

UNIVERZITET U BEOGRADU  
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Suzana Miladić-Tešić

**OPTIMIZACIJA PERFORMANSI  
OPTIČKIH WDM MREŽA AGREGACIJOM  
SAOBRAĆAJA I KONVERZIJOM  
TALASNIH DUŽINA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC  
ENGINEERING

Suzana Miladić-Tešić

**PERFORMANCE OPTIMIZATION OF  
OPTICAL WDM NETWORKS BY  
TRAFFIC GROOMING AND  
WAVELENGTH CONVERSION  
TECHNIQUES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020

## **MENTOR**

**Dr Goran Marković**, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

## **ČLANOVI KOMISIJE ZA OCENU I ODBRANU DOKTORSKE DISERTACIJE**

**Dr Valentina Radojičić**, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

**Dr Mirjana Stojanović**, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

**Dr Aleksandra Kostić-Ljubisavljević**, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

**Dr Dragan Peraković**, redovni profesor  
Univerzitet u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti

Datum odbrane: \_\_\_\_\_

## OPTIMIZACIJA PERFORMANSI OPTIČKIH WDM MREŽA AGREGACIJOM SAOBRAĆAJA I KONVERZIJOM TALASNIH DUŽINA

**Sažetak:** Nova generacija optičkog umrežavanja javila se kao rezultat povećanih korisničkih zahteva i potrebe za efikasnim i ekonomičnim korišćenjem spektra i raspoloživog propusnog opsega. Eksponencijalno povećanje obima saobraćaja u optičkim transportnim mrežama neminovno dovodi do dostizanja granice fizičkog kapaciteta optičkog vlakna, tako da će u bliskoj budućnosti zahtev za racionalnim korišćenjem ovog resursa predstavljati imperativ. Izvesno je da trenutno zastupljena tehnologija multipleksiranja po talasnim dužinama neće biti u mogućnosti da podrži buduće saobraćajne zahteve. Fiksni razmak između kanala za posledicu ima veliki deo spektra koji nije iskorišćen, a posebno kod prenosa velikim brzinama. S tim u vezi, aktuelna su rešavanja određenih pitanja koja se odnose na problematiku rutiranja i racionalnog korišćenja optičkih resursa, jer se time može omogućiti dodatni protok na postojećoj infrastrukturi.

Optički link prate i visoke cene pa je cilj operatora da sve resurse u mreži implementira i iskoristi na što racionalniji način što je osnovni motiv za istraživanja sprovedena u okviru doktorske disertacije. Istraživanja su usmerena na odgovarajuće tehnike saobraćajnog inženjeringa kojima se postiže preraspodela saobraćajnih tokova u mreži i racionalna upotreba resursa. Time se stvaraju uslovi za opsluživanje dodatnih saobraćajnih zahteva.

U istraživanju su ispitani efekti primene konverzije talasnih dužina i parametri koji najviše utiču na performanse mreže. Lokacije i broj konvertora su istražene za različite topologije i stepen povezanosti mreža, intenzitet saobraćaja i maksimalan broj talasnih dužina. Agregacija saobraćaja, koja podrazumeva izvorno grupisanje konekcija, posebno je istražena u elastičnim optičkim mrežama koje se mogu posmatrati kao tip WDM (Wavelength Division Multiplexing) mreža u kojima se kao jedinični resurs posmatra frekvencijski slot umesto talasne dužine. Takve mreže omogućavaju fleksibilno podržavanje različitih binarnih protoka prema specifičnim zahtevima korisnika. Optički predajnik generiše izvorno grupisane konekcije čime je moguće smanjiti broj zaštitnih opsega i ostvariti uštede optičkog spektra a istovremeno smanjiti potreban broj optičkih predajnika. Nekoliko grupisanih konekcija naziva se optički tunel. Za rešavanje navedenog složenog optimizacionog problema predložen je algoritam zasnovan na metaheuristici Optimizacija kolonijom pčela. Rezultati pokazuju da se primenom predloženog algoritma mogu postići značajne uštede optičkih resursa, a time i unapređenje performansi mreže. S obzirom da su istraživani statički saobraćajni scenariji, predloženi algoritam i tehnike saobraćajnog inženjeringa mogu se efikasno primenjivati prilikom planiranja i dizajniranja optičkih mreža.

**Ključne reči:** optička mreža, rutiranje i alokacija spektra, agregacija saobraćaja, konverzija talasnih dužina, optimizacija kolonijom pčela

**Naučna oblast:** Saobraćajno inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Eksploatacija telekomunikacionog saobraćaja i mreža

UDK broj:

## PERFORMANCE OPTIMIZATION OF OPTICAL WDM NETWORKS BY TRAFFIC GROOMING AND WAVELENGTH CONVERSION TECHNIQUES

**Abstract:** The new generation of optical networking raised as a result of increasing users' traffic demands and the need for efficient and cost-effective spectrum and bandwidth usage in. Exponential growth of traffic volume in optical transport networks inevitably results in reaching the physical fiber limit capacity and hence, its rationale usage will be an imperative in the near future. It is certain that currently deployed wavelength division multiplexing technology will not be able to cope with the future traffic demands. Fixed channel spacing results in a large spectrum wastage, especially for high speed transmissions. Therefore, the issues related to the routing problem and rationale spectrum usage are of the interest because the additional capacity can be provided at the existing infrastructure.

The optical link is followed by high prices and the operator's goal is to implement and use all the network resources in the most rational manner possible, what is the main motivation for the research conducted within this dissertation. The research is focused on appropriate traffic engineering techniques that achieve the traffic flow redistribution in the network and rational use of resources. That makes conditions for serving additional traffic demands.

The effects of applying wavelength conversion and parameters which most influence the network performances are investigated. Locations and the number of converters are investigated under different network topologies and connectivities, traffic load and maximum number of available wavelengths. Traffic grooming, that means source connections grooming has been particularly investigated in elastic optical networks, which represent a form of WDM (Wavelength Division Multiplexing) networks where a frequency slot is treated as a unit resource instead of wavelength. Such networks have the ability to adjust data rates to fit specific user demands. Groomed connections are generated in optical transmitter, thus making it possible to eliminate the necessary guard bands and in such way to save optical spectrum, while reducing the required number of transmitters. Such group of groomed connections is called an optical tunnel. To solve this complex optimization problem, a new algorithm based on the Bee colony optimization metaheuristic has been proposed in this thesis. The obtained results show that its implementation leads to significant optical resource savings and consequently better network performances. Since static traffic scenario has been considered, the proposed algorithm and traffic engineering techniques can be efficiently used for planning and designing of optical networks.

**Key words:** optical network, routing and spectrum allocation, traffic grooming, wavelength conversion, bee colony optimization

**Scientific field:** Transport and traffic engineering

**Scientific subfield:** Operation of telecommunication traffic and networks

UDC number:

# SADRŽAJ

<b>SPISAK SLIKA</b> .....	<b>i</b>
<b>SPISAK TABELA</b> .....	<b>iii</b>
<b>SPISAK SKRAĆENICA</b> .....	<b>iv</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. Predmet i naučni cilj istraživanja .....	3
1.2. Hipoteze .....	5
1.3. Metode istraživanja .....	5
1.4. Struktura doktorske disertacije.....	5
<b>2. OSNOVNI ASPEKTI OPTIČKOG UMREŽAVANJA- KONCEPT WDM I MIGRACIJA KA EON</b> .....	<b>8</b>
2.1. Evolucija WDM mreža ka elastičnim optičkim mrežama .....	8
2.2. Koncept fleksibilnog grida i frekvencijskog slotova.....	9
2.3. Karakteristike EON mreža .....	10
2.4. Hardverska realizacija EON mreža .....	12
2.5. Koegzistencija fiksnog i fleksibilnog grida.....	13
2.5.1. Tehnička interoperabilnost <i>fixgrid</i> i <i>flexgrid</i> čvorova .....	13
2.5.2. Strategije migracije ka elastičnim optičkim mrežama.....	15
2.6. Otvorena pitanja u istraživanju EON mreža .....	16
2.6.1. Hardverski razvoj komponentata mreže .....	16
2.6.2. Kontrola i upravljanje mrežom.....	16
2.6.3. Energetska efikasnost .....	17
2.6.4. Slabljenja signala na fizičkom sloju .....	17
2.6.5. Upravljanje spektrom .....	17
<b>3. PREGLED RELEVANTNE LITERATURE</b> .....	<b>20</b>
3.1. Problem konverzije talasnih dužina .....	20
3.2. Problem konverzije frekvencijskih slotova .....	21
3.3. Problem agregacije saobraćaja u EON mrežama .....	22
3.3.1. Statički TG-RSA algoritmi.....	22
3.3.2. Dinamički TG-RSA algoritmi .....	23
3.3.3. Optička agregacija i defragmentacija spektra.....	24
3.3.4. Optička agregacija i energetska efikasnost.....	25
3.3.5. Optička agregacija i oporavak mreže u slučaju otkaza.....	27

3.4. Osvrt na dosadašnja i pravci daljih istraživanja .....	28
3.4. Metaheuristike i optičko umrežavanje .....	29
<b>4. ODREĐIVANJE OPTIMALNIH LOKACIJA ČVOROVA SA KONVERZIJOM TALASNIH DUŽINA U OPTIČKIM TRANSPORTNIM MREŽAMA.....</b>	<b>32</b>
4.1. Određivanje verovatnoće blokiranja i optimalnih lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina .....	32
4.1.1. Osnovni koncept metaheuristike BCO .....	32
4.1.2. Algoritam za određivanje optimalnih lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina .....	33
4.2. Numerički eksperimenti- poređenje rezultata BCO-WCP algoritma sa egzaktnim i heurističkim rešenjima .....	33
4.3. Numerički eksperimenti- analiza rezultata BCO-WCP algoritma .....	36
<b>5. PROBLEM RUTIRANJA I ALOKACIJE SPEKTRA I OPTIČKA AGREGACIJA SAOBRAĆAJA.....</b>	<b>43</b>
5.1 RSA kao problem kombinatorne optimizacije .....	43
5.2. Klasifikacija RSA problema prema scenariju saobraćaja .....	44
5.3. Opis RSA problema .....	44
5.4. Metode za izbor rute.....	46
5.5. Metode za dodelu spektra.....	47
5.6. Analiza RSA algoritama u EON mrežama.....	48
5.6.1. Statički RSA algoritmi.....	49
5.6.2. Dinamički RSA algoritmi .....	49
5.7. Rešavanje statičkog RSA problema i numerički rezultati.....	53
5.7.1. Postavka problema .....	53
5.7.2. Matematička formulacija.....	54
5.7.3. Rezultati simulacije .....	54
5.8. Tehnika optičke agregacije saobraćaja.....	56
5.8.1. Prednosti tehnike agregacije saobraćaja na optičkom nivou .....	57
5.8.2. Ograničenja pri rešavanju problema optičke agregacije saobraćaja.....	58
5.8.3. Matematička formulacija problema optičke agregacije saobraćaja.....	58
5.8.4. Koncept optičke agregacije saobraćaja .....	62
<b>6. METAHEURISTIČKI ALGORITAM ZA REŠAVANJE PROBLEMA OPTIČKE AGREGACIJE SAOBRAĆAJA .....</b>	<b>65</b>
6.1. Postavka problema .....	65
6.2. Opis predloženog algoritma .....	65
6.2.1. Inicijalizacija .....	66

6.2.2. Generisanje parcijalnih rešenja.....	66
6.2.3. Poređenje parcijalnih rešenja.....	68
6.2.4. Faza regrutovanja .....	68
6.3. Ilustrativni primer.....	69
6.4. Numerički eksperimenti- poređenje rezultata BCO-TG-RSA sa postojećim algoritmima..	71
6.5. Numerički eksperimenti- analiza rezultata BCO-TG-RSA algoritma .....	73
6.5.1. Granularnost zahteva i efikasnost tehnike agregacije.....	74
6.5.2. Kapacitet predajnika i efikasnost tehnike agregacije .....	75
6.5.3. Broj alternativnih ruta i efikasnost tehnike agregacije .....	76
6.5.4. Analiza CPU vremena i granularnosti procesa pretraživanja .....	77
6.5.5. Redosled ispitivanja zahteva i efikasnost tehnike agregacije.....	77
6.5.6. Analiza opterećenosti linkova mreže.....	78
<b>7. USPOSTAVLJANJE KONTROLNE RAVNI U OPTIČKIM TRANSPORTNIM MREŽAMA .....</b>	<b>82</b>
7.1. Generalizacija kontrolne ravni .....	83
7.2. Signalizacija u GMPLS mrežama .....	84
7.3. Ekstenzije kontrolne ravni elastičnih optičkih mreža .....	85
7.3.1. Link Management Protocol (LMP) protokol .....	86
7.3.2. Open Shortest Path First- Traffic Engineering (OSPF-TE).....	86
7.3.3. Signalizacija i rezervacija resursa.....	87
7.3.4. Softverski definisane mreže.....	87
7.4. Hibridni metod za uspostavljanje kontrolne ravni u GMPLS mrežama .....	88
7.5. Numerički eksperimenti- analiza performansi mreže .....	90
<b>8. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>95</b>
8.1. Zaključna razmatranja .....	95
8.2. Najznačajniji doprinosi disertacije .....	97
8.3. Pravci budućih istraživanja .....	97
<b>LITERATURA.....</b>	<b>99</b>
<b>BIOGRAFIJA AUTORA .....</b>	<b>110</b>



## SPISAK SLIKA

Slika 2.1.	Opšti koncept DWDM sistema .....	8
Slika 2.2.	Dodela propusnog opsega u sadašnjim WDM mrežama .....	9
Slika 2.3.	Koncept: a) fiksni DWDM grid i b) fleksibilni grid .....	10
Slika 2.4.	Karakteristike EON mreža i grupisanje optičkih putanja .....	11
Slika 2.5.	Uspostavljanje optičkih putanja i širina kanala: a) fiksna dodela opsega i b) fleksibilna dodela opsega .....	11
Slika 2.6.	Arhitektura elastične optičke mreže .....	12
Slika 2.7.	<i>Broadcast-and-select</i> arhitektura <i>flexgrid</i> čvorova .....	13
Slika 2.8.	<i>Shared splitting</i> arhitektura <i>flexgrid</i> čvorova .....	13
Slika 2.9.	Interoperabilnost i koegzistencija fiksnog i fleksibilnog grida .....	14
Slika 2.10.	Scenariji zauzetosti spektra: a) kanal kapaciteta talasne dužine (100 Gb/s); b) super kanal kapaciteta 200 Gb/s; c) dva kanala od 100 Gb/s i d) kanal od 40 Gb/s .....	15
Slika 2.11.	Ilustracija izbora lokacije <i>flexgrid</i> čvora na osnovu strategije migracije .....	16
Slika 2.12.	Vrsta modulacije u funkciji rastojanja .....	17
Slika 4.1.	Topologija posmatrane optičke mreže- N1 .....	34
Slika 4.2.	Poređenje rezultata BCO-WCP i ES metoda .....	35
Slika 4.3.	Topologije posmatranih optičkih mreža: a) N1 i b) EON-28 .....	36
Slika 4.4.	Topologija posmatrane optičke mreže EON-19 .....	37
Slika 4.5.	Verovatnoće blokiranja: a) N1; b) EON-19 i c) EON-28 .....	39
Slika 4.6.	Verovatnoća blokiranja za različite vrednosti parametara $\lambda_{sd}$ , $K$ i $W_{max} = 4$ .....	40
Slika 4.7.	Verovatnoća blokiranja za različite vrednosti parametara $\lambda_{sd}$ , $K$ i $W_{max} = 8$ .....	40
Slika 4.8.	Verovatnoća blokiranja za različite vrednosti parametara $\lambda_{sd}$ , $K$ i $W_{max} = 12$ .....	41
Slika 5.1.	Šematski prikaz RSA problema: a) rutiranje i b) dodela spektra .....	45
Slika 5.2.	Ilustracija ograničenja susedstva i kontinuiteta frekvencijskih slotova u problemu RSA .....	46
Slika 5.3.	Problem fragmentacije spektra i realokacija slotova .....	47
Slika 5.4.	Evaluacija performansi RSA algoritama: a) statički RSA- verovatnoća blokiranja; b) statički RSA- iskorišćenost spektra i c) dinamički RSA- verovatnoća blokiranja .....	52
Slika 5.5.	Topologija posmatrane optičke mreže .....	55
Slika 5.6.	Opterećenost linkova u posmatranoj mreži .....	56
Slika 5.7.	Funkcionalnost BVT i SBVT .....	57
Slika 5.8.	Arhitektura SBVT .....	58
Slika 5.9.	Primer manje mreže na kojoj je testiran ILP model .....	61
Slika 5.10.	Ukupan broj zauzetih slotova/optički spektar .....	61
Slika 5.11.	Uštede predajnika .....	62

