paketa tijekom njihovog usmjeravanja. SD-WAN mreža omogućuje korisniku da gradi svoju privatnu mrežu koja spaja geografski udaljene lokacije koristeći Internet mrežu. Privatna MPLS mreža na kojoj leže L2 i L3 VPN usluge pruža korisniku garanciju kvalitete usluge QoS mehanizmima, dok kod javnog interneta postoji usluga gdje promet često ide preko velikog broja *hopova* i *providera* što znatno utječe na kašnjenje. MPLS u mnogim slučajevima donosi podjednako kašnjenje preko iznajmljene linije za povezivanje više lokacija jedne tvrtke s određenim kapacitetom, ali u MPLS domeni može postojati više alternativnih putova do istog odredišta pa će kašnjenje biti drugačije na svakom putu. U slučaju kada se više lokacija povezuje VPN-om kao virtualnim tunelom kroz javnu internet mrežu, smjer se može mijenjati i nema garancije za kašnjenje.

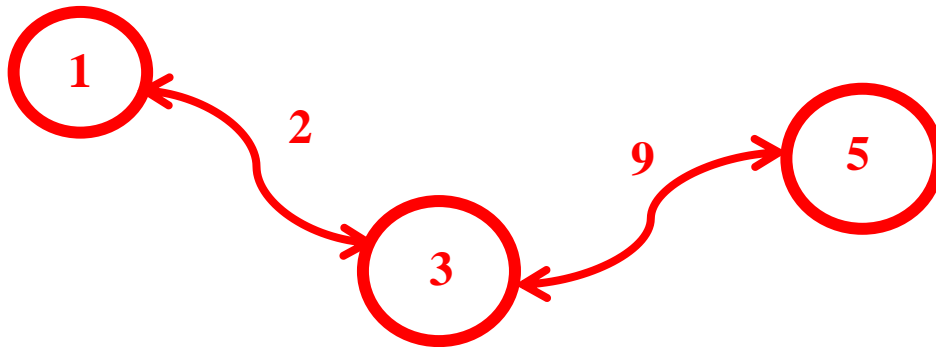
Tijekom izrade analitičkom primjera pretpostavljeno je kako kod MPLS-a ponekad primarni put nije dostupan pa postoje i alternativni putevi koji imaju kašnjenje drugačije od primarnog pa povremeno dolazi do zagušenja jer može postojati više alternativnih putova, dok u SD-WAN-u povremeno dolazi do zagušenja zbog prolaska kroz veliki broj *providera* i *hopova*. Tijekom računanja koristiti će se M/M/1 (međudolazna vremena paketa kao i duljina paketa ravna se po eksponencijalnoj distribuciji). Koristi se matrična topologija mreže koja se sastoji od 5 čvorova te svaki čvor ima link prema svim ostalim čvorovima. U tablici 2 je prikazana topologija mreže.

Tablica 2. Topologija mreže

	1	2	3	4	5
1	0	1	2	4	7
2	1	0	3	5	8
3	2	3	0	6	9
4	4	5	6	0	10
5	7	8	9	10	0



Topologija mreže se sastoji od 5 čvorova i 10 grana. Za proračun je proizvoljno odabran put 1-3-5 na kojem će se odrediti kašnjenje paketa. Iz toga proizlazi kako čvor 1 i 3 povezuje grana 2, dok čvor 3 i 5 povezuje grana 9 kao što to prikazuje slika.



Slika 17. Put paketa

Vrijeme kašnjenja se određuje prema izrazu:

$$T_q = T_{obr_1} + T_{w_1} + T_{s_2} + T_{obr_2} + T_{w_3} + T_{s_9} + T_{obr_1} \quad (1)$$

Članovi unutar izraza predstavljaju:

$T_{obr_1}$  = vrijeme obrade paketa u izvorišnom i odredišnom čvoru (u ovom slučaju čvor 1 i 5),

$T_{w_1}$  = vrijeme čekanja paketa u čvoru 1,

$T_{s_2}$  = vrijeme prijenosa paketa na grani 2,

$T_{obr_2}$  = vrijeme obrade paketa u usputnim čvorovima (u ovom slučaju čvor 3),

$T_{w_3}$  = vrijeme čekanja paketa u čvoru 3,

$T_{s_9}$  = vrijeme prijenosa paketa na grani 9.

Kašnjenje predstavlja zbroj vremena čekanja paketa i vremena prijenosa paketa, pa prema tome vrijedi sljedeći izraz:

$$T_{q_1} = T_{w_1} + T_{s_2} \quad (2)$$

$$T_{q_2} = T_{w_3} + T_{s_9} \quad (3)$$

Uvrštavajući jednadžbu (2) i (3) u jednadžbu (1) dobiva se sljedeći izraz za vrijeme kašnjenja:

$$T_q = 2 \cdot T_{obr_1} + 2 \cdot T_{obr_2} + T_{q_1} + T_{q_2} \quad (4)$$

Prema modelu M/M/1 (duljina paketa ravna se po eksponencijalnoj distribuciji) izraz za vrijeme kašnjenja glasi:

$$T_{q_{1,2}} = \frac{T_s}{1 - \rho} \quad (5)$$

pri čemu je:

$T_s$  = prosječno vrijeme prijenosa paketa,

$\rho$  = prometno opterećenje.

Prosječno vrijeme prijenosa paketa se računa kao omjer duljine paketa ( $p$ ) i kapaciteta grane ( $C$ ) prema sljedećem izrazu:

$$T_s = \frac{p}{C} \quad (6)$$

Tijekom proračuna kapaciteti pojedinih grana kod MPLS-a su držani uglavnom konstantni (10 Mbit/s) ali je u određenim periodima pretpostavljen pad kapaciteta pod pretpostavkom da MPLS pronalazi alternativne puteve jer je primarni nedostupan. Time se pretpostavlja da dolazi do zagušenja jer je kašnjenje na drugim putevima veće, dok kod SD-WAN-a postoji usluga gdje promet često ide preko velikog broja *hopova* i *providera* što znatno utječe na kašnjenje. Stoga je i kod SD-WAN-a pretpostavljeno da se kapacitet mijenja u vremenu, odnosno povremeno dolazi do pada zbog zagušenja.

Prometno opterećenje  $\rho$  se određuje prema izrazu:

$$\rho = \lambda \cdot T_s \quad (7)$$

pri čemu:

$\lambda$  = intenzitet nailazaka paketa na grani (pak/s).

Proračun je napravljen u vremenskom periodu od 24 sata pri čemu se prati ponašanje MPLS-a i SD-WAN-a u vremenu. Duljina paketa  $p$  je držana konstantnim u oba slučaja i iznosi 600 byte-a, dok je intenzitet nailazaka paketa na grani promjenjiv u vremenu.

vemenski period	SD-WAN							
	Tobr1	Tobr2	$\lambda$	C	p	Ts	ro	Tq1
0	0.006	0.003	230	10	600	0.00048	0.1104	0.01854
1	0.006	0.003	230	10	600	0.00048	0.1104	0.01854
2	0.006	0.003	320	8	600	0.0006	0.192	0.01874
3	0.006	0.003	800	7	600	0.00069	0.54857	0.01952
4	0.006	0.003	400	9	600	0.00053	0.21333	0.01868
5	0.006	0.003	100	3	600	0.0016	0.16	0.0199
6	0.006	0.003	580	5	600	0.00096	0.5568	0.02017
7	0.006	0.003	650	4	600	0.0012	0.78	0.02345
8	0.006	0.003	500	10	600	0.00048	0.24	0.01863
9	0.006	0.003	350	10	600	0.00048	0.168	0.01858
10	0.006	0.003	480	8	600	0.0006	0.288	0.01884
11	0.006	0.003	800	7	600	0.00069	0.54857	0.01952
12	0.006	0.003	840	10	600	0.00048	0.4032	0.0188
13	0.006	0.003	1000	5	600	0.00096	0.96	0.042
14	0.006	0.003	920	6	600	0.0008	0.736	0.02103
15	0.006	0.003	750	10	600	0.00048	0.36	0.01875
16	0.006	0.003	920	10	600	0.00048	0.4416	0.01886
17	0.006	0.003	620	10	600	0.00048	0.2976	0.01868
18	0.006	0.003	500	3	600	0.0016	0.8	0.026
19	0.006	0.003	750	9	600	0.00053	0.4	0.01889
20	0.006	0.003	400	9	600	0.00053	0.21333	0.01868
21	0.006	0.003	550	8	600	0.0006	0.33	0.0189
22	0.006	0.003	250	10	600	0.00048	0.12	0.01855
23	0.006	0.003	600	10	600	0.00048	0.288	0.01867
24	0.006	0.003	400	10	600	0.00048	0.192	0.01859