Slika 5.13. Optička mreža: a) bez primene i b) sa primenom tehnike agregacije saobraćaja .....	63
Slika 6.1. Dijagram toka grupisanja konekcija.....	67
Slika 6.2. Primer topologije manje mreže i skup od $R = 20$ saobraćajnih zahteva .....	69
Slika 6.3. Procedura regrutovanja za korak $s = 2$ .....	71
Slika 6.4. Topologija NSFNet mreže .....	72
Slika 6.5. Poređenje rezultata BCO-TG-RSA i LSG algoritma .....	72
Slika 6.6. Topologija EON-28 mreže .....	73
Slika 6.7. Ukupan zauzeti spektar sa i bez primene tehnike agregacije: a) NSFNet i b) EON-28 mreža .....	74
Slika 6.8. Spektralne uštede: a) NSFNet i b) EON-28 mreža .....	75
Slika 6.9. Spektralne uštede za različite vrednosti kapaciteta predajnika .....	76
Slika 6.10. Ukupan zauzeti spektar za različit broj alternativnih ruta.....	76
Slika 6.11. Redosled ispitivanja konekcija i zauzeti broj slotova .....	78
Slika 6.12. Opterećenost linkova u NSFNet mreži: a) $M = 4$ i b) $M = 8$ .....	79
Slika 6.13. Opterećenost linkova u NSFNet mreži: a) $M = 12$ i b) $M = 16$ .....	80
Slika 7.1. Generalizacija/unifikacija kontrolne ravni .....	83
Slika 7.2. Ilustracija predloženog hibridnog metoda.....	89
Slika 7.3. Primer uspostave LSP putanje .....	90
Slika 7.4. Topologije posmatranih optičkih mreža: a) NET1 i b) NET2 .....	90
Slika 7.5. Primena hibridnog metoda: a) NET1 i b) NET2 .....	91
Slika 7.6. Vreme uspostave LSP putanje za NET1 mrežu, $k_T = 4$ , $p_{IF} = 0.348$ : a) IFOB; b) OF metod i c) hibridni metod .....	92
Slika 7.7. Vreme uspostave LSP putanje za NET2 mrežu sa $k_T = 4$ , $p_{IF} = 0.447$ : a) IFOB; b) OF metod i c) hibridni metod .....	93

## SPISAK TABELA

Tabela 2.1. Zauzetost spektra u slučaju fiksnog i fleksibilnog grida .....	14
Tabela 3.1. Pregled analiziranih TG-RSA algoritama .....	29
Tabela 4.1. Optimalne lokacije konvertora za mrežu N1 (poređenje sa ES) .....	35
Tabela 4.2. Poređenje rezultata za verovatnoću blokiranja, mreža N1 .....	35
Tabela 4.3. Optimalne lokacije konvertora za mrežu N1 (poređenje sa heuristikama) .....	36
Tabela 4.4. Optimalne lokacije konvertora talasnih dužina za mrežu EON-19 .....	37
Tabela 4.5. Optimalne lokacije konvertora talasnih dužina za mrežu N1 .....	38
Tabela 4.6. Optimalne lokacije konvertora talasnih dužina za mrežu EON-28 .....	38
Tabela 5.1. Komparacija metoda rutiranja (bez rešavanja problema fragmentacije) .....	47
Tabela 5.2. Komparacija metoda dodele spektra za slučaj grupnih zahteva .....	48
Tabela 5.3. Poređenje RSA algoritama .....	50
Tabela 5.4. Optimalna RSA rešenja za posmatranu mrežu .....	55
Tabela 5.5. Saobraćajni scenario sa $D = 10$ zahteva .....	55
Tabela 5.6. Rešenja za scenario sa $D = 10$ zahteva .....	56
Tabela 5.5. Zauzeti spektar i potreban broj predajnika bez i sa agregacijom konekcija .....	62
Tabela 6.1. Ilustracija generisanja parcijalnih rešenja u koraku $s = 1$ .....	70
Tabela 6.2. Postupak grupisanja konekcija za pčelu $B_3$ testiranjem zahteva $R_6$ .....	70
Tabela 6.3. BCO parametri za korak $s = 2$ .....	70
Tabela 6.4. Ažurirana parcijalna rešenja za korak $s = 3$ .....	71
Tabela 6.5. Kvalitet rešenja i CPU vremena za različit broj pčela $B$ .....	77
Tabela 7.1. Pitanja kontrolne ravni EON mreža i pojedinih RSA algoritama .....	85
Tabela 7.2. Bazične RSVP poruke mapirane u poruke RSVP-TE protokola .....	90
Tabela 7.3. Srednje i max vreme uspostave LSP putanje .....	92
Tabela 7.4. Performanse NET2 mreže za različite vrednosti $k_T$ .....	92

# SPISAK SKRAĆENICA

<b>ADM</b>	Add/Drop Multiplexer
<b>AFA-CA</b>	Adaptive Frequency Assignment- Collision Avoidance
<b>AI</b>	Artificial Intelligence
<b>AR</b>	Alternate Routing
<b>ASON</b>	Automated Switched Optical Network
<b>AST</b>	Average Setup Time
<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode
<b>AUR-ESS</b>	Adaptive Unconstrained Routing- Exhaustive Spectrum Search
<b>BCO</b>	Bee Colony Optimization
<b>BP</b>	Blocking Probability
<b>BLSA</b>	Balanced Load Spectrum Allocation
<b>BPSK</b>	Binary Phase-Shift Keying
<b>BV-OXC</b>	Bandwidth Variable- Optical Cross-Connect
<b>BVT</b>	Bandwidth Variable Transponder
<b>BV-WSS</b>	Bandwidth Variable- Wavelength Selective Switch
<b>CAPEX</b>	Capital Expenditure
<b>CA-SA</b>	Collision Aware- Spectrum Allocation
<b>CPU</b>	Central Processor Unit
<b>DFG</b>	Distance-adaptive Fragmentation-aware Grooming
<b>DWDM</b>	Dense Wavelength Division Multiplexing
<b>EDFA</b>	Erbium-Doped Fiber Amplifier
<b>EMPA</b>	Elastic Multi-path Provisioning Algorithm
<b>EON</b>	Elastic Optical Network
<b>EON-28</b>	European Optical Network- 28
<b>EOP</b>	Elastic Optical Path
<b>ES</b>	Exhaustive Search
<b>ESPAC</b>	Elastic Separate Protection-at-Connection
<b>FAR</b>	Fixed Alternate Routing
<b>FF</b>	First Fit
<b>FLF</b>	First-Last Fit
<b>FPA</b>	First Possible Aggregating
<b>FR</b>	Fixed Routing
<b>FS</b>	Frequency Slot
<b>FWC</b>	Full Wavelength Conversion

<b>GGA</b>	Green Grooming Algorithm
<b>GMPLS</b>	Generalized Multi-Protocol Label Switching
<b>GoS</b>	Grade of Service
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force
<b>IFOB</b>	In-Fibre-Out-of-Band
<b>IGP</b>	Internal Gateway Protocol
<b>ILP</b>	Integer Linear Programming
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>ISIS</b>	Intermediate System to Intermediate System
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>ITU-T</b>	ITU- Telecommunication Standardization Sector
<b>JDD</b>	Joint Degree Distribution
<b>LCR</b>	Least Congested Routing
<b>LFA</b>	Light-Path Fragmentation Algorithm
<b>LMP</b>	Link Management Protocol
<b>LSA</b>	Link State Advertisement
<b>LSG</b>	Least Spectrum Grooming
<b>LSP</b>	Label Switched Path
<b>LWC</b>	Limited Wavelength Conversion
<b>MCAP</b>	The Most Common Available Pattern
<b>MELT</b>	Multi-Hop Elastic Light-Trial
<b>MELG</b>	Maximize Electrical Layer Grooming
<b>MILP</b>	Mixed Integer Linear Programming
<b>MI-RSA</b>	Minimum Interference- Routing and Spectrum Allocation
<b>MOLG</b>	Maximize Optical Layer Grooming
<b>MPLS</b>	Multi-Protocol Label Switching
<b>MP<math>\lambda</math>S</b>	Multi-Protocol Lambda Switching
<b>MPTG</b>	Multipath Routing with Traffic Grooming
<b>MRSA</b>	Multicast Routing and Spectrum Assignment
<b>MTG</b>	Minimum Transmitter Grooming
<b>NP</b>	Non-deterministic polynomial
<b>NSFNet</b>	National Science Foundation Network
<b>O/E/O</b>	Optical/Electro/Optical
<b>OF</b>	Out-of-Fibre
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OIF</b>	Optical Internetworking Forum

<b>O-NNI</b>	Optical User-to-Network Interface
<b>O-OFDM</b>	Optical- OFDM
<b>OPEX</b>	Operational Expense
<b>OSPF</b>	Open Shortest Path First
<b>OTT</b>	Over-The-Top
<b>O-UNI</b>	Optical User-to-Network Interface
<b>OWCA</b>	Optimal Wavelength Converter Allocation
<b>PADR</b>	Progressive Allocation and Dynamic Reallocation
<b>PCE</b>	Path Computation Element
<b>PIC</b>	Photonic Integrated Circuit
<b>PSPADR</b>	Partial Sharing PADR
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase-Shift Keying
<b>RGO</b>	Routing, Grooming and Ordering
<b>ROADM</b>	Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer
<b>RMSA</b>	Routing, Modulation and Spectrum Allocation
<b>RSA</b>	Routing and Spectrum Allocation
<b>RSVP</b>	Resource Reservation Protocol
<b>RWA</b>	Routing and Wavelength Assignment
<b>RWSA</b>	Routing, Wavelength and Spectrum Allocation
<b>SA</b>	Spectrum Allocation
<b>SBPGP</b>	Shared Backup Path Grooming Protection
<b>SBVT</b>	Sliceable Bandwidth Variable Transponder
<b>SCGP</b>	Shared p- Cycle Grooming Protection
<b>SCSC</b>	Super Channel Switch Capable
<b>SDH</b>	Synchronous Digital Hierarchy
<b>SDN</b>	Software Defined Network
<b>SDON</b>	Software Defined Optical Network
<b>SE</b>	Spectrum Engineering
<b>SFPS</b>	Sorted Feasible Paths Searching
<b>SI</b>	Swarm Intelligence
<b>SM-RSA</b>	Survivable Multipath– Routing and Spectrum Allocation
<b>SONET</b>	Synchronous Optical Network
<b>SPSR</b>	Spectrum Path with Maximum Spectrum Reuse
<b>SP-RWSA</b>	Shortest Path RWSA

<b>SWC</b>	Sparse Wavelength Conversion
<b>TC</b>	Time Complexity
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing
<b>TE</b>	Traffic Engineering
<b>TED</b>	Traffic Engineering Database
<b>TG</b>	Traffic Grooming
<b>TPA</b>	Transponder Parameter Assignment
<b>WA</b>	Wavelength Assignment
<b>WAN</b>	Wide Area Network
<b>WCP</b>	Wavelength Converter Placement
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing
<b>WRON</b>	Wavelength Routed Optical Networks

Optimizacija performansi optičkih WDM mreža agregacijom saobraćaja i konverzijom talasnih dužina

---

# 1.

**UVOD**

---



## 1. UVOD

Nova generacija optičkog umrežavanja javila se kao rezultat povećanih korisničkih zahteva i potrebe za efikasnijim i ekonomičnijim korišćenjem spektra i raspoloživog propusnog opsega. Zbog sve prisutnije implementacije optičkih tehnologija u telekomunikacione mreže, nameću se brojna pitanja i uslovi vezani za rutiranje svetlosnog signala. Savremene telekomunikacione mreže otvaraju put širokom spektru novih servisa i aplikacija koje menjaju i unapređuju svakodnevni život na mnogo načina. To zahteva obradu sve veće količine podataka, kao i unapređene performanse uređaja koje će omogućiti obradu tih podataka. Sa aspekta korisnika, zahteva se isporuka servisa na zahtev- *on demand*. U skladu sa tim, i telekomunikaciona mreža mora da se prilagođava novim tehnologijama i rešenjima, što podrazumeva njenu nadgradnju ili potpunu promenu arhitekture. Sa ekonomske strane i aspekta prethodnih investicija, prihvatljivije je rešenje da nadgradnja bude parcijalnog karaktera, odnosno u onim delovima mreže u kojima su prisutna najveća saobraćajna opterećenja.

Poslednjih nekoliko godina obim saobraćaja u okosnicama telekomunikacionih mreža eksponencijalno raste zbog prenosa velike količine informacija. Razlog tome je široka primena i razvoj Interneta i novih IP (*Internet Protocol*) servisa, što ima veliki uticaj na upravljanje resursima mreže. Struktura i obim servisa zavise od aktuelnih trendova na telekomunikacionom tržištu, a način prihvatanja servisa od strane krajnjih korisnika značajno utiče na obim ponuđenog saobraćaja. Iz tog razloga zahteva se mreža sa velikim propusnim opsegom, podrškom za razmenu ogromne količine podataka, većim brzinama prenosa, malim kašnjenjem, a sa aspekta korisnika, mreža koja će omogućiti kvalitetne servise, dostupnost i brz odziv sistema.

Razvoj različitih tipova korisničkih i mrežnih servisa omogućen je usled komercijalizacije i veće eksploatacije optičkih komunikacionih sistema. Optička vlakna se smatraju superiornim medijumom za prenos i čine okosnicu transportnog nivoa mreža, a takođe se koriste i u mrežama za pristup, zbog čega je jasno da je optička tehnologija ušla u skoro sve nivoe telekomunikacionih mreža, od okosnica pa do krajnjih korisnika. Zbog širokog spektra servisa i njihove različitosti, optička mrežna infrastruktura mora zadovoljiti veliki broj zahteva kao što su: podrška konekcija sa aspekta krajnjih korisnika, kvalitetne mrežne performanse, mogućnost fleksibilnog proširenja mreže, mali broj optičkih primopredajnika i efikasna upotreba optičkog spektra. Zahtevniji tehnički uslovi za pojedine servise utiču na dostizanje granice fizičkog kapaciteta optičkog vlakna (Šenonova granica). S tim u vezi, raspoloživost mrežnih resursa tokom eksploatacije usko je povezana sa planiranjem mrežnih kapaciteta. U cilju otklanjanja određenih tehničkih i ekonomskih ograničenja neophodna je primena raznih metoda optimizacije kao što su matematičko programiranje, heuristički ili metaheuristički algoritmi.

Da bi se omogućilo opsluživanje velikog obima saobraćaja u transportnim mrežama, aktuelno rešenje za operatore telekomunikacionih mreža su optičke mreže WRON (*Wavelength Routed Optical Networks*) i WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) tehnika multipleksiranja koja omogućava prenos više optičkih nosioca na različitim talasnim dužinama po jednom optičkom vlaknu. Svaka talasna dužina predstavlja jedan komunikacioni kanal, a primenjena brzina prenosa ograničena je vršnom brzinom terminalne elektronske opreme. Maksimalan kapacitet WDM linka određuje se kao proizvod broja kanala i kapaciteta svakog kanala.

Talasne dužine kao nezavisni komunikacioni kanali koje su u primeni u WDM sistemima standardizovane su preporukama Međunarodne unije za telekomunikacije, ITU (*International Telecommunication Union*) [1, 2]. Za svaku specifičnu primenu definisani su skupovi talasnih dužina

koji su uniformno raspoređeni i nazivaju se rešetka (*grid*). Prema ITU G.694.1 preporuci primenjuje se fiksni razmak između kanala (fiksni *grid*) od 50 GHz (oko 0.4 nm) i 100 GHz (oko 0.8 nm). DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) tehnologijom omogućen je prošireni opseg talasnih dužina odnosno skupovi od 80 i 40 talasnih dužina (kanala) u C- opsegu (1528-1621 nm), respektivno [1, 2]. Time je povećan kapacitet kanala i omogućeni bitski protoci do 100 Gb/s po kanalu [1]. Ograničene procesorske mogućnosti elektronske opreme za protoke od 100 Gb/s dovode do problema elektronskog „uskog grla“, što za posledicu ima nemogućnost potpunog iskorišćenja ogromnog raspoloživog propusnog opsega optičkog vlakna (~ nekoliko desetina THz). Da bi se prevazišao problem velike neusklađenosti između propusnog opsega optičkog vlakna i procesorskih mogućnosti elektronske opreme neophodno je implementirati optičko procesiranje signala.

Komunikaciju u WRON mrežama omogućava put svetlosti (*lightpath*). Put svetlosti je potpuno optička konekcija „s kraja-na-kraj“ kojoj se u odsustvu konvertora talasnih dužina dodeljuje ista talasna dužina na čitavoj ruti od izvornog do odredišnog čvora duž koje se uspostavlja put svetlosti. Rutiranje talasnih dužina vrše čvorovi koji su međusobno povezani optičkim WDM linkovima tipa „tačka-tačka“. Da bi se uspostavio put svetlosti između dva krajnja čvora u mreži, neophodno je odabrati fizičku rutu i dodeliti talasnu dužinu na svakom linku duž odabrane rute, poznato kao problem RWA (*Routing and Wavelength Assignment*). Dva različita puta svetlosti na istim talasnim dužinama ne mogu se rutirati preko istog fizičkog linka. Za vreme trajanja veze talasna dužina ostaje zauzeta na svim linkovima.

Fiksni *grid* podrazumeva da se celokupan raspoloživi kapacitet talasne dužine dodeljuje određenom putu svetlosti, bez obzira na veličinu saobraćajnog zahteva. Time se javlja velika neiskorišćenost propusnog opsega i neracionalno zauzimanje resursa mreže. Takođe, ukoliko se za uspostavljanje određenog puta svetlosti koriste dve ili više talasnih dužina veliki deo opsega služi samo za razdvajanje pojedinačnih kanala odnosno za zaštitni opseg. To predstavlja jedan od nedostataka današnjih WDM mreža.

Zbog ograničenog opsega frekvencija u optičkim mrežama, razmak između kanala karakterističan za WDM prenos mora da se smanji. Smanjen razmak između komunikacionih kanala omogućava veće brzine prenosa po kanalu (400 Gb/s i prenos do 1 Tb/s, u poređenju sa sadašnjim od 100 Gb/s) odnosno podršku budućim saobraćajnim zahtevima i novim trendovima poput OTT (*Over-The-Top*) servisa. Posledica takve namere jeste standardizacija koncepta frekvencijskih slotova (FS, *Frequency Slot*) od strane ITU, ažuriranjem preporuke G.694.1 [2]. Fleksibilnost ili elastičnost mreža postignuta je smanjenjem širine kanala na 25, 12.5 ili čak 6.25 GHz u okolini centralne frekvencije, što je značajno manje od širine WDM multipleksnih kanala. Frekvencijski slot se može definisati kao najmanji opseg učestanosti koji optički signal može zauzeti. Termin fleksibilna ili elastična mreža (EON, *Elastic Optical Network*) podrazumeva mogućnost podešavanja i promene određenih parametara shodno intenzitetima saobraćajnih zahteva. Takve karakteristike ih čine potencijalnim rešenjima za buduće mreže odnosno adekvatnom zamenom za sadašnje WDM mreže.

Ključni problem koji je potrebno rešiti u EON mrežama jeste rutiranje i alokacija spektra (RSA, *Routing and Spectrum Allocation*), a koji je analogan RWA problemu u WDM mrežama. S obzirom da problem RSA pripada klasi NP-teških (*non-deterministic polynomial-time hardness*) optimizacionih problema, mogućnosti za rešavanje istog su slične kao i za RWA tj. definisanjem dva segmenta problema: prvi obuhvata rutiranje dok drugi obuhvata dodelu propusnog opsega.

Racionalna upotreba mrežnih resursa predstavlja prioritet za operatora i shodno tome svojstvo elastičnosti mora biti maksimalno iskorišćeno. To znači dodatno racionalizovati upotrebu optičkog spektra primenom odgovarajućih tehnika mrežnog i saobraćajnog inženjeringa. Jedna od takvih je

tehnika agregacije saobraćaja (*traffic grooming*) koja je primenom u WDM mrežama omogućavala veću propusnost mreže i smanjenje troškova. Manji električni signali su grupisani i dalje konvertovani u jedan optički signal. U literaturi je tehnika poznata kao električna agregacija (*e-grooming*) ili elektronsko grupisanje koje zahteva O/E/O (*Optical/Electro/Optical*) konverziju signala u čvorovima mreže. Takvo grupisanje nije energetski efikasno a ni ekonomično zbog potrebne opreme u čvorovima. Da bi se smanjio broj konverzija signala i tehnološki unapredio postupak, istraživanja u oblasti elastičnih optičkih mreža usmerena su direktno na optički nivo kako bi se celokupna putanja zadržala u optičkom domenu. Grupisanje saobraćajnih zahteva direktno na optičkom nivou naziva se optička agregacija saobraćaja (*o-grooming*) i prilikom rešavanja problema može se posmatrati kao proširena verzija RSA problema (TG-RSA, *Traffic Grooming*- RSA). Uvođenjem novih ograničenja koja se odnose na agregaciju, povećava se složenost problema što podrazumeva formulacije celobrojnog programiranja i primenu heurističkih/metaheurističkih algoritama u cilju optimizacije određenih performansi mreže.

## 1.1. Predmet i naučni cilj istraživanja

Popularnost Interneta i aplikacija zasnovanih na IP protokolu postavlja nove zahteve pred telekomunikacione mreže, u pogledu broja korisnika, povećanja propusnih opsega, kvaliteta servisa i pouzdanosti. Optički komunikacioni sistemi sa ogromnim propusnim opsegom jedini su koji mogu da odgovore na dolazeće izazove i rastuće potrebe korisnika. Iz tog razloga, poslednjih nekoliko godina sprovode se intenzivna istraživanja u pravcu optičkog umrežavanja kako bi se omogućila optimizacija mreže na svim nivoima i primenila rešenja koja će omogućiti bolju iskorišćenost raspoloživog propusnog opsega i drugih resursa mreže. To generalno podrazumeva rešavanje osnovnih problema koji se javljaju u komunikacionim mrežama:

- planiranje mreže (*network planning*)- koje uopšteno podrazumeva planiranje potrebnih resursa mreže u skladu sa prognoziranim saobraćajnim zahtevima,
- mrežni inženjering (*network engineering*)- koji podrazumeva da se resursi mreže dodele tamo gde je povećan intenzitet saobraćaja i
- inženjering saobraćaja (*traffic engineering*)- koji podrazumeva da se saobraćaj rasporedi tamo gde postoje raspoloživi resursi kako bi se smanjilo ili izbeglo preopterećenje mreže.

Tehnike mrežnog inženjeringa podrazumevaju adekvatno dimenzionisanje potrebnih resursa u mreži tako da promenljivi saobraćajni zahtevi budu opsluženi sa zahtevanim kvalitetom, uz istovremeno minimiziranje ukupnih troškova mreže. Za razliku od inženjeringa mreža, koji za cilj ima dodavanje (proširenje) mrežnih resursa, inženjering saobraćaja ima za cilj optimizaciju korišćenja postojećih resursa mreže što se ostvaruje preraspodelom saobraćajnih tokova u mreži, radi izbegavanja prevelikog opterećenja mreže. Inženjering saobraćaja (TE, *Traffic Engineering*) podrazumeva matematičko modelovanje telekomunikacionih sistema i mreža, bazirano na primeni metoda operacionih istraživanja, teorije verovatnoće, matematičke statistike, u cilju njihovog optimalnog projektovanja. TE se mora sprovesti na način da budu zadovoljeni odgovarajući standardi u pogledu performansi mreže (GoS, *Grade of Service*), kao i zahtevi korisnika vezani za kvalitet servisa (QoS, *Quality of Service*).

Predmet istraživanja u ovoj tezi predstavlja rešavanje određenih ključnih problema koji se odnose na projektovanje optičkih mreža sa rutiranjem po talasnim dužinama/frekvencijskim slotovima primenom tehnika mrežnog i saobraćajnog inženjeringa. Jedna od istraživanih tehnika mrežnog

inženjeringa kojom se ublažavaju posledice RWA ograničenja odnosi se na rešavanje problema određivanja minimalnog broja konvertora talasnih dužina, kao i izbor optimalnih lokacija čvorova u kojima konvertori talasnih dužina treba da budu implementirani. Izborom optimalnih lokacija konvertora i njihovog broja minimizira se verovatnoća blokiranja zahteva koja se javlja usled ograničenog broja talasnih dužina.

Važno pitanje koje se nameće prilikom projektovanja optičkih mreža jeste i mogućnost primene agregacije saobraćaja kao jedne od tehnika saobraćajnog inženjeringa. Sveukupne performanse EON mreže time mogu biti unapređene. Ako se primeni agregacija saobraćaja moguće je optičke konekcije sa istim početnim čvorom, koje generiše isti optički predajnik, grupisati u optički tunel. Na taj način povećava se iskorišćenost predajnika i smanjuje njihov potreban broj, a sa aspekta spektralne iskorišćenosti minimizira se upotreba zaštitnih opsega kojim se razdvajala svaka pojedinačna konekcija. Primena tehnike direktno na optičkom nivou smanjuje O/E/O konverzije signala u tranzitnim čvorovima, odnosno sa IP sloja se na optički sloj prebacuju one konekcije koje imaju isti izvorni čvor. Manji broj predajnika i konverzija signala utiče i na veću energetska efikasnost, manje kašnjenje signala tako da su prednosti primene tehnike agregacije saobraćaja višestruke.

Osnovni predmet istraživanja ove doktorske disertacije predstavlja rešavanje problema optimizacije broja i lokacija konvertora talasnih dužina u optičkim mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama, kao i rešavanje problema agregacije saobraćaja u optičkim mrežama sa rutiranjem po frekvencijskim slotovima.

Naučni cilj disertacije jeste da se istraže i na što efikasniji način reše ključni problemi prilikom optičkog umrežavanja, razviju, testiraju i uporede po efikasnosti određena rešenja i algoritmi čija primena treba da omogući optimizaciju korišćenja resursa mreže odnosno unapređenje mrežnih performansi. Da bi se to postiglo, u tezi je istraživano sledeće:

- Mogući pristupi i algoritmi za rešavanje problema određivanja minimalnog broja konvertora, kao i izbora optimalnih lokacija čvorova u kojima konvertori talasnih dužina treba da budu implementirani. Testiran je algoritam zasnovan na metaheuristici Optimizacija kolonijom pčela koji ima za cilj minimizaciju verovatnoće blokiranja zahteva. Analiza je sprovedena za određene scenarije sa aspekta saobraćajnog opterećenja, broja talasnih dužina, topologije mreže i istraživan je njihov uticaj na raspored konvertora. Identifikovani su parametri koji najviše utiču na unapređenje performansi mreže.
- Mogući pristupi i algoritmi za rešavanje problema rutiranja i dodele frekvencijskih slotova zajedno sa agregacijom saobraćaja na optičkom nivou u slučaju statičkog saobraćajnog scenarija. U optičkim mrežama realnih dimenzija, veoma je važno razviti efikasne algoritme koji mogu da pronađu dovoljno kvalitetna rešenja u prihvatljivom računarskom vremenu. U tezi je predložen novi algoritam za rešavanje TG-RSA problema, takođe zasnovan na metaheuristici Optimizacija kolonijom pčela. Zasniva se na ideji da se optičke konekcije sa istim izvornim čvorom grupišu u optički tunel i generišu istim optičkim predajnikom. Algoritam ima za cilj minimizaciju ukupnog spektra, odnosno ukupnog broja frekvencijskih slotova zauzetih na svim linkovima mreže uz pretpostavku mogućnosti uspostavljanja svih zahtevanih konekcija.
- Problem uspostavljanja kontrolne ravni u optičkim transportnim mrežama. Kontrolna ravan omogućava uspostavljanje, održavanje i upravljanje konekcijama u procesu inženjeringa saobraćaja putem uređenih putanja. Na taj način se omogućava efikasan prenos korisničkih podataka od početnog do krajnjeg čvora kroz različite domene. Uvođenje fleksibilne frekvencijske rešetke (*grida*) u optičke mreže čini i process projektovanja kontrolne ravni

složenijim. U tezi je istraživano nekoliko konfiguracija kontrolne ravni i predložen je hibridni metod koji kombinuje prednosti postojećih metoda, gde se signalizacija odvija preko istog ili odvojenog optičkog vlakna i van propusnog opsega. Predloženim hibridnim metodom ostvaruje se kompromis između zahteva po pitanju kašnjenja i visoke pouzdanosti kontrolne ravni mreže.

## 1.2. Hipoteze

Doktorska disertacija zastupa osnovnu hipotezu da se konverzijom talasnih dužina i agregacijom saobraćaja može uticati na efikasnost korišćenja resursa odnosno na unapređenje performansi optičke mreže. Pomoćne hipoteze disertacije su:

- Izborom optimalnih lokacija konvertora talasnih dužina moguće je smanjiti verovatnoću blokiranja zahteva na nivou mreže.
- Optimalnim grupisanjem konekcija u optičke tunele moguće je ostvariti uštedu ukupnog optičkog spektra, čime se utiče na smanjenje troškova mreže.
- Konkretni ciljevi operatora, topologija mreže, intenzitet saobraćaja i raspoloživi resursi u mreži značajno utiču na primenljivost tehnika mrežnog i saobraćajnog inženjeringa.

## 1.3. Metode istraživanja

Sa ciljem provere hipoteza i postizanja novih naučnih rezultata, primenjene su metode:

- teorijske analize,
- modelovanja,
- matematičkog programiranja,
- računarske simulacije i
- veštačke inteligencije.

U tezi su predloženi novi pristupi rešavanju problema agregacije saobraćaja i konverzije talasnih dužina u optičkim mrežama zasnovani na konceptu inteligencije grupe (SI, *Swarm Intelligence*).

## 1.4. Struktura doktorske disertacije

Uzimajući u obzir temu, predmet i naučni cilj, doktorska disertacija je organizovana kroz osam poglavlja na sledeći način.

Nakon uvodnog dela, u drugom poglavlju razmatraju se osnovni aspekti optičkog umrežavanja, problemi ograničenja sadašnjih WDM mreža, migracija ka elastičnim optičkim mrežama sa otvorenim područjima istraživanja, prednosti koje se time ostvaruju, kao i mogućnost koegzistencije i interoperabilnosti fiksnog i fleksibilnog grida.

U trećem poglavlju dat je pregled referentne literature i istraživanja vezanih za rešavanje problema konverzije talasnih dužina/frekvencijskih slotova i problema optičke agregacije saobraćaja. Sistematizovane su istraživane metode sa aspekta saobraćajnog scenarija, kao i mogućnost kombinacije tehnike agregacije saobraćaja sa drugim tehnikama koje daju značajno unapređenje

spektralne ili energetske efikasnosti i minimizacije operativnih troškova mreže. Tehnike se odnose na problem fragmentacije spektra, vrstu modulacije, oporavak mreže u slučaju otkaza i slično. Uočeno je da se u rešavanju navedenih problema uglavnom primenjuju heuristički algoritmi, a manje metaheuristike, kao i da se metaheuristički pristupi koriste za rešavanje osnovnog RSA problema.

U četvrtom poglavlju predstavljen je problem konverzije talasnih dužina u optičkim WDM mrežama i dati su rezultati primene algoritma za izbor optimalnih lokacija ograničenog broja konvertora talasnih dužina, zasnovanog na metaheuristici Optimizacija kolonijom pčela. Algoritam je testiran na primerima optičkih mreža različite veličine i povezanosti, za različite saobraćajne scenarije, broj talasnih dužina i broj konvertora. Rezultati su pokazali da se algoritam može efikasno koristiti za rešavanje navedenog problema i identifikovani su parametri koji najviše utiču na raspored konvertora i verovatnoću blokiranja zahteva odnosno parametri koji najviše utiču na unapređenje performansi mreže.

Peto poglavlje obuhvata teoretski koncept problema optičke agregacije saobraćaja. Sveukupne performanse mreže zavise od primenjenog RSA algoritma, zbog čega su prvo definisana osnovna RSA ograničenja: ograničenje susedstva i kontinuiteta frekvencijskih slotova, kao i metode za rešavanje problema rutiranja i alokacije spektra. Prikazani su rezultati egzaktnog rešavanja na primeru manje optičke mreže. Zatim su definisana dodatna ograničenja koja uvodi tehnika agregacije saobraćaja i prednosti primene iste.

U šestom poglavlju disertacije predložen je novi algoritam zasnovan na metaheuristici Optimizacija kolonijom pčela kojim se minimizira ukupan broj frekvencijskih slotova zauzetih na svim linkovima mreže uz pretpostavku uspostavljanja svih zahtevanih konekcija. Algoritam je testiran na primerima realnih optičkih mreža, a rezultati su pokazali da se isti može efikasno koristiti za rešavanje problema rutiranja i alokacije spektra sa agregacijom saobraćaja na optičkom nivou. S obzirom da je istraživani statički saobraćajni scenario, predloženi algoritam se može koristiti u fazi planiranja i projektovanja optičkih mreža. Algoritam je poređen sa rezultatima dostupnim u stručnoj literaturi odnosno postojećim heurističkim algoritmima koji su prethodno predloženi za rešavanje ovog problema. Analizirajući kriterijumsku funkciju koja se odnosi na ukupan zauzeti spektar odnosno broj zauzetih frekvencijskih slotova ostvaren je bolji rezultat.

Da bi se primenile odgovarajuće tehnike optimizacije resursa mreže neophodno je adekvatno upravljanje i kontrola mreže odnosno uspostavljanje kontrolne ravni. Projektovanje kontrolne ravni optičke mreže postaje značajno složenije uvođenjem fleksibilne frekvencijske rešetke jer se akcenat stavlja na frekvencijske slotove. S tim u vezi, u sedmom poglavlju prikazano je projektovanje kontrolne ravni zasnovano na prednostima nekoliko postojećih metoda, kojim se signalizacija kontrolnog i korisničkog saobraćaja odvija preko istog ili odvojenog optičkog vlakna i van propusnog opsega. Prikazane su nove mogućnosti inženjeringa saobraćaja i upravljanja u optičkoj transportnoj mreži. Predložen je hibridni metod za projektovanje kontrolnih kanala u GMPLS (*Generalized Multi-Protocol Label Switching*) mreži razdvajanjem kontrolne i korisničke ravni. Rezultat razdvajanja kontrolne i korisničke ravni je da, u slučaju otkaza na konekcijama kontrolne ravni, ne dolazi do problema u isporuci korisničkih podataka.

Zaključna razmatranja sa najvažnijim doprinosima do kojih se došlo istraživanjima sprovedenim u okviru doktorske disertacije prikazana su u osmom poglavlju. Razmatrani su rezultati originalno razvijenog algoritma, mogućnosti unapređenja i istaknuti mogući pravci daljih istraživanja.

Na kraju je dat spisak referentne literature.