Tablica 3. Proračun kašnjenja za SD-WAN

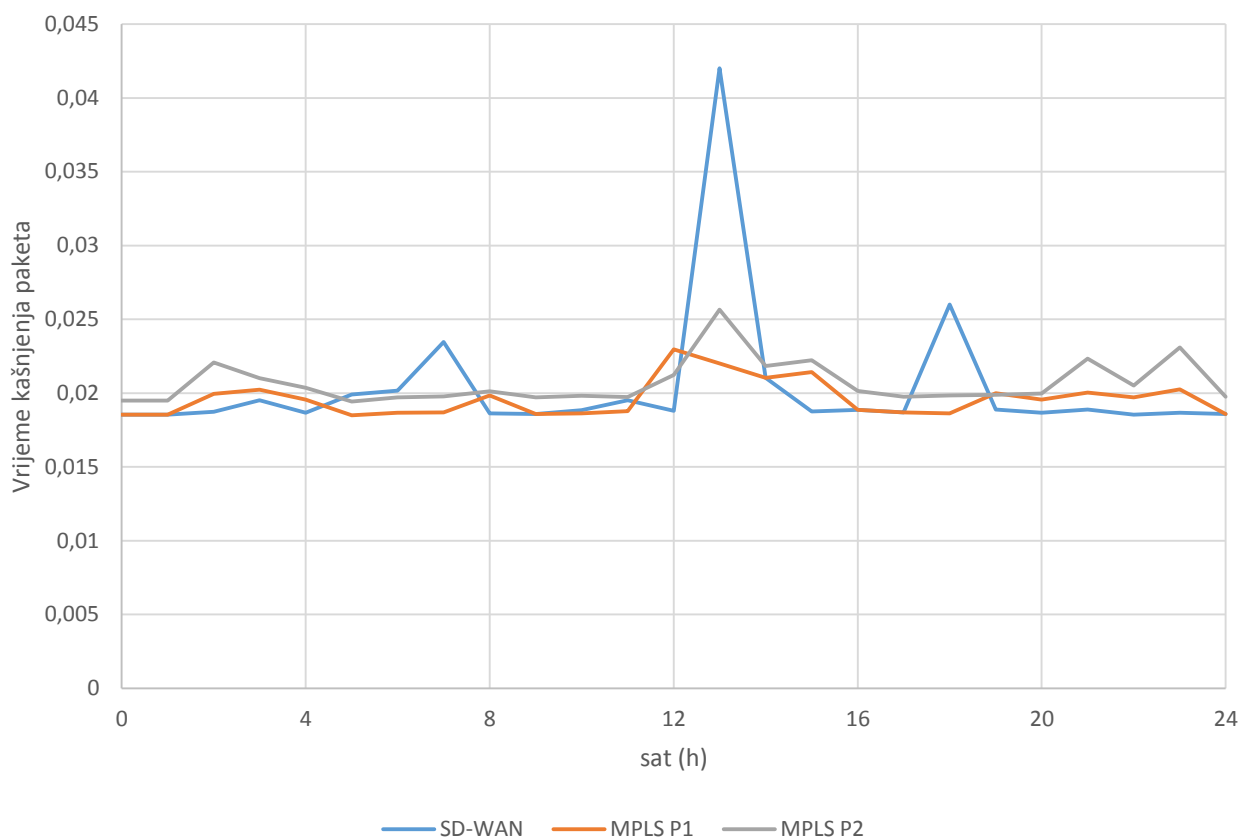
U tablici 3 je vidljivo kako je duljina paketa držana konstantna, dok su brzina nailazaka paketa i kapacitet promjenjivi u vremenu. Vrijeme obrade podataka u izvornom i krajnjem čvoru je proizvoljno odabrano i držano konstantno u oba slučaja.