Optimizacija performansi optičkih WDM mreža agregacijom saobraćaja i konverzijom talasnih dužina

---



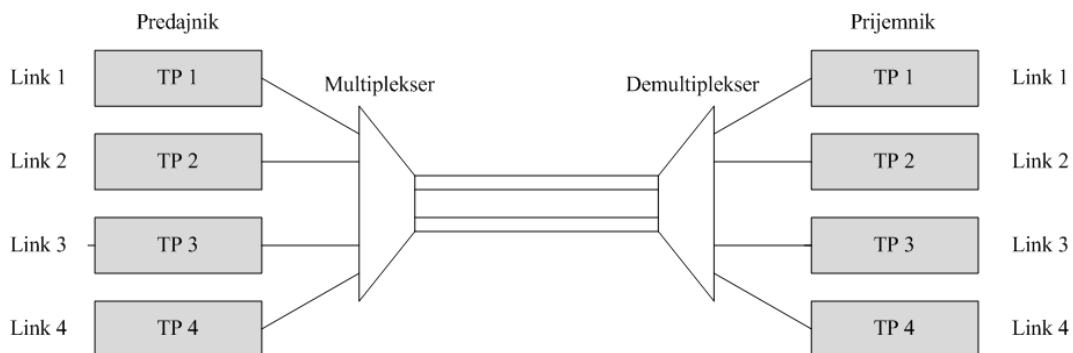
2.

**OSNOVNI ASPEKTI OPTIČKOG  
UMREŽAVANJA- KONCEPT WDM  
I MIGRACIJA KA EON**

---

## 2. OSNOVNI ASPEKTI OPTIČKOG UMREŽAVANJA- KONCEPT WDM I MIGRACIJA KA EON

Optičke mreže sa multipleksiranjem po talasnim dužinama i rutiranjem puteva svetlosti na bazi talasnih dužina optičkih signala predstavljaju aktuelno rešenje za realizaciju optičkih transportnih mreža za široka područja. Gusto multipleksiranje po talasnim dužinama koje se primenjuje u okosnicama mreža (opšti koncept prikazan na slici 2.1.), gde je 100 GHz ili 50 GHz definisan razmak između kanala, omogućava bitski protok do 100 Gb/s po talasnoj dužini (kanalu). Međutim, ono što nude sadašnji optički komunikacioni sistemi neće biti dovoljno za sve veće buduće saobraćajne zahteve [3].



Slika 2.1. Opšti koncept DWDM sistema

Komunikacija u WDM mrežama zasniva se na principu komutacije kola. Između krajnjih čvorova uspostavlja se put svetlosti ili optička konekcija kojoj se dodeljuje talasna dužina na odabranoj fizičkoj ruti. Put svetlosti između dva krajnja čvora mreže predstavlja potpuno optički komunikacioni kanal kojim se može ostvariti prenos signala brzinama ograničenim procesorskim mogućnostima korišćene terminalne opreme u krajnjim čvorovima mreže. Efikasnim rešavanjem problema izbora rute kojom će put svetlosti biti uspostavljen i dodelje talasne dužine odabranoj ruti postiže se unapređenje performansi i upravljanje resursima optičke WDM mreže.

Ograničenje kontinuiteta i različitosti talasnih dužina koja se moraju zadovoljiti prilikom rešavanja RWA problema značajno utiču na performanse mreže, tj. povećavaju verovatnoću blokiranja zahteva. Pod ograničenjem kontinuiteta talasne dužine podrazumeva se da put svetlosti na svim linkovima duž rute od izvornog do odredišnog čvora mora koristiti istu talasnu dužinu. Ograničenje je neophodno zadovoljiti kada se u optičkoj mreži ne koriste konvertori talasnih dužina, prvenstveno zbog relativno visoke cene. Drugo navedeno ograničenje podrazumeva da dva puta svetlosti koja koriste bar jedan zajednički fizički link moraju imati različite dodeljene talasne dužine. S ciljem relaksacije navedenih ograničenja i unapređenja performansi mreže, problemi koji se intenzivno istražuju u oblasti optičkog umrežavanja odnose se na konverziju talasnih dužina i agregaciju saobraćaja, odnosno na problem lociranja čvorova sa konverzijom talasnih dužina i grupisanja manjih konekcija u puteve svetlosti većeg kapaciteta.

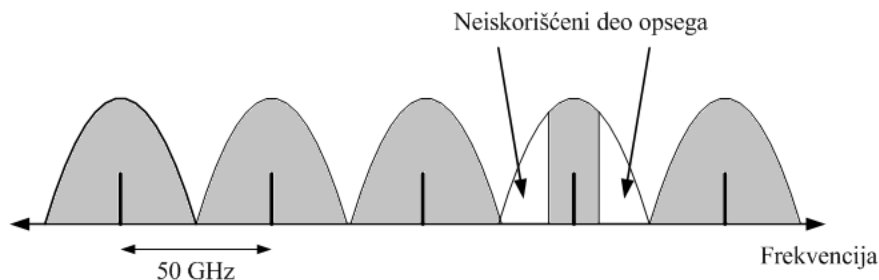
### 2.1. Evolucija WDM mreža ka elastičnim optičkim mrežama

Povećanje obima Internet saobraćaja podstaknuto je rastom broja krajnjih korisnika, rastom saobraćaja po krajnjem korisniku, kao i prenosu i obezbeđivanju različitih sadržaja i aplikacija u realnom vremenu. Konstantni zahtevi koji se postavljaju pred buduće optičke transportne mreže su:



- zahtevi za većim kapacitetom po vlaknu zbog prognoze rasta Internet saobraćaja,
- zahtevi za većim kapacitetom po optičkom kanalu (zbog rasta brzine Ethernet-a),
- manji troškovi i utrošak energije po bitu kao i povećanje spektralne efikasnosti.

Za telekomunikacione operatore prethodno navedeno podrazumeva promene u širini propusnog opsega, promene u arhitekturi mreže, a s obzirom da sve prognoze predviđaju i dalji rast saobraćaja [4], od optičkih mreža se očekuje da podržavaju prenos do nivoa Tb/s. To zahteva i veće formate modulacije (npr. QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*). Da bi se podržali budući saobraćajni zahtevi potrebno je primeniti više podnosilaca i smanjiti razmak između kanala kako bi neiskorišćeni deo opsega (prikazan na slici 2.2) postao upotrebljiv.



Slika 2.2. Dodela propusnog opsega u sadašnjim WDM mrežama [3]

Maksimalnim korišćenjem svojstva elastičnosti u optičkom domenu može se uticati na efikasnu i skalabilnu upotrebu spektralnih resursa. Ono što predstavlja osnovnu razliku i prednost EON u odnosu na trenutne WDM mreže jeste fleksibilna podrška različitih binarnih protoka u uslovima kada će fizički kapacitet optičkog vlakna biti potpuno iskorišćen. To znači da će imperativ u budućim istraživanjima biti pronalazak načina i tehnika kojima će se raspoloživi optički spektar koristiti na što racionalniji način.

## 2.2. Koncept fleksibilnog grida i frekvencijskog slota

ITU-T preporukom G.694.1 [2], koja je ažurirana 2012. godine, podržana je i standardizovana fleksibilna dodela opsega definisanjem fleksibilnog grida i frekvencijskog slota sa novom širinom od 25, 12.5 ili čak 6.25 GHz, što je značajno manje nego kod postojećih DWDM mreža. Paralelno sa tim, IETF (*Internet Engineering Task Force*) usavršavao je ekstenzije protokola kako bi se podržao koncept fleksibilnosti i standardizacija rešetke koja omogućava najbolju spektralnu efikasnost [5-8]. Predložena tehnika modulacije u EON mrežama koja omogućava koncept fleksibilnosti jeste O-OFDM (*Optical-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) čiji su osnovni principi i odgovarajuća arhitektura mreža predstavljeni u [9]. O-OFDM omogućava da se raspoloživi optički spektar deli na parcijalne frekvencijske slotove, a svaka konekcija zauzima različit broj slotova veličine OFDM podnosilaca.

Jedan frekvencijski slot predstavlja minimalni opseg učestanosti koji optički signal može da zauzme i određen je centralnom frekvencijom  $f_c$  i širinom slota  $f_{slot}$ . Deo opsega koji se dodeljuje određenom putu svetlosti takođe karakteriše najmanji i najveći indeks slota ( $n_l$  i  $n_h$ ), odnosno početna i krajnja frekvencija. Centralna frekvencija  $f_c$  [THz] i širina dodeljenog opsega  $f_w$  su, po ITU-T standardizaciji, date izrazom [2]:

$$f_c = 193.1 + \left(\frac{n_l+n_h}{2}\right) f_{slot} \quad (2.1)$$

$$f_w = (n_h - n_l + 1)f_c \quad (2.2)$$

gde su:

$f_c$  - centralna frekvencija,

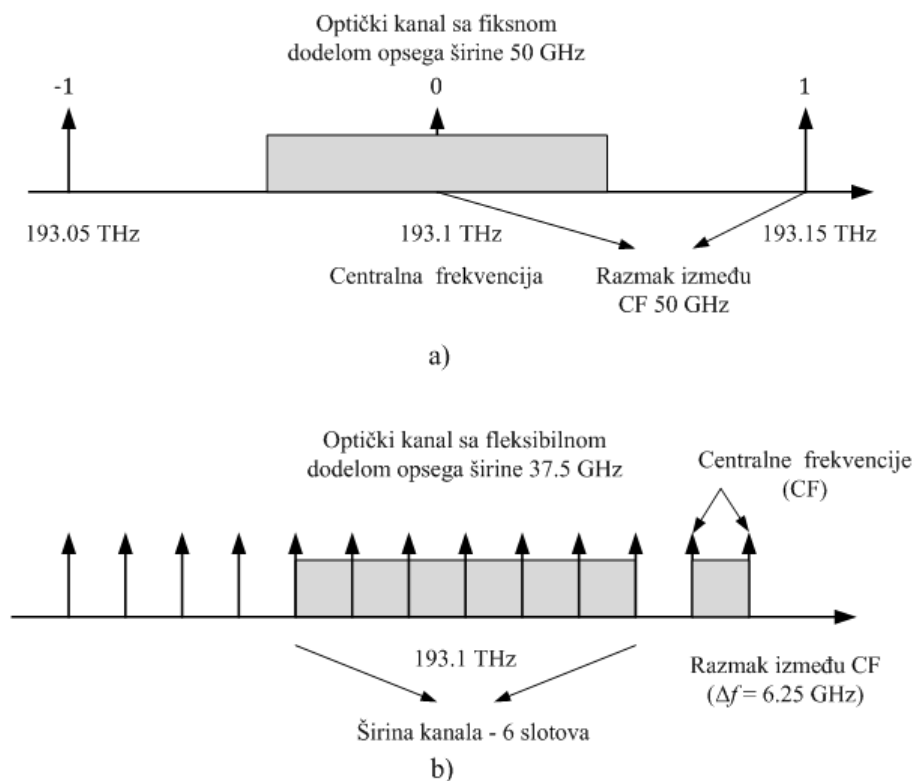
$f_{slot}$  - širina slotova,

$n_l$  - najniži indeks slotova,

$n_h$  - najviši indeks slotova i

$f_w$  - širina dodeljenog opsega.

Fleksibilni grid sastoji se od seta nominalnih (centralnih) frekvencija i seta slotova, gde svaki zauzima prostor između dve centralne frekvencije (slika 2.3.). Prema [2], granularnost (razmak) između centralnih frekvencija je  $\Delta f = 6.25$  GHz, a s obzirom da optički kanal zauzima opseg simetrično, širina kanala je  $2\Delta f = 12.5$  GHz (minimalna, a može biti i veća ako kanal čini više slotova). Na slici 2.4. prikazana je razlika u zauzimanju spektra između a) fiksnog i b) fleksibilnog grida. U prvom slučaju zauzima se 50 GHz, a u drugom slučaju 37.5 GHz spektra, respektivno.



Slika 2.3. Koncept: a) fiksni DWDM grid i b) fleksibilni grid [2]

### 2.3. Karakteristike EON mreža

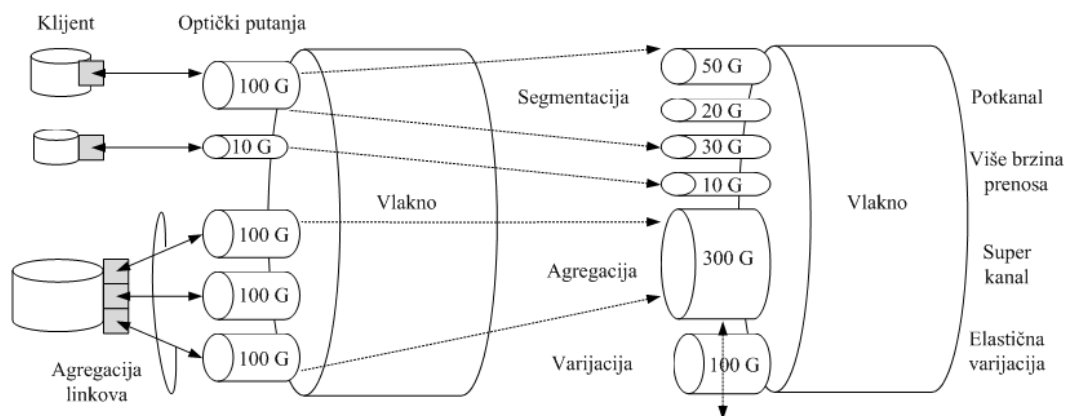
Elastične optičke mreže predstavljaju unapređenu formu WDM mreža u kojima se, umesto talasne dužine, kao jedinični resurs posmatra frekvencijski slot. Za uspostavljanje optičke putanje koristi se samo određeni deo opsega, u skladu sa saobraćajnim zahtevom. Termin "elastična" podrazumeva sledeće:

- dodela optičkog propusnog opsega fleksibilno u skladu sa zahtevima,

- uspostavljanje optičkih putanja sa adaptivnim protokom ili elastičnih puteva svetlosti.

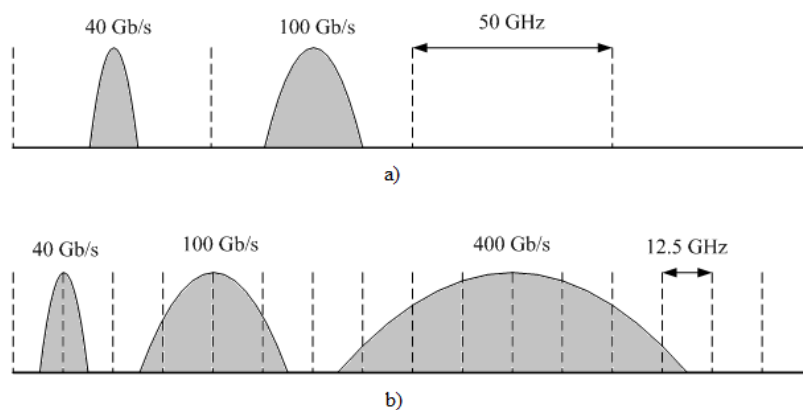
Najvažnije karakteristike i prednosti EON (slika 2.4.) u poređenju sa sadašnjim WDM mrežama prikazane su u [3], [10-14] i obuhvataju sledeće:

- segmentacija propusnog opsega (*subwavelength channel*).
- agregacija propusnog opsega (*superwavelength channel*) – nekoliko optičkih putanja grupiše se u jednu u optičkom domenu.
- mogućnost elastičnih brzina prenosa ili brzina prenosa prema zahtevima korisnika,
- promena broja podnosilaca i vrste modulacije,
- spektralna efikasnost – spektralno preklapanje među podnosiocima,
- energetska efikasnost – kada je saobraćaj u mreži manjeg intenziteta, isključuje se iz rada određeni broj frekvencijskih podnosilaca i ostvaruje manji utrošak energije kao i upotrebom manjeg broja optičkih predajnika.
- virtuelizacija mreže



Slika 2.4. Karakteristike EON mreža i grupisanje optičkih putanja [3]

Uspostavljanje optičkih putanja za slučaj a) fiksne i b) fleksibilne dodele opsega prikazano je na slici 2.5. Može se zaključiti da je suština elastičnih optičkih mreža u mogućnosti fleksibilne dodele propusnog opsega širine OFDM podnosilaca, odnosno veličine minimalno jednog frekvencijskog slota, što je racionalnije u odnosu na fiksnu dodelu opsega (veličine talasne dužine) u današnjim WDM optičkim mrežama.



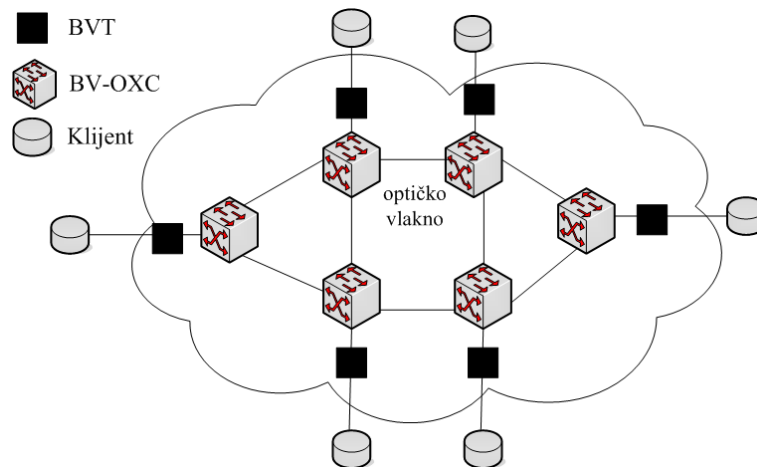
Slika 2.5. Uspostavljanje optičkih putanja i širina kanala: a) fiksna dodela opsega i b) fleksibilna dodela opsega [10]

## 2.4. Hardverska realizacija EON mreža

Migracija fiksnih ka fleksibilnim arhitekturama odnosno zamena mrežne opreme kako bi se elastičnost fizički implementirala pitanje je trenutka za operatore telekomunikacionih mreža. Najvažniji faktori koji će uticati na migraciju su: očekivani benefiti, ukupni troškovi instalacije adaptivne opreme, kompatibilnost sa postojećom opremom, upravljanje mrežom i dr.