vemenski period	MPLS							
	Tobr1	Tobr2	$\lambda$	C	p	Ts	ro	Tq1
0	0.006	0.003	230	10	600	0.00048	0.1104	0.01854
1	0.006	0.003	230	10	600	0.00048	0.1104	0.01854
2	0.006	0.003	320	4	600	0.0012	0.384	0.01995
3	0.006	0.003	800	6	600	0.0008	0.64	0.02022
4	0.006	0.003	400	5	600	0.00096	0.384	0.01956
5	0.006	0.003	100	10	600	0.00048	0.048	0.0185
6	0.006	0.003	580	10	600	0.00048	0.2784	0.01867
7	0.006	0.003	650	10	600	0.00048	0.312	0.0187
8	0.006	0.003	500	5	600	0.00096	0.48	0.01985
9	0.006	0.003	350	10	600	0.00048	0.168	0.01858
10	0.006	0.003	480	10	600	0.00048	0.2304	0.01862
11	0.006	0.003	800	10	600	0.00048	0.384	0.01878
12	0.006	0.003	840	5	600	0.00096	0.8064	0.02296
13	0.006	0.003	1000	6	600	0.0008	0.8	0.022
14	0.006	0.003	920	6	600	0.0008	0.736	0.02103
15	0.006	0.003	750	5	600	0.00096	0.72	0.02143
16	0.006	0.003	920	10	600	0.00048	0.4416	0.01886
17	0.006	0.003	620	10	600	0.00048	0.2976	0.01868
18	0.006	0.003	500	10	600	0.00048	0.24	0.01863
19	0.006	0.003	750	6	600	0.0008	0.6	0.02
20	0.006	0.003	400	5	600	0.00096	0.384	0.01956
21	0.006	0.003	550	5	600	0.00096	0.528	0.02003
22	0.006	0.003	250	4	600	0.0012	0.3	0.01971
23	0.006	0.003	600	5	600	0.00096	0.576	0.02026
24	0.006	0.003	400	10	600	0.00048	0.192	0.01859

Tablica 4. Proračun kašnjenja za MPLS

U tablici 4 je vidljivo kako je duljina paketa, dok je brzina nailazaka paketa promjenjiva u vremenu. Vrijeme obrade podataka u izvornom i krajnjem čvoru je proizvoljno odabrano i držano konstantno u oba slučaja. Na slici 18 je dijagramski prikaz usporedbe MPLS-a i SD-WAN-a.

## Usporedba MPLS-a i SD-WAN-a.



Slika 18. Usporedba MPLS-a i SD-WAN-a

Iz dijagrama sa slike 18 je vidljivo kako u SD-WAN mreži u određenim periodima dolazi do zagušenja gdje promet često ide preko velikog broja *hopova* i *providera* što znatno utječe na kašnjenje u pojedinim trenucima, dok u MPLS domeni dolazi povećanog kašnjenja u trenutku kada MPLS iskoristi drugi alternativni put zbog nedostupnosti primarnog koji je u ovom slučaju prikazan s P1. Ta zagušenja znatno manje osciliraju nego u slučaju SD-WAN-a.

## 6. ZAKLJUČAK

Višeuslužne mreže su iznimno važne jer pojavljivanjem novih usluga rastu i zahtjevi za boljom i kvalitetnijom uslugom. Korištenjem MPLS mreže se rješavaju problemi kašnjenja tako da se smanjuje vrijeme procesuiranja u čvorovima jer se prosljeđivanje ne obavlja na temelju informacija u zaglavju IP paketa. MPLS TE uključuje propusni opseg koji je bitan pri usmjeravanju te može usmjeriti promet na drugu rutu kako ne bi došlo do zagušenja. Time se bolje iskorištavaju mrežni resursi. Cilj razvoja MPLS-a je postizanje poboljšanja u vidu propusnosti i kašnjenja kod usmjeravanja temeljenom na IP-u.

Cilj softverski definiranih mreža je omogućiti mrežnim administratorima i inženjerima brzu reakciju na promjenu poslovnih zahtjeva putem centralizirane upravljačke jedinice. Obuhvaća više vrsta mrežnih tehnologija osmišljenih kako bi mreža bila fleksibilnija i kako bi podržala virtualnu infrastrukturu poslužitelja te ujedno zadovoljila velike potrebe propusnosti današnjih aplikacija. Svrha je odvojiti mrežno upravljanje i prosljeđivanje čime je omogućeno da mrežno upravljanje postane izravno programibilno i da se temeljna infrastruktura proširi.

Napravljena je analiza vremena kašnjenja između SD-WAN-a i MPLS-a. U SD-WAN mreži u određenim periodima dolazi do zagušenja jer promet često ide preko velikog broja *hopova* i *providera* što znatno utječe na kašnjenje u pojedinim trenucima, dok kod MPLS-a ponekad primarni put nije dostupan pa postoje i alternativni putevi koji imaju kašnjenje drugačije od primarnog pa povremeno dolazi do zagušenja jer može postojati više alternativnih putova.