Realizacija elastičnih optičkih mreža zahteva arhitekturu (prikazana na slici 2.6.) sa sledećim hardverskim komponentama [15-18]:

- optički kros-konektori promenljivog kapaciteta (BV-OXC, *Bandwidth Variable- Optical Cross-Connect*) kojima se rutiraju putevi svetlosti od predajnika do prijemnika,
- rekonfigurabilni optički add/drop multiplekseri (ROADM, *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers*), koji služe za izdvajanje ili prosljeđivanje signala, bez O/E/O konverzije u čvorovima i
- adaptivni optički predajnici i prijemnici (BVT, *Bandwidth Variable Transponder*) koji se softverski prilagođavaju centralnoj frekvenciji dolaznog signala kao i vrsti modulacije.



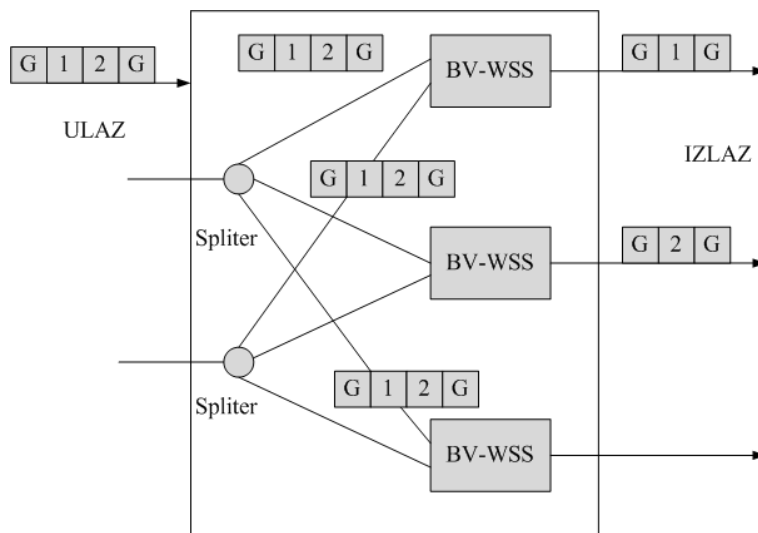
Slika 2.6. Arhitektura elastične optičke mreže [3]

Evaluacija različitih konfiguracija optičkih mreža sa navedenim elementima može se pronaći u [19], gde su predloženi modeli kojima se mogu kvantifikovati različiti stepeni fleksibilnosti. S aspekta hardvera, elastičnost znači dodavanje određenih funkcija čvorovima mreže (čvorovi koji budu imali mogućnost podrške fleksibilnog grida nazivaju se *flexgrid* čvorovi). Da bi se uspostavila fleksibilna optička putanja s kraja na kraj, podešava se veličina prozora komutacije u skladu sa spektralnom širinom dolaznog signala. Prilagođavanje spektralnoj širini dolaznog signala moguće je primenom komutatora talasnih dužina WSS (*Wavelength Selective Switch*) [20, 21].

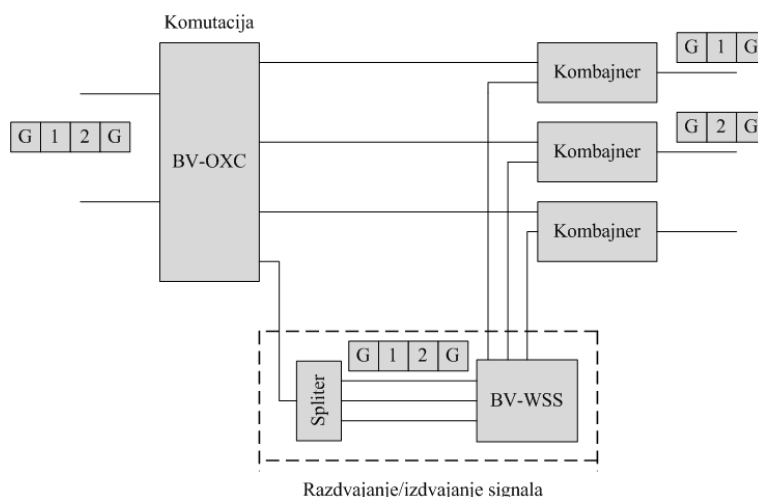
Prva arhitektura *flexgrid* čvorova predložena je u [22] pod nazivom *broadcast-and-select* (slika 2.7.), a zatim unapređena za mogućnost agregacije saobraćaja u [23], pod nazivom *shared splitting* arhitektura (slika 2.8.). Navedene arhitekture su pogodne za statički saobraćajni scenario odnosno ne podržavaju dinamičke zahteve gde se javlja problem fragmentacije opsega. Analiza i komparacija navedenih arhitektura sa aspekta ukupnih gubitaka snage signala, rutiranja, multipleksiranja i mogućnosti oporavka u slučaju otkaza mreže prikazana je u [3].

*Broadcast-and-select* arhitektura hardverski zahteva po jedan BV-WSS na svakom izlaznom portu jer se spektar dolaznog optičkog tunela kopira na sve portove. Primenom *shared splitting* arhitekture

smanjuje se potreban broj BV-WSS jer se signali razdvajaju po potrebi i time poboljšava energetska efikasnost čvora. Arhitektura podrazumeva deo za komutaciju i deo za razdvajanje signala.



Slika 2.7. Broadcast-and-select arhitektura flexgrid čvorova [22]



Slika 2.8. Shared splitting arhitektura flexgrid čvorova [23]

## 2.5. Koegzistencija fiksnog i fleksibilnog grida

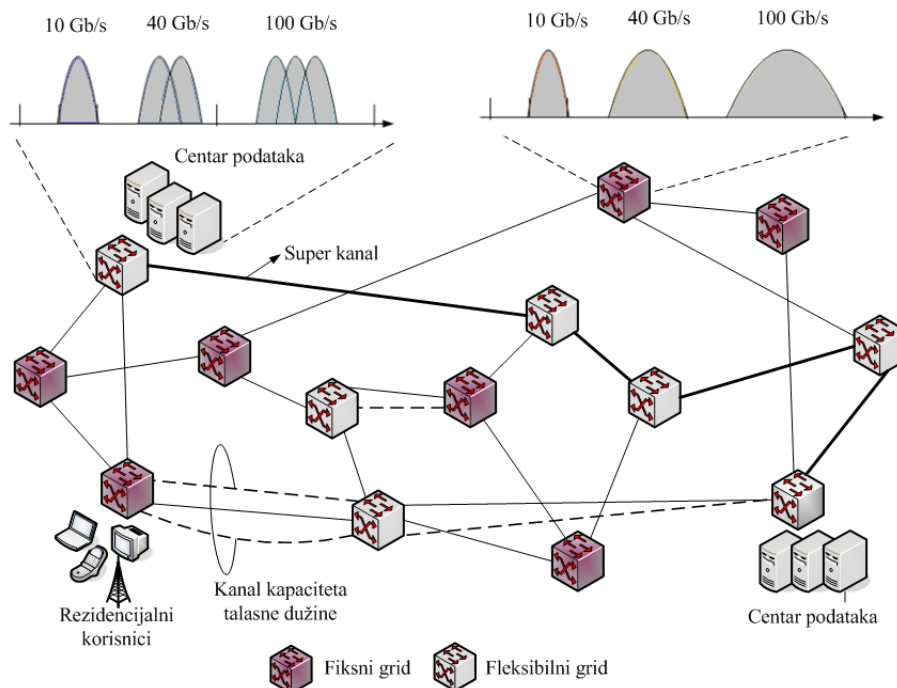
U ovom delu disertacije izdvojena su određena pitanja vezana za koegzistenciju fiksnog i fleksibilnog grida u arhitekturi optičke mreže, strategije migracije ka elastičnim optičkim mrežama, izbor lokacija adaptivnih čvorova i sl. [24]. U uslovima realnog rada mreže uvek postoje čvorovi koji čine usko grlo odnosno čvorovi sa većim intenzitetom saobraćaja (npr. centri podataka). Adaptivnu opremu potrebno je implementirati prvo u takve čvorove.

### 2.5.1. Tehnička interoperabilnost fixgrid i flexgrid čvorova

Termini *fixgrid* i *flexgrid* čvorovi odnose se na funkciju čvora da podržava ili ne podržava fleksibilnost odnosno mogućnost promene određenih parametara. Interoperabilnost *fix* i *flexgrid* čvorova (ilustrovana na slici 2.9.) biće neophodna u procesu migracije ka EON mrežama i nameće

nekoliko mogućih scenarija rada. Ukoliko ruta optičke putanje obuhvata obe vrste čvorova, mogući su sledeći scenariji dodele talasnih dužina/alokacije spektra [24, 25]:

- Izvorni čvor konekcije je *fixgrid* čvor- problem WA (*Wavelength Assignment*).
- Izvorni čvor konekcije je *flexgrid* čvor- javljaju se dva slučaja:
  - Rutu čine *flexgrid* čvorovi- problem SA (*Spectrum Allocation*) gde se optička putanja uspostavlja korišćenjem jednog ili više frekvencijskih slotova.
  - Rutu čine i *fix* i *flexgrid* čvorovi- u parcijalnom delu rute od *flexgrid* do *fixgrid* čvora rešava se SA problem, a u dužini rute od *fixgrid* do *flexgrid* čvora WA problem.

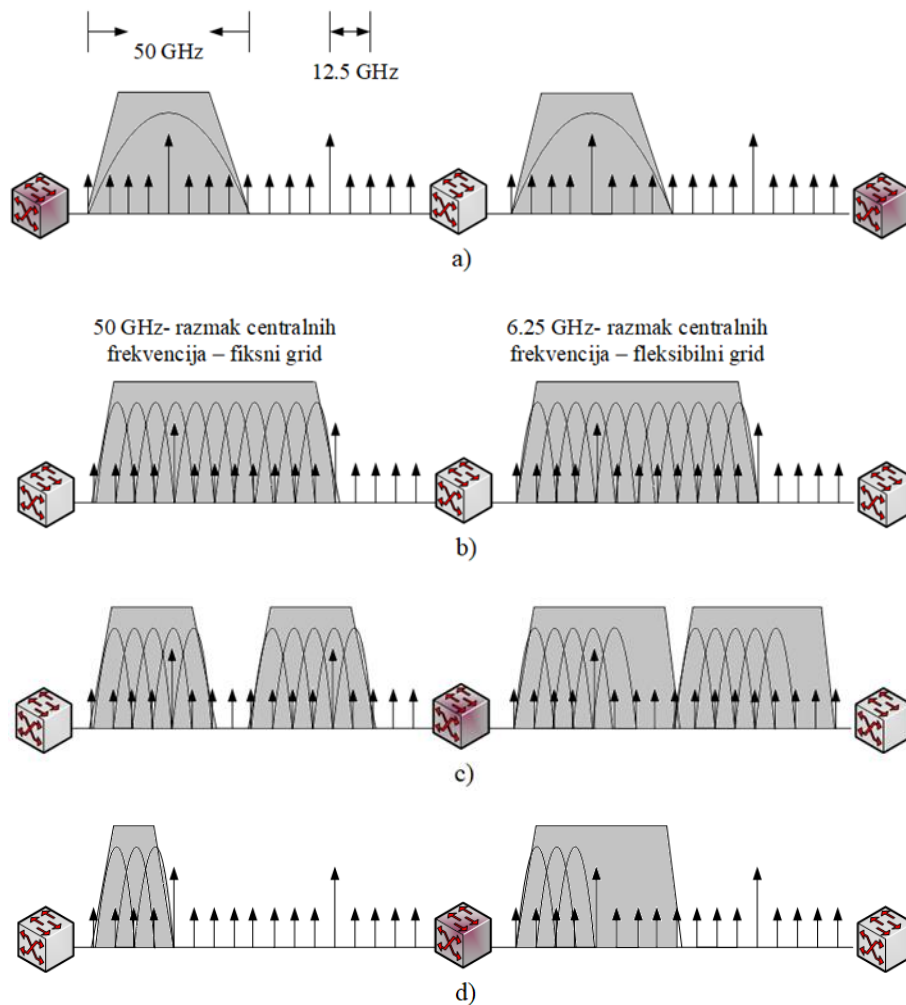


Slika 2.9. Interoperabilnost i koegzistencija fiksnog i fleksibilnog grida [25]

Spektralna iskorišćenost u mreži gde koegzistiraju i fiksni i fleksibilni grid prikazana je na slici 2.10. (a-d) za četiri moguća scenarija. Pretpostavka je da je 50 GHz razmak centralnih frekvencija kod čvorova sa fiksnim gridom a u slučaju čvorova sa fleksibilnim gridom 6.25 GHz (jedan slot ima širinu 12.5 GHz). Pretpostavljeni kapacitet talasne dužine je 100 Gb/s, dok je potreban broj frekvencijskih slotova za zahtevani kapacitet optičkih kanala dat u tabeli 2.1. kao i zauzeti spektar za razne scenarije.

Tabela 2.1. Zauzetost spektra u slučaju fiksnog i fleksibilnog grida

Kanal	Spektar	Fiksni grid		Fleksibilni grid	
		Spektar	Broj talasnih dužina	Spektar	Broj slotova
40 Gb/s	50 GHz	50 GHz	1	25 GHz	2
100 Gb/s	50 GHz	50 GHz	1	37.5 GHz	3
200 Gb/s	100 GHz	100 GHz	2	75 GHz	6
400 Gb/s	200 GHz	200 GHz	4	125 GHz	10



Slika 2.10. Scenariji zauzetosti spektra: a) kanal kapaciteta talasne dužine (100 Gb/s); b) super kanal kapaciteta 200 Gb/s; c) dva kanala od 100 Gb/s i d) kanal od 40 Gb/s [25]

## 2.5.2. Strategije migracije ka elastičnim optičkim mrežama

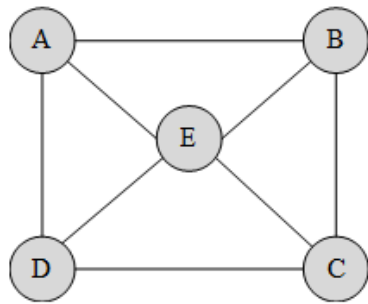
Potpuni prelazak na koncept elastičnih optičkih mreža ne može se realizovati odjednom na nivou cele mreže jer zahteva velike investicije, neprihvatljive za operatora mreže. Kao kompromisno rešenje razmatra se oblik postepene ili parcijalne migracije pojedinih delova fiksne na fleksibilnu mrežu, tj. prvo onih delova koji čine usko grlo. Nekoliko strategija migracije WDM mreža ka EON mrežama prikazano je u [24-29] pri čemu je važno izdvojiti nekoliko pitanja koja će zahtevati rešavanje od strane operatora:

Prvo pitanje: Koji čvor mreže prvo zameniti sa adaptivnom opremom? Potencijalna rešenja (strategije) koja uzimaju u obzir topologiju mreže, saobraćajno opterećenje, uska grla mreže su sledeća:

- (1) čvorovi sa najvećim stepenom fizičke povezanosti,
- (2) čvorovi koji generišu najveći intenzitet saobraćaja,
- (3) čvorovi koji opslužuju najveći intenzitet saobraćaja računajući i tranzitni saobraćaj,
- (4) čvorovi sa najvećim brojem zahteva velikog intenziteta- sa ciljem opsluživanja zahteva velikog intenziteta,

- (5) čvorovi sa najvećim brojem zahteva manjeg intenziteta (npr. 40 Gb/s)- sa ciljem opsluživanja više manjih zahteva uz zauzimanje manje širine opsega.

Ilustracija primene strategija prikazana je na slici 2.11 za manju mrežu od 5 čvorova. Na osnovu povezanosti, vrednosti opsluženog saobraćaja, uzimajući u obzir i tranzitni saobraćaj biraju se određene strategije. U slučaju strategije (1) bira se čvor E zbog najvećeg stepena povezanosti. Strategijom (2) bira se čvor D jer generiše najveći intenzitet saobraćaja. Strategijom (3) bira se čvor B preko kojeg se prenosi najviše saobraćaja, uključujući i tranzitni. Ako se uzme u obzir strategija (4) bira se čvor D, jer ima najveći broj zahteva velikog intenziteta. U slučaju strategije (5) bira se čvor A jer ima najviše zahteva manjeg intenziteta.



Izvor	Odredište	Protok (Gb/s)	Ruta	Čvor	Opsluženi saobraćaj (Gb/s)
A	B	40	A-B	A	280
	E	40	A-E	B	640
	C	200	A-B-C	C	600
D	E	100	D-E	D	500
	B	400	D-C-B	E	140

Slika 2.11. Ilustracija izbora lokacije *flexgrid* čvorova na osnovu strategije migracije

Drugo pitanje: Mogućnost formiranja „*flexgrid* ostrva“. „Ostrvo“ čini nekoliko čvorova mreže koji su susedni i povezani sa čvorovima koji su adaptivni. Razmatranje formiranja ostrva važno je zbog međusobnog uticaja čvorova odnosno maksimiziranja opsluženog intenziteta saobraćaja.

Treće pitanje: Koliko čvorova zameniti sa adaptivnom opremom? Paralelno sa postavljenim ciljem operatora bira se i broj adaptivnih čvorova. Izvesno je da će prelazak na *flexgrid* tehnologiju biti progresivnog karaktera, nadgradnjom određenih delova mreže (rešavanje problema uskih grla). Najbolja strategija migracije podrazumevaće optimizaciju više kriterijuma, kako bi se s jedne strane uključili benefiti koji se mogu postići primenom fleksibilne opreme a s druge strane troškovi implementacije, kao i zahtevi u pogledu kvaliteta servisa.

## 2.6. Otvorena pitanja u istraživanju EON mreža

Koncept elastičnosti donosi niz prednosti ali istovremeno otvara i nova pitanja koja će biti predmet istraživanja. U nastavku je izdvojeno nekoliko značajnih pitanja.

### 2.6.1. Hardverski razvoj komponentata mreže

Da bi se postigla spektralna efikasnost i funkcionisanje sa tehnologijom fleksibilnog grida, neophodan je razvoj hardverski sofisticiranih uređaja i komponentata mreže. To podrazumeva primenu temperaturno stabilnih i frekvencijski kontrolisanih lasera, unapređenje optičke komutacije, razvoj 100 Gb/s OFDM transpondera koji se istovremeno moraju prilagođavati i nižim protocima, EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*) pojačavača sa manjim gubicima snage i manjim kašnjenjem i sl.

### 2.6.2. Kontrola i upravljanje mrežom

Uspostavljanje kontrolne ravni jedan je od izazova u realizaciji EON mreža. U sadašnjim optičkim mrežama GMPLS kontrolna ravan omogućava prenos i komutaciju preko različitih tipova mreža.



Signalizacioni, protokoli rutiranja i protokoli za upravljanje linkom zaduženi su za upravljanje konekcijama u korisničkoj ravni. Zbog uvođenja fleksibilnog grida predložene su ekstenzije GMPLS protokola. Ekstenzije podrazumevaju dodavanje novih podobjekata u format signalizacionih poruka. Takođe, razmatra se primena centralizovanog *OpenFlow* protokola za rad SDN (*Software Defined Network*) mreže [30, 31].

### 2.6.3. Energetska efikasnost

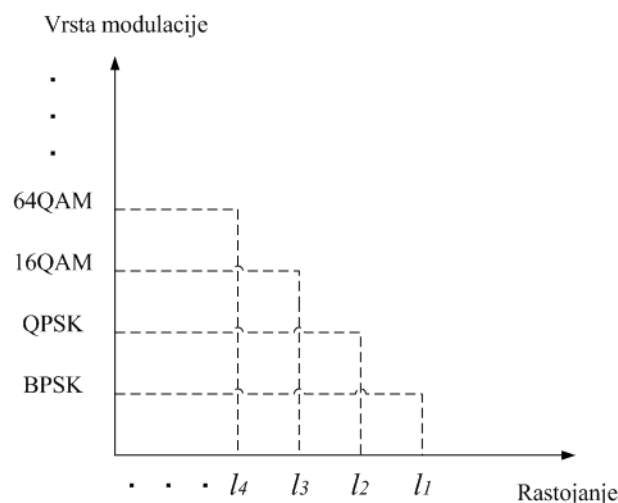
Porast obima saobraćaja u okosnicama mreža takođe dovodi i do povećanja potrošnje energije. Buduće optičke mreže, pored spektralne efikasnosti, treba da podržavaju i energetska efikasnost. EON mreže imaju mogućnost da smanje potrošnju energije primenom SBVT (*Sliceable BVT*) i tehnika kao što je agregacija saobraćaja. Takođe, u slučajevima kada je manji obim saobraćaja (ili do određene granice), moguće je određene elemente postaviti u tzv. *sleep mode*, odnosno privremeno ih isključiti iz rada. Kumulativno posmatrano, cilj je smanjiti ukupnu potrošnju energije koju uzrokuju sve komponente optičkog linka.

### 2.6.4. Slabljenja signala na fizičkom sloju

Kao posledica uspostavljanja optičkih konekcija po veoma dugim putanjama sa velikim brojem linkova, javljaju se degradacije na fizičkom sloju, kao što su disperzija, interferencija, šumovi, nelinearni efekti koji utiču na kvalitet signala i kvalitet prenosa. Uvođenjem koherentne detekcije i digitalne obrade signala, efekti disperzije mogu se delimično ili u potpunosti redukovati. Koncept fleksibilnog grida čini ove postupke složenijim, što zahteva nova istraživanja.

### 2.6.5. Upravljanje spektrom

Jedno od najvažnijih pitanja EON mreža u operativnom radu mreže jeste dodela mrežnih resursa u dinamičkom okruženju. Pored dodele frekvencijskih resursa u obliku slotova, kod elastičnih optičkih mreža moraju se podešavati i parametri vezani za modulaciju (slika 2.12.) i adaptivne predajnike i prijemnike, što dodelu opsega čini složenijom. U zavisnosti od rastojanja određuje se i vrsta modulacije.



Slika 2.12. Vrsta modulacije u funkciji rastojanja [3]

Dinamičko okruženje u kojem se javljaju promene profila i varijacije u intenzitetu saobraćaja za posledicu ima blokiranje konekcija većeg intenziteta zbog poznatih RSA ograničenja, kao i fragmentaciju opsega. Iz tog razloga, način na koji će spektar u ovakvom okruženju biti podeljen, odnosno kakvi su efekti podele spektra u slučaju jednakih i različitih širina slotova jedno je od pitanja koje zahteva istraživanja.

Optimizacija performansi optičkih WDM mreža agregacijom saobraćaja i konverzijom talasnih dužina

---

# 3.

**PREGLED RELEVANTNE  
LITERATURE**

---

### 3. PREGLED RELEVANTNE LITERATURE

U ovom poglavlju disertacije dat je pregled relevantne literature u oblasti rešavanja problema konverzije talasnih dužina/frekvencijskih slotova i agregacije saobraćaja. Agregacija saobraćaja je posebno istražena u elastičnim optičkim mežama.

#### 3.1. Problem konverzije talasnih dužina

Tehnika mrežnog inženjeringa kojom se ublažavaju posledice ograničenja kontinuiteta talasnih dužina puteva svetlosti odnosi se na konverziju talasnih dužina u pojedinim čvorovima mreže. Tehnika omogućava uspostavljanje puteva svetlosti preko različitih talasnih dužina čime se smanjuje verovatnoća blokiranja zahteva. Jedan od problema iz ove kategorije odnosi se na određivanje optimalnih lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina, s obzirom da različiti čvorovi u mreži opremljeni konvertorima talasnih dužina imaju različit uticaj na verovatnoću blokiranja zahteva.

Prema stepenu konverzije talasnih dužina razlikuju se: konvertori sa punim stepenom konverzije talasnih dužina (FWC, *Full Wavelength Conversion*) i konvertori sa ograničenim stepenom konverzije (LWC, *Limited Wavelength Conversion*). U slučaju FWC konvertora, talasna dužina ulaznog signala može se konvertovati na bilo koju drugu talasnu dužinu, dok se u slučaju LWC konvertora, konverzija može izvršiti samo na određeni skup (opseg) talasnih dužina. Pošto implementacija konvertora zahteva dodatne troškove, a i zbog činjenice da njihova implementacija u sve čvorove mreže ne donosi značajno unapređenje performansi mreže, prihvatljivije je rešenje da se FWC konvertori implementiraju u samo određene čvorove mreže i takve mreže se nazivaju mreže sa retkom raspodelom konvertora talasnih dužina (SWC, *Sparse Wavelength Conversion*) [32, 33].

Prilikom određivanja optimalnih lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina razlikuju se statički i dinamički saobraćajni scenario. U slučaju statičkog saobraćajnog scenarija, tj. poznate matrice zahteva, kriterijumska funkcija se odnosi na minimizaciju potrebnog broja talasnih dužina, broja konverzija talasnih dužina, tj. minimizaciju ukupne cene mreže tako da svi zahtevani putevi svetlosti budu uspostavljeni u mreži. U slučaju dinamičkog saobraćajnog scenarija gde zahtevi imaju slučajno trajanje, osnovni cilj je minimizacija verovatnoće blokiranja zahteva pri raspoloživim resursima u mreži. Za rešavanje navedenog problema predložene su brojne ILP (*Integer Linear Programming*) formulacije u kojima se maksimizira iskorišćenost konvertora, odnosno minimizira broj talasnih dužina, maksimizira broj uspostavljenih puteva svetlosti itd. S obzirom da je problem NP- težak optimizacioni zadatak, u literaturi su za rešavanje istog predloženi brojni heuristički i metaheuristički algoritmi.

Analički model u kojem je pretpostavljeno fiksno rutiranje i metod slučajne dodele talasnih dužina predstavljen je u [33] a razmatrani su konvertori sa ograničenim stepenom konverzije. Predložen je ILP model u kojem se minimizira verovatnoća blokiranja i broj konvertora, pri čemu je verovatnoća blokiranja izražena kao linearna funkcija lokacije konvertora. Egzaktna ILP formulacija za pronalazak optimalne lokacije konvertora predložena je u [34] sa ciljem minimizacije potrebnog broja konverzija. Razmatrana je SWC raspodela konvertora i statički saobraćajni scenario. Rezultati su pokazali da je verovatnoća blokiranja u slučaju SWC raspodele skoro ista kao i za slučaj FWC odnosno primene konvertora sa punim stepenom konverzije. U [35] je predložena ILP formulacija problema konverzije talasnih dužina za statički saobraćajni scenario kojom se minimizira ukupan broj konverzija u mreži. Poznati su saobraćajni zahtevi, raspoloživi broj konvertora i topologija mreže. Formulacija se može primeniti na mreže manjih dimenzija.

U heurističkim algoritmima prikazanim u [36-40] pokazano je da su problem lociranja konvertora talasnih dužina i problem rutiranja i dodele talasnih dužina međusobno povezani problemi i da ih je neophodno rešavati integralno u cilju postizanja što boljih performansi mreže. U algoritmu predloženom u [36] pretpostavljeno je fiksno alternativno rutiranje, *first fit* princip dodele talasnih dužina (tj. princip prve raspoložive) i konvertori sa potpunim stepenom konverzije. Kriterijumska funkcija podrazumeva minimizaciju prosečne verovatnoće blokiranja zahteva. Uzimajući u obzir saobraćajni scenario i topologiju mreže, problem konverzije je rešavan u [37] uvođenjem gornje granice iskorišćenosti talasnih dužina. Minimalan broj konvertora koji je potrebno odrediti je takav da potreban broj talasnih dužina ne prelazi definisanu gornju granicu koja zavisi od maksimalnog opterećenja na pojedinim linkovima mreže kao i od prosečne dostupnosti talasnih dužina kao parametra koji određuje projektant mreže. U [38, 39] istraživano je kako se menja verovatnoća blokiranja zahteva ako se povećava faktor konverzije talasnih dužina. Predloženi heuristički algoritmi su testirani za razne saobraćajne scenarije, različit broj talasnih dužina po linku i broj raspoloživih konvertora. Rezultati su pokazali da je verovatnoća blokiranja minimalna ako od ukupnog broja čvorova 50 % - 60 % imaju sposobnost konverzije. Pokazano je da se u slučaju daljeg povećanja broja konvertora u mreži ne postiže značajno unapređenje performansi mreže. Efikasno korišćenje resursa primenom ograničene konverzije talasnih dužina prikazano je u [40]. Predložen je model SPLWC (*Sparse-Partial-Limited Wavelength Conversion*) koji integriše sve oblike ograničene konverzije i uzima u obzir dva faktora zbog kojih se javlja blokiranje zahteva: ograničenje raspoloživog broja konvertora i ograničenje stepena konverzije. Minimimiziraju se troškovi konverzije i verovatnoća blokiranja. Rad algoritma zasniva se na sekvencijalnom dodavanju konvertora onim čvorovima koji imaju najveću verovatnoću blokiranja sve dok ta verovatnoća ne bude jednaka ili manja od one koja se na početku definiše kriterijumskom funkcijom.

Velika kompleksnost problema određivanja optimalnog broja i lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina često nameće i potrebu primene različitih metaheurističkih metoda za rešavanje problema. Genetski algoritam u kojem je rešavano pitanje optimalne lokacije konvertora OWCA (*Optimal Wavelength Converter Allocation*) pomoću genetskih operatora pretraživanja: selekcije, ukrštanja i mutacije, prikazan je u [41]. Rešavanje problema pomoću optimizacije kolonijom čestica predstavljeno je u [42] gde je definisana srednja verovatnoća uspostavljanja konekcija između parova čvorova. Evolucioni optimizacioni pristup MOEA (*Multi-Objective Evolutionary Algorithm*) koji je predložen u [43] istovremeno minimizira broj konvertora i prosečnu verovatnoću blokiranja u SWC mreži. Istraživanja ovakvog tipa sprovode se sa ciljem kvantifikovanja benefita koji se ostvaruju uvođenjem alokacije konvertora u projektovanje SWC mreže. Algoritam je primenjen i za slučaj kada su prisutne varijacije saobraćaja [44]. Rezultati su pokazali da opremljenost čvorova mreže od 20-60 % sa konvertorima talasnih dužina daje najbolje rešenje. Diferencijalna evolucija za koju je pokazano da daje bolje rezultate od optimizacije kolonijom čestica primenjena je u [45] sa ciljem minimizacije prosečne verovatnoće blokiranja zahteva. Definisana je verovatnoća uspostavljanja zahteva s kraja na kraj između para čvorova. Pretpostavljeno je da svaki čvor SWC mreže može biti opremljen jednim konvertorom talasnih dužina. Rutiranje se vrši po najkraćoj ruti, a dodela talasnih dužina po slučajnom izboru. Definisanjem nekoliko kontrolnih parametara, pokazano je da je dovoljna manja populacija jedinki za dobijanje optimalnog rešenja. Za rešavanje problema konverzije talasnih dužina primenjene su i metaheuristike optimizacija kolonijom mrava [46] i optimizacija kolonijom pčela [32], [47].

### 3.2. Problem konverzije frekvencijskih slotova

Problem konverzije frekvencijskih slotova još uvek ne predstavlja predmet širih istraživanja, s obzirom da konverzija nije tehnološki dostupna zbog velikih troškova i složenosti arhitekture mreže.

Kao i kod konverzije talasnih dužina, stepen konverzije podrazumeva puni i ograničeni stepen konverzije a primena postupka ublažava negativne efekte RSA ograničenja. S tim u vezi, problem je analiziran kroz nekoliko studija u kojima su predloženi modeli i arhitektura mreže za implementaciju konverzije [48-51].

Projektovanje EON mreže sa mogućnošću potpunog oporavka nakon otkaza uz razmatranje tri stepena konverzije slotova: bez konverzije, delimična i potpuna konverzija, analizirano je u [48]. Za sva tri stepena konverzije predložene su ILP formulacije sa ciljem minimizacije rezervnih kapaciteta i ukupnog broja zauzetih slotova u mreži. Poređenje performansi EON mreže sa i bez primene konverzije frekvencijskih slotova prikazano je u [49] s ciljem minimizacije verovatnoće blokiranja. Za scenario kada se konverzija ne primenjuje, usled RSA ograničenja, javlja se fragmentacija opsega i tada se vrši realokacija slotova. Kada se konverzija primenjuje, ne vrši se realokacija već se konvertori koji se nalaze u određenim tranzitnim čvorovima koriste za konverziju blokiranih zahteva.

Tri arhitekture BV-OXC kros-konektora, pod nazivom *full architecture*, *share-per-link* i *share-per-node* a koje delimično ili u potpunosti podržavaju konverziju frekvencijskih slotova predložene su u [50]. Složenost svake od navedenih arhitektura zavisi od toga gde se nalazi modul za konverziju spektra odnosno deo koji prihvata frekvencijske slotove dolazne konekcije i prosleđuje ih dalje na definisane frekvencije. Data su poređenja arhitektura sa aspekta složenosti prilikom projektovanja, troškova proizvodnje, potrošnje energije i mogućnosti konverzije. Za svaku arhitekturu definisan je matematički model kako bi se poredila verovatnoća blokiranja zahteva. Pored matematičkog modela razvijen je i heuristički model kojim se određuje optimalna lokacija konvertora frekvencijskih slotova za slučaj ograničene konverzije (u samo nekoliko BV-OXC). Arhitektura *share-per-link* se pokazala kao kompromisno rešenje sa aspekta projektovanja, troškova i mogućnosti konverzije. Problem konverzije frekvencijskih slotova rešavan je i u [51] kroz dve predložene heuristike za unapred poznati scenario saobraćaja. Heuristike uzimaju u obzir vrstu modulacije i parametar kojim se podešava opseg frekvencijskih slotova na koji je moguće izvršiti konverziju. Jedna heuristika ispituje potpunu a druga delimičnu konverziju. Opseg frekvencijskih slotova na koji je moguće izvršiti konverziju nazvan je *conversion window* i predstavlja ulazni parametar algoritama.