.Višeuslužne mreže spadaju u jedan od kompleksnijih sustava danas te su samim time teške za upravljanje i održavanje. Prostora za napredak i povećanje kvalitete usluge ima, iz tog razloga, pažnju upravljanja mrežom treba usmjeriti prema tom cilju i smanjenju kompleksnosti mreže.

## LITERATURA

- [1] Popović, Ž.: *Od telegrafskih do paketnih komutacijskih sustava*, Ericsson Nikola Tesla REVIJA 17 (2), 2004., str. 10-11
- [2] Standardizacijski dokument TS 23.228
- [3] Dudak, D.: *Komunikacija korištenjem protokola SIP na pokretnim telefonima*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2011., str. 32
- [4] Bogović, V., Janković Ž.: *SIP (Session Initiation Protocol)*, AD Telekom Srbija; <http://www.telfor.rs/telfor2004/radovi/RT-6-7.pdf> pristup: 12.02.2019
- [5] Baraković, J.: *QoS signalizacija u višeslužnim mrežama sljedeće generacije*, [https://www.researchgate.net/publication/267253512\\_QoS\\_signalizacija\\_u\\_viseusluznim\\_mreza\\_sljedece\\_generacije](https://www.researchgate.net/publication/267253512_QoS_signalizacija_u_viseusluznim_mreza_sljedece_generacije) pristup: 12.02.2019
- [6] Miller R.: *The OSI Model: An Overview*, SANS Institute InfoSec Reading Room, <https://www.sans.org/reading-room/whitepapers/standards/osi-model-overview-543> pristup: 18.02.2019
- [7] Schatz, R., Hoßfeld, T., Janowski, L., Egger, S.: *“From Packets to People: Quality of Experience as New Measurement Challenge,”* pp.219-263 2013.
- [8] Nadeau, T. D., Gray, K.: *"SDN: Software Defined Networks"*, O'Reilly Media, Inc., 1. izdanje, California, 2013
- [9] Borovec K., Žigman D.: *Implementacija mehanizama kvalitete usluge u IP mrežama*, Vol 3. No.2, Polytechnic & Design Zagreb, 2015
- [10] Hui-Lan Lu, Faynberg I., „*An Architectural Framework for Support of Quality of Service in Packet Networks*“, IEEE Communications Magazine, June 2003
- [11] Ranjan, P.: *A Survey of Past Present and Future of Software Defined Networking*, Hal, Tokyo, Japan, 2014.
- [12] URL: <https://www.sdxcentral.com/sdn/definitions/what-the-definition-of-softwaredefined-networking-sdn/> (datum pristupanja: 01.02.2019)

[13] Nadeau, T.D.; Gray, K.: *SDN: Software Defined Networks, First Edition*, O'ReillyMedia, Inc., USA, 2013.

[14] URL: <https://www.howtoforge.com/tutorial/software-defined-networking-sdn-explained-for-beginners/> (datum pristupanja: 02.02.2019)

[15] URL: <https://www.juniper.net/us/en/solutions/sdn/what-is-sdn/> (datum pristupanja: 01.03.2019)

[16] Göransson, P., Black, C.: *Software Defined Networks - A Comprehensive Approach*, Elsevier, Inc., Waltham, USA, 2014.

[17] Open Network Foundation: *Software-Defined Networking: The New Norm for Networks*, White Paper, 2012.

[18] Open Network Foundation: *SDN Architecture Overview*, White Paper, ONF, Menlo Park, USA, 2014.

[19] <http://flowgrammable.org/sdn/openflow/> pristup: 01.04.2019

[20] <http://www.cables-solutions.com/whats-openflow-switch-how-it-works.html> pristup 01.04.2019

[21]

[https://www.srce.unizg.hr/arhiva\\_weba/20101105/sistemac.srce.hr/index.php%3fid=35&tx\\_ttnews%5bps%5d=1246399200&tx\\_ttnews%5bpl%5d=2678399&tx\\_ttnews%5barc%5d=1&tx\\_ttnews%5btt\\_news%5d=323&tx\\_ttnews%5bbackPid%5d=34&cHash=56fa6de733.html](https://www.srce.unizg.hr/arhiva_weba/20101105/sistemac.srce.hr/index.php%3fid=35&tx_ttnews%5bps%5d=1246399200&tx_ttnews%5bpl%5d=2678399&tx_ttnews%5barc%5d=1&tx_ttnews%5btt_news%5d=323&tx_ttnews%5bbackPid%5d=34&cHash=56fa6de733.html)  
pristup: 13.03.2019