Slično kao i kod konverzije talasnih dužina, rezultati pokazuju da primena konvertora frekvencijskih slotova samo u određenim čvorovima mreže daje približne rezultate kao i potpuna konverzija.

### 3.3. Problem agregacije saobraćaja u EON mrežama

Tehnika optičke agregacije saobraćaja je kroz pregled literature prvo analizirana sa aspekta saobraćajnog scenarija: statičkog i dinamičkog. Zatim je uočeno da agregacija saobraćaja u kombinaciji sa rešavanjem nekih drugih pitanja kao što su defragmentacija spektra, adaptivna modulacija, energetska efikasnost ili oporavak mreže u slučaju otkaza može značajno uticati na poboljšanje određenih performansi mreže odnosno na postizanje višestrukih ciljeva operatora. Algoritmi iz ove oblasti su grupisani, date su njihove osnovne karakteristike i kriterijumske funkcije.

#### 3.3.1. Statički TG-RSA algoritmi

Sa aspekta saobraćajnog scenarija, TG-RSA problem može se posmatrati kao statički i dinamički. Statički TG-RSA se javlja uvek kada je skup zahtevanih konekcija (matrica saobraćajnih zahteva) koje treba uspostaviti u mreži unapred poznat. Ovakav scenario se uobičajeno sreće u fazi planiranja optičkih transportnih mreža, odnosno planiranja resursa mreže, kao i tokom njihove eksploatacije u slučaju kada nema velikih odstupanja saobraćaja tokom dužeg vremenskog perioda. Tipična kriterijumska funkcija pri ovakvom saobraćajnom scenariju jeste minimizacija ukupnog broja

frekvencijskih slotova zauzetih na svim linkovima mreže (ukupnog spektra) ili minimizacija broja optičkih predajnika uz pretpostavku uspostavljanja svih konekcija.

Najranija istraživanja vezana za agregaciju saobraćaja na optičkom nivou i mogućnosti iskorišćenja svojstva elastičnosti mogu se pronaći u [20], [52, 53]. Prvobitne ideje oko arhitekture BVT, koncept optičkog tunela i tzv. fotonskog grupisanja razmatrani su u [52]. U [20] je uveden pojam “paradigma” elastičnih optičkih mreža, gde su predstavljeni glavni pokretači razvoja ovakvog načina umrežavanja. Detaljno je analizirana arhitektura i mogućnost primene podesivih predajnika, a time i postupka agregacije konekcija, podrška za protoke od 400 Gb/s, kao i određena pitanja standardizacije. Mogućnost prebacivanja saobraćaja sa IP na optički elastični nivo, čime se izbegava značajan broj rutera i O/E/O konverzija signala prvobitno je razmatrana u [53]. Podesivi optički predajnici u kombinaciji sa svojstvom elastičnosti identifikuju korisnički saobraćaj preko zaglavlja paketa, a zatim ga prevode u nekoliko optičkih putanja koje se razlikuju po zahtevanom broju slotova, brzini prenosa.

Statički TG-RSA problem može se rešavati ILP formulacijom ali samo za slučaj mreža manjih dimenzija i manji broj saobraćajnih zahteva. Do sada je u literaturi predloženo nekoliko ILP formulacija [54-57]. Za mreže realnih dimenzija, gde je veći broj čvorova i linkova kao i složeniji saobraćajni scenario, broj ograničenja se značajno povećava, pa nije moguće pronaći rešenje u prihvatljivom računarskom vremenu ili ga nije moguće uopšte pronaći. Zbog toga su razvijeni brojni heuristički algoritmi.

Dva heuristička algoritma zasnovana na grupisanju konekcija koje dele najdužu zajedničku rutu od izvornog čvora predstavljena su u [54]. Heuristike su nazvane *Least Spectrum Grooming* (LSG) i *Minimum Transmitter Grooming* (MTG). Prvim algoritmom minimizira se ukupan optički spektar u smislu ukupnog broja slotova zauzetih na svim linkovima mreže. Definisana je dobitak grupisanja koji se ogleda u smanjenju broja slotova potrebnih za zaštitni opseg. Što je dobitak grupisanja veći, veće su mogućnosti za grupisanje nekoliko konekcija koje imaju isti izvorni čvor. Drugi algoritam minimizira ukupan broj optičkih predajnika rezervisanjem spektra za optički tunel, odnosno posmatra maksimalni kapacitet predajnika. Rezultati su pokazali da na uštede u grupisanju utiču sledeći faktori: veličina zaštitnog opsega, kapacitet predajnika i veličina saobraćajnih zahteva. Takođe, pokazano je da MTG utiče na veću fragmentaciju opsega, pa je prilikom projektovanja mreže i određivanja potrebnog broja predajnika potrebno napraviti kompromis između ova dva cilja, tj. minimizacije zauzetih slotova i broja predajnika.

Heuristika kojom se grupišu *anycast* zahtevi ukoliko imaju bar jedan zajednički link prikazana je u [55] sa ciljem minimizacije maksimalnog indeksa slotova na svim linkovima mreže uz pretpostavku uspostavljanja svih konekcija. Razmatrane su mreže u kojima su čvorovi centri podataka, dok je grupisanje *multicast* zahteva zajedno sa RSA problemom razmatrano u [56, 57]. Razvijena je heuristika pod nazivom TG-MRSA (*Traffic Grooming-Multicast Routing and Spectrum Assignment*). Agregacija saobraćaja je primenjena na dva načina: prvo se pretražuju svi zahtevi koji imaju isti izvor i odredište, a zatim zahtevi koji imaju isti izvor i različite odredišne čvorove. Primenjeno je rutiranje po najkraćoj ruti i *first fit* princip dodele opsega, bez mogućnosti konverzije frekvencijskih slotova. Grupisanje se radi na zajedničkim linkovima ruta a funkcija cilja podrazumeva minimizaciju maksimalnog indeksa slotova svih *multicast* zahteva uz pretpostavku uspostavljanja svih konekcija. Rezultati pokazuju da su postignute značajne spektralne uštede i smanjenje broja IP rutera.

### 3.3.2. Dinamički TG-RSA algoritmi

Dinamički saobraćajni scenario sve češće se sreće u okosnicama mreža kao posledica učestalih varijacija intenziteta saobraćaja Internet servisa. Saobraćajni zahtevi se javljaju jedan za drugim u slučajnim vremenskim trenucima i imaju vremenski ograničeno (slučajno) trajanje, pri čemu se svi

saobraćajni zahtevi procesiraju u trenutku nailaska zahteva. U slučaju da u momentu nailaska zahteva broj frekvencijskih slotova na izabranoj ruti nije dovoljan, zahtev se odbija. Tipične kriterijumske funkcije u ovom scenariju odnose se na minimizaciju verovatnoće blokiranja zahteva i poboljšanje iskorišćenosti resursa mreže. Nove konekcije koje se javljaju u mreži pokušavaju se grupisati sa nekom od već uspostavljenih konekcija preko raspoloživog predajnika.

Do sada je predloženo nekoliko heurističkih algoritama za rešavanje TG-RSA problema u slučaju *online* saobraćajnog scenarija [23], [58-60]. U [23] predložena je *shared splitting* arhitektura čvorova koja omogućava postupak agregacije i algoritam FPA (*First Possible Aggregating*) za izvorno grupisanje konekcija. Algoritam funkcioniše po principu da se svaka nova konekcija u momentu nailaska grupiše sa nekom od već uspostavljenih u mreži ukoliko je to moguće. Vrš se provera kapaciteta predajnika i prvi raspoloživi predajnik koristi se za generisanje novih konekcija sa nekom od već uspostavljenih, jer dinamički prilagođava centralnu frekvenciju optičkom tunelu. Ukoliko takav predajnik nema dovoljno kapaciteta, konekcija se generiše preko drugog posebnog predajnika. Primenjeno je rutiranje sa  $k$ - alternativnih ruta i *first fit* princip dodele opsega. Kriterijum optimalnosti je maksimizacija iskorišćenosti predajnika odnosno minimizacija broja optičkih predajnika po svakom čvoru mreže. Paralelno je razmatrana i spektralna efikasnost.

Procesiranje zahteva u realnom vremenu, pogotovo za veće intenzitete saobraćaja, za posledicu ima veću verovatnoću blokiranja ukoliko se primenjuje rutiranje samo po jednoj ruti. Zbog toga je poželjno primeniti i rutiranje po višestrukim rutama, odnosno konekcije podeliti na više manjih konekcija koje se pojedinačno uspostavljaju preko različitih ruta. Međutim, razdvajanjem konekcija potreban je i zaštitni opseg za svaku pojedinačno, kao i veći broj predajnika što povećava ukupan potreban spektar i troškove. U rešavanju navedenog problema moguće je primeniti agregaciju saobraćaja. Predložena je u algoritmu MPTG (*Multipath Routing with Traffic Grooming*) u [58]. Konekcije su testirane na sledeći način: *shortest path first*- prvo se testiraju konekcije sa najkraćim rutama, *maximum usable bandwidth*- konekcije sa zahtevanim opsegom koji će zauzeti kapacitet predajnika, *largest spectrum savings*- na osnovu odnosa maksimalno ostvarene uštede spektra (u broju zaštitnih opsega) i ukupno potrebnog opsega za uspostavljanje konekcije. Krajnji cilj je minimizacija verovatnoće blokiranja i minimizacija broja optičkih predajnika, što je i postignuto.

Značaj agregacije saobraćaja u slučaju rutiranja po višestrukim putanjama prikazan je u [59] uz primenu koncepta pomoćnih grafova. Predložen je *Elastic Multi-path Provisioning Algorithm* (EMPA) ili algoritam sa elastičnim rutiranjem po višestrukim putanjama. Parametri pomoćnog grafa odnose se na gornju graničnu vrednost diferencijalnog kašnjenja signala i granularnost u segmentaciji propusnog opsega. Diferencijalno kašnjenje podrazumeva razliku vremena u slučaju uspostavljanja konekcije po najdužoj u odnosu na najkraću rutu. Pokazano je da se u poređenju sa rutiranjem po jednoj ruti, predloženim algoritmom može smanjiti verovatnoća blokiranja za 10-18 %.

Uspostavljanje elastičnih puteva svetlosti uz agregaciju saobraćaja i tzv. mini grid prikazano je u [60], gde je predložen algoritam MELT (*Multi-Hop Elastic Light-Trail*). Uveden je koncept elastične optičke putanje, tzv. *elastic light-trail* koja podrazumeva izvorno-određišni put svetlosti u kojem se odvija komunikacija između čvorova i razmena resursa. Sve nove konekcije koje se jave u mreži pokušavaju se prvo grupisati na postojeće *light-trail* putanje kojima se resursi dodavaju po potrebi. Cilj je maksimizacija spektralne efikasnosti na svim optičkim linkovima.

### 3.3.3. Optička agregacija i defragmentacija spektra

Dinamički saobraćajni scenario uzrokuje problem fragmentacije spektra, što značajno degradira performanse EON mreže. Fragmenti podrazumevaju delove spektra koji nakon postupka alokacije ostanu izolovani i ne mogu se upotrebiti za naredne zahteve jer ne ispunjavaju ograničenja susedstva



ili kontinuiteta. Prema tome, bez obzira na postojanje resursa može doći do blokade. Analiza i primeri dobre prakse u rešavanju ovog problema mogu se pronaći u [61].

U cilju rešavanja problema razvijaju se algoritmi defragmentacije (poznati u literaturi kao *fragmentation-aware*) kojima se vrši rerutiranje i/ili realokaciju frekvencijskih slotova. Nakon primenjene tehnike defragmentacije moguće je takve slotove grupisati sa nekom konekcijom i time smanjiti operativne troškove (OPEX, *Operational Expense*). Prvi algoritmi koji su se bavili ovim problemom predloženi su u [62]. Algoritmi defragmentacije generalno se mogu podeliti na reaktivne i proaktivne [63-66]. Proaktivni pristupi problem rešavaju u momentu nailaska zahteva dok se kod reaktivnih pristupa povremeno vrši defragmentacija celog opsega.

U postupak defragmentacije spektra može se inkorporirati i postupak agregacije saobraćaja, tj. grupisanja rekombinovanih slotova a sve u cilju što manje upotrebe spektra ili predajnika. Heuristički algoritam, pod nazivom *Distance-adaptive Fragmentation-aware Grooming* (DFG), koji rešava takav problem uzimajući u obzir i vrstu modulacije analiziran je u [67]. Grupisane konekcije su modulirane na isti način i definisan je dobitak grupisanja. Uvedeni su pojmovi spektralni profil i spektralni horizont. Prvi termin se odnosi na stanje iskorišćenosti spektra, a drugi na maksimalni indeks slota koji je zauzet na linkovima mreže. Kriterijumska funkcija podrazumeva minimizaciju ukupnog broja zauzetih slotova, odnosno minimizaciju ukupnog optičkog spektra.

Tehnika agregacije saobraćaja i defragmentacija spektra paralelno su razmatrane u [68] primenom koncepta pomoćnih grafova. Predloženim algoritmom TG-SE (*Traffic Grooming with Spectrum Engineering*) minimiziraju se operativni troškovi i povećava spektralna efikasnost primenom fleksibilnih BVT. Rezervacija spektra vrši se za svaku novu konekciju, a agregacija novih konekcija vrši se sa rekombinovanim slotovima (nakon postupka defragmentacije). Kojim prioritetom će se uspostavljati konekcije te primeniti tehnika agregacije zavisi od stanja mreže i ciljeva samog operatora (minimizacija potrebnog broja predajnika, maksimizacija spektralne efikasnosti, minimizacija verovatnoće blokiranja itd.). Primenom pomoćnih grafova vrši se podešavanje težina linkova. Težine linkova mogu se odnositi na minimizaciju novih uspostavljenih konekcija bez agregacije, ravnomernu raspodelu saobraćaja u mreži, minimizaciju ukupnog broja linkova potrebnih za uspostavljanje nove konekcije itd. Rezultati su pokazali značajno smanjenje operativnih troškova i poboljšanje spektralne efikasnosti.

### 3.3.4. Optička agregacija i energetska efikasnost

Povećanjem intenziteta saobraćaja povećava se i potrošnja energije u telekomunikacionim mrežama, pa se osim sistema velikog kapaciteta zahteva i energetska efikasan sistem. ITU preporuke za minimizaciju potrošnje energije u mrežama naredne generacije date su u [69]. Kao jedno od ključnih pitanja EON mreža, problem energetske efikasnosti razmatran je u [70-73], kako u fazi planiranja resursa (*offline*), tako i u fazi dodele opsega, odnosno dinamičkog scenarija. Da bi se smanjila potrošnja energije potrebno je smanjiti broj IP rutera i optičkih predajnika. U postizanju ovog cilja značajnu ulogu ima agregacija saobraćaja i u konceptu elastičnog optičkog umrežavanja razmatrana je u [74-77] a u literaturi se javlja pod nazivom "*green grooming*", a same mreže "*green EON*".

Heuristički algoritam GGA (*Green Grooming Algorithm*) sa ciljem minimizacije spektra i potrošnje energije predložen je u [74]. Agregacija konekcija izvršena je pomoću koncepta pomoćnih grafova podešavanjem težina logičkih linkova. Predložena su dva načina agregacije. U prvom slučaju, težine linkova odnose se na broj korišćenih podnosilaca a u drugom na potrošnju energije. Bitno je napomenuti da se potrošnja energije odnosi na ukupnu energiju koju troše predajnici, OXC i pojačavači. Ukupan broj optičkih pojačavača i BV-OXC uglavnom zavisi od broja čvorova i linkova kroz koje prolazi optička putanja. Predloženi algoritam je proširen dva puta: prvo u [75], gde je uzeta

u obzir i adaptivna modulacija i drugi put u [76] sa opcijom rezervacije spektra. U [75] je predloženim algoritmom DASRA (*Distance-Adaptive Spectrum Resource Allocation*) dokazano da tehnika agregacije saobraćaja u kombinaciji sa adaptivnom modulacijom smanjuje potrošnju energije pogotovo kada su u pitanju veliki intenziteti saobraćaja i mreže velikih dimenzija. Sve grupisane konekcije koriste istu vrstu modulacije i u zavisnosti od toga koliko vrsta modulacije se uzima u obzir toliko pomoćni graf ima slojeva. Povećanje spektralne efikasnosti omogućeno je primenom većih formata modulacije (16 QAM). Pošto dinamičko okruženje i varijacije saobraćaja izazivaju veliku fragmentaciju spektra, algoritam GGA je modifikovan u [76] sa mogućnošću rezervacije spektra kako bi se smanjila verovatnoća blokiranja zahteva. Definisana je granica koja se odnosi na maksimalni kapacitet optičke putanje i u skladu sa tom granicom vrši se rezervacija spektra. Za svaki frekvencijski slot uvedena su tri stanja: *zauzet*, *rezervisan* i *slobodan*. Pojavom novog zahteva u mreži vrši se ažuriranje pomoćnog grafa. Testiranjem algoritma na primerima velikih mreža dokazana je njegova efikasnost.