[22] De Ghein, L.: *MPLS Fundamentals*, Cisco Press, Indianapolis, 2007

[23] Susitaival R.: *Adaptive Traffic Engineering in MPLS and OSPF Networks*, Helsinki University of Technology,

[https://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/fit/publ/thesis\\_Susitaival\\_04.pdf](https://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/fit/publ/thesis_Susitaival_04.pdf) pristup: 19.03.2019

[24] Ruela J., Ricardo M.: *MPLS – Multiprotocol Label Switching*, pp. 1-12, Portugal;  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.589.6130&rep=rep1&type=pdf>,  
pristup: 21.03.2019

[25] MPLS: *What is Layer 2.5?*, LightRiver Technologies, 2012



[http://lightriver.com/wp-content/uploads/2015/07/LightRiverTechByte\\_MPLS\\_Layer-2\\_5.pdf](http://lightriver.com/wp-content/uploads/2015/07/LightRiverTechByte_MPLS_Layer-2_5.pdf), pristup: 21.03.2019

[26] [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/about/ac123/ac147/archived\\_issues/ipj\\_4-3/ipj\\_4-3.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac123/ac147/archived_issues/ipj_4-3/ipj_4-3.pdf), pristup: 22.03.2019

[27] Hodžić H.; *MPLS TE mehanizmi u IP mrežama*,  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=970BE8C16317E635F21D7C52495BF18A?doi=10.1.1.462.8273&rep=rep1&type=pdf>, pristup: 29.03.2019

[28] Rahmant T., “*Teleprotection with MPLS ethernet communications — Development and testing of practical installations*”, IEEE Conference, pp. 1-18, 2018

[29]  
[http://www.cse.bgu.ac.il/common/download.asp?FileName=Lecture\\_4new.pdf&AppID=2&MainID=408&SecID=3504&MinID=3](http://www.cse.bgu.ac.il/common/download.asp?FileName=Lecture_4new.pdf&AppID=2&MainID=408&SecID=3504&MinID=3) pristup: 30.03.2019

## POPIS SLIKA

Slika 1. Osnovni SIP mrežni elementi [4].....	4
Slika 2. QoS podrška [5] .....	6
Slika 3. <i>DiffServ</i> arhitektura [5] .....	6
Slika 4. Arhitektura višeslužnih mreža .....	7
Slika 5. Utjecajni faktori na iskustvenu kvalitetu korisnika [6].....	13
Slika 6. Arhitektura kvalitete usluge [10] .....	14
Slika 7. Infrastruktura softverski definirane mreže, [12] .....	17
Slika 8. Arhitektura softverski definirane mreže, [17].....	18
Slika 9. Kontrolna i podatkovna cjelina, [6] .....	21
Slika 10. Komponente <i>Open Flow</i> protokola [17] .....	23
Slika 11. Arhitektura <i>Open Flow</i> protokola, [18] .....	24
Slika 12. MPLS zaglavlje, [23] .....	28
Slika 13. MPLS domena, [23].....	28
Slika 14. Prikaz prolaska paketa kroz LSP, [24].....	29
Slika 15. Pozicija MPLS-a u OSI referentnom modelu, [25].....	30
Slika 16. MPLS operacije, [26].....	30
Slika 17. Put paketa.....	34
Slika 18. Usporedba MPLS-a i SD-WAN-a.....	38

## POPIS TABLICA

Tablica 1. OSI referentni model [6] .....	8
Tablica 2. Topologija mreže.....	33
Tablica 3. Proračun kašnjenja za SD-WAN.....	36
Tablica 4. Proračun kašnjenja za MPLS .....	37



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ diplomski 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 \_\_\_\_\_ diplomskog rada

pod naslovom **KVALITETA USLUGE U MREŽAMA S IMPLEMENTIRANIM**

**MPLS I SD-WAN TEHNOLOGIJAMA**

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

Student/ica:

U Zagrebu, 10.9.2019 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(potpis)