Minimizacija potrošnje energije, tj. broja IP rutera i BVT, uz mogućnost podešavanja predajnika i primenu tehnike agregacije saobraćaja analizirana je u [77]. Ispitivane su tri vrste optičkih predajnika u smislu prilagođavanja centralnoj frekvenciji dolaznog signala: elastični – gde se agregacija vrši samo na optičkom nivou, parcijalno elastični- gde se agregacija radi i na optičkom i na električnom nivou i fiksni- gde se agregacija radi na električnom nivou. Za svaki predajnik definisan je ILP model i heuristički algoritam. S obzirom da je paralelno sa agregacijom na optičkom nivou posmatrana i agregacija na električnom nivou, predložena su dva algoritma: MOLG (*Maximize Optical Layer Grooming*) i MELG (*Maximize Electrical Layer Grooming*). Pretpostavka je da se sve konekcije mogu uspostaviti u mreži a prioritet su konekcije velikog intenziteta. Rezultati su pokazali da optička agregacija donosi značajne uštede u potrošnji energije, ali da uštede u potrošnji energije ne rastu linearno sa povećanjem podesivosti predajnika. Agregacija na električnom nivou ne treba biti u potpunosti isključena odnosno potrebno je kombinovati agregaciju saobraćaja na optičko-električnom nivou.

Genetski algoritam EE-RMSA (*Energy-Efficient Routing Modulation and Spectrum Allocation*) sa ciljem minimizacije potrošnje energije i verovatnoće blokiranja zahteva, a u kojem je primenjena agregacija konekcija direktno na optičkom nivou zajedno sa RSA postupkom predložen je u [78]. Adaptivna modulacija i agregacija saobraćaja razmatrane su paralelno. Za svaku konekciju pretpostavljene su četiri vrste modulacije (BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM) a RMSA problem je rešavan pomoću genetskih operatora selekcije, ukrštanja i mutacije. Model potrošnje energije je definisan za sve komponente koje su glavni potrošači energije: optički predajnici (SBVT), kros-konektori (BV-OXC) i optički pojačavači (EDFA). Njihovim kumulativnim sabiranjem dobija se ukupna potrošnja energije, odnosno vrednost fitnes funkcije, a u svakoj iteraciji se memoriše minimalna vrednost. Rezultati predloženog algoritma su ukazali na prednosti tehnike agregacije saobraćaja u postupku minimizacije potrošnje energije, tj. postizanja maksimalne energetske efikasnosti.

Energetski efikasne ili u literaturi poznate kao „zelene (*green*)“ EON mreže su takođe analizirane i u [79], gde su autori predstavili dvofazni algoritam u kojem se u prvoj fazi rešava RSA problem i agregacija saobraćaja (RGO, *Routing, Grooming and Ordering*), a u drugoj fazi pitanje energetske efikasnosti i kvaliteta servisa modelovanjem parametara predajnika, kao što su optička snaga, vrsta modulacije, broj podnosilaca, način kodovanja itd. (TPA, *Transponder Parameter Assignment*). Definisani su ILP modeli za TG-RSA problem kao i heuristika za složeniji tip mreža.

Konačno, može se zaključiti da se primenom agregacije saobraćaja značajno utiče na povećanje energetske efikasnosti.

### 3.3.5. Optička agregacija i oporavak mreže u slučaju otkaza

Optičkim transportnim mrežama prenosi se ogroman obim saobraćaja pa svaki otkaz jedne ili više komponenata narušava rad mreže, što za posledicu ima nezadovoljstvo korisnika servisa i time smanjen prihod telekom operatora. Sposobnost mreže da nastavi sa radom nakon otkaza naziva se oporavak mreže. Iz tog razloga, telekom operatori moraju osigurati, pored brzine pristupa, i raspoloživost servisa koje nudi mreža. Raspodela rezervnih resursa u slučaju otkaza vrši se preko metoda zaštite i obnavljanja. Kod metoda zaštite rezervni putevi (*backup paths*) su unapred izračunati a kod metoda obnavljanja zaštitni resursi se traže nakon pojave otkaza u mreži, odnosno po potrebi.

Oporavak mreže nakon otkaza i vreme oporavka jedno je od suštinskih pitanja koje se rešava u EON mrežama i kombinuje sa rešavanjem RSA problema. U zavisnosti od toga da li se rezervne rute proračunavaju trenutno ili unapred, razlikuju se proaktivni i reaktivni pristup oporavka mreže [80-85]. Određena otvorena pitanja vezana za oporavak EON mreža mogu se pronaći u [86].

U cilju unapređenja spektralne efikasnosti, tehnika agregacije saobraćaja primenjuje se u procesu oporavka mreže (*survivable traffic grooming*) u smislu grupisanja primarnih, ali i rezervnih ruta. S tim u vezi, predložen je algoritam ESPAC (*Elastic, Separate-Protection-at-Connection*) [87] kojim se na nivou konekcije omogućava zaštita s kraja na kraj (*ent-to-end*) i vrši grupisanje spektralnih resursa između rezervnih ruta u slučaju otkaza na jednom linku. To znači da ako dve konekcije imaju rezervne rute sa zajedničkim linkovima moguće je izvršiti grupisanje ukoliko su u pitanju susedne frekvencije. Za primarne rute primenjen je *first fit* princip alokacije opsega, dok je za rezervne primenjen *last fit*. Da bi se kvantitativno analizirale performanse algoritma korišćena je verovatnoća blokiranja zahteva i uticaj dva parametra: broj slotova koji su korišćeni na primarnim rutama i broj slotova koji se preklapaju sa rezervnim rutama. Rezultati su pokazali značajne spektralne uštede.

Pronalazak primarnih ruta, pa prebacivanje na rezervne u slučaju otkaza pojedinih elemenata mreže može dovesti do komplikovanih procedura, kao i dužeg vremena potrebnog za uspostavljanje putanja nakon otkaza i nastavak funkcionisanja mreže. Iz tog razloga primenjuje se metod zaštite poznat pod nazivom *p*-ciklusi (*pre-configured cycles*), kojim se osigurava kraće vreme uspostave optičkih putanja nakon otkaza jer su *p*-ciklusi unapred kros-konektovani. Čvorovi se povezuju u zaštitne prstene i time se ostvaruje zaštita veza koje su deo prstena (*on-cycle links*). Detaljnije o zaštiti zasnovanoj na *p*-ciklusima može se pronaći u [84], [85], [88].

Agregacija *p*-ciklusa predstavljena je u [89], gde je razvijen algoritam SCGP (*Shared p-Cycle Grooming Protection*) sa ciljem ostvarivanja zaštite u slučaju otkaza i energetske efikasnosti. U ovom algoritmu grupišu se konekcije koje pripadaju istim *p*-ciklusima i imaju zajedničke linkove. Prioritet u uspostavljanju konekcija imaju one konekcije sa većim brojem zahtevanih frekvencijskih slotova zbog čega i jesu sortirane po opadajućem redosledu prilikom ispitivanja. Tehnika agregacije *p*-ciklusa takođe je ratmatrana i u [90], gde je razvijen heuristički algoritam SBPGP (*Shared Backup Path Grooming Protection*) sa paralelnim ciljem zaštite u slučaju otkaza i energetske efikasnosti. Kontrolna i ravan podataka posmatrane su odvojeno (softverski definisane mreže). Za svaki zahtevani put svetlosti primenjena je agregacija konekcija po primarnim i rezervnim rutama sa nekim od već uspostavljenih puteva svetlosti. Agregacija je obuhvatala četiri moguća scenarija, i to: isti izvorni i odredišni čvor, isti izvorni a različit odredišni čvor, različit izvorni a isti odredišni čvor i različit izvorni i odredišni čvor. Postupak grupisanja se odnosio na ravan podataka (kada se otkaz dogodi u ravni podataka), kao i simulacije vezane za ispitivanje potrošnje energije. Prilikom sprovođenja simulacija ispitivana je verovatnoća blokiranja zahteva, iskorišćenost spektra i ukupni troškovi predajnika uspostavljanjem svih konekcija. Rezultati su pokazali da se predloženim algoritmom sa primenom postupka agregacije mogu ostvariti uštede spektralnih resursa. Resursi se mogu upotrebiti za naredne zahteve koji se javu u mreži.

U prethodno navedenim algoritmima tehnika agregacije saobraćaja primenjuje se zbog uštede optičkog spektra i optičkih predajnika. Na taj način obezbeđuje se više resursa za uspostavljanje novih dolazećih konekcija, kao i više resursa koji se mogu raspodeliti kao rezervni u slučaju da dođe do otkaza. Operator na takav način obezbeđuje veću raspoloživost mreže.

### 3.4. Osvrt na dosadašnja i pravci daljih istraživanja

Prethodno analizirana istraživanja vezana za efekte primene konverzije talasnih dužina u WRON mrežama pokazuju da konverzija talasnih dužina ima značajan uticaj na unapređenje performansi mreže. Poboľjšanja performansi koja se mogu postići primenom konvertora zavise od niza različitih faktora, među kojima su najznačajniji topologija mreže (posebno veličina i stepen povezanosti mreže), broj talasnih dužina po vlaknu, broj optičkih vlakana po linku, saobraćajni scenario, primenjeni algoritmi rutiranja i dodele talasnih dužina itd. [32].

Primenom proređene (SWC) konverzije talasnih dužina u mreži, mogu se postići približno iste performanse kao i u slučaju primene konverzije talasnih dužina u svim čvorovima mreže. Prema tome, jedno od suštinskih pitanja koje se nameće pri dizajniranju WRON mreža, odnosi se na rešavanje problema određivanja minimalnog broja konvertora kao i izbora optimalnih lokacija čvorova u kojima konvertori talasnih dužina treba da budu implementirani. Pravci daljih istraživanja usmereni su na problematiku konverzije frekvencijskih slotova.

U tabeli 3.1. dat je sistematizovan pregled TG-RSA algoritama sa kriterijumskim funkcijama i saobraćajnim scenarijom [91]. U svim navedenim algoritmima agregacija saobraćaja primenjena je uglavnom na optičkom nivou, a efikasnost tehnike je dokazana kako za primenu u fazi planiranja i dimenzionisanja mreže, tako i u fazi operativnog rada mreže, odnosno dinamičkog okruženja.

Značajan uticaj na efekte agregacije konekcija imaju sledeći parametri:

- granularnost zahteva,
- veličina zaštitnog opsega i
- kapacitet predajnika definisan maksimalnim brojem frekvencijskih slotova.

Konekcije koje zahtevaju više frekvencijskih slotova imaju manju mogućnost da budu grupisane sa nekim drugim konekcijama, pa su u tom slučaju manje i uštede. Agregacija konekcija je uvek neophodna kada je definisan veći zaštitni opseg, veliki kapacitet predajnika i konekcije manjeg intenziteta. Primena tehnike agregacije podrazumeva procenu najboljih uslova i pronalazak kompromisnih rešenja koja prvenstveno zavise od primarnih ciljeva operatora. Npr. tamo gde su manji intenziteti saobraćaja, spektralna efikasnost i blokiranje zahteva ne predstavljaju problem, pa se može razmatrati i energetska efikasnost. Za slučaj velikih intenziteta saobraćaja, spektralna efikasnost i blokiranje zahteva direktno utiču na profit operatora, pa je njihovo rešavanje prioritet. Takođe, istraživanja su pokazala da u periodu migracije ka EON mrežama ne treba zanemariti ni mogućnost kombinacije električne i optičke agregacije konekcija i porediti efekte sa tehnološkim aspekta.

U literaturi su istraživanja vezana za rešavanje RSA i TG-RSA problema uglavnom zasnovana na tome da se podela optičkog spektra vrši na frekvencijske slotove jednake veličine. Pitanje koje bi bilo potrebno analizirati u budućim istraživanjima odnosi se na podelu optičkog spektra na frekvencijske slotove različite veličine. U tom smislu, potrebno je analizirati efekte takve podele na spektralne uštede, fragmentaciju spektra, kao i na iskorišćenost predajnika. S obzirom na dinamiku i promene u Internet okruženju, kao predmet budućih istraživanja biće potrebno razvijati modele za dinamičko

rutiranje, alokaciju spektra i agregaciju saobraćaja, odnosno modele u kojima se vrši procesiranje zahteva u realnom vremenu.

Tabela 3.1. Pregled analiziranih TG-RSA algoritama

Algoritam	Kriterijumska funkcija/Cilj	Saobraćajni scenario
LSG [54]	Minimizacija ukupnog optičkog spektra	statički
MTG [54]	Minimizacija broja optičkih predajnika	statički
Anycast-single-DC [55]	Minimizacija maksimalnog indeksa slotova	statički
TG-MRSA [56, 57]	Minimizacija maksimalnog indeksa slotova	statički
FPA [23]	Minimizacija spektra i broja optičkih predajnika	dinamički
MPTG [58]	Minimizacija verovatnoće blokiranja i broja BVT	dinamički
EMPA [59]	Minimizacija verovatnoće blokiranja	dinamički
MELT [60]	Maksimizacija spektralne efikasnosti na optičkim linkovima	dinamički
DFG [67]	Minimizacija ukupnog optičkog spektra	statički
TG-SE [68]	Maksimizacija spektralne efikasnosti i minimizacija operativnih troškova	dinamički
GGA [74]	Minimizacija potrošnje energije	dinamički
GGA + DASRA [75]	Minimizacija spektra i potrošnje energije	dinamički
GGA sa rezervacijom spektra [76]	Minimizacija spektra i potrošnje energije	dinamički
MOLG/MELG [77]	Minimizacija potrošnje energije	statički
EE-RMSA [78]	Minimizacija potrošnje energije	statički
RGO/TPA [79]	Maksimizacija energetske efikasnosti i QoS	statički/dinamički
ESPAC [87]	Maksimizacija spektralne efikasnosti i zaštita u slučaju otkaza mreže	dinamički
SCGP [89]	Zaštita u slučaju otkaza i minimizacija broja BVT	statički
SBPGP [90]	Zaštita u slučaju otkaza, minimizacija spektra i broja BVT	dinamički

Analizom predloženih metoda i algoritama iz literature može se primetiti da se problem agregacije saobraćaja uvodi kao sastavni deo u rešavanju drugih krucijalnih pitanja EON mreža i to:

- prilikom rešavanja fragmentacije spektra, grupisanjem slotova koji su defragmentovani, odnosno gde je urađena realokacija,
- prilikom rešavanja pitanja potrošnje energije, jer manji broj zaštitnih opsega i BVT znači i manju potrošnje energije,
- prilikom rešavanja pitanja zaštite mreže u slučaju otkaza, grupisanjem primarnih i rezervnih pitanja kako bi se ostvarila ušteda i obezbedilo dovoljno resursa koji će se koristiti kao rezervni u slučaju otkaza kao i za uspostavljanje novih konekcija.

### 3.4. Metaheuristike i optičko umrežavanje

Problemi konverzije talasnih dužina/frekvencijskih slotova, rutiranja i alokacije spektra zajedno sa agregacijom saobraćaja, kao deo procesa planiranja optičkih mreža uglavnom se rešavaju heurističkim algoritmima za mreže i saobraćaj realnih dimenzija, uz ILP modele za mreže manjih dimenzija. Heuristike pripadaju grupi stohastičkih algoritama jer se bar u jednom delu u toku izvršavanja, određene odluke donose slučajnim odabirom. Omogućavaju pronalazak dovoljno dobrog rešenja problema u relativno kratkom vremenu, ali su specifične za rešavanje jednog određenog tipa problema.

Za razliku od heuristika koje rešavaju određenu vrstu problema algoritmima delimične pretrage, metaheuristike su globalne metode optimizacije, koje pretražuju veliki skup dopustivih rešenja i

uobičajeno dolaze do boljeg rešenja od klasičnih heuristika [92]. S obzirom da su metaheuristički pristupi uspešno primenjeni u rešavanju RSA problema [93-97], a problem optičke agregacije saobraćaja takođe pripada grupi teških kombinatornih optimizacionih problema, rešenja je neophodno tražiti metaheurističkim pristupom. Generalno, metaheuristike se mogu podeliti prema [98, 99]:

- poreklu- metaheuristike inspirisane procesima u prirodi (evolucionim procesima, kolonije insekata itd.) ili na osnovu matematičkih principa (tabu pretraživanje itd.).
- broju rešenja- metaheuristike bazirane na jednom rešenju (simulirano kaljenje, iterativna lokalna pretraga itd.) i populacione metaheuristike (genetski algoritmi, optimizacija kolonijom pčela, optimizacija kolonijom mrava itd.), koje podrazumevaju generisanje više potencijalnih rešenja populacije.
- načinu odlučivanja u procesu pretrage- deterministički ili stohastički način donošenja odluke.
- načinu generisanja rešenja - konstruktivni pristup ili sa poboljšanjima.

Osim često primenjenih metoda, kao što su genetski algoritmi, optimizacija kolonijom čestica, tabu pretraživanje i sl., u novije vreme su aktuelne metaheuristike zasnovane na principima kolektivne inteligencije (SI, *Swarm Intelligence*). Kolektivna inteligencija pripada oblasti veštačke inteligencije (AI, *Artificial Intelligence*) i može se definisati kao kolektivno ponašanje, odnosno sposobnost grupe za kooperativnim pronalaskom boljih rešenja od njenih pojedinačnih članova, tzv. agenata. Jedna od takvih metoda, metaheuristika Optimizacija kolonijom pčela (BCO, *Bee Colony Optimization*), koju su razvili Lučić i Teodorović, zasnovana je na konceptu kolektivne inteligencije kolonije socijalnih pčela [100]. Pripada grupi populacionih metaheuristika, gde veštačke pčele pretražuju prostor dopustivih rešenja (diskretan ili kontinualan) s ciljem pronalaska optimalnog rešenja. Nekoliko studija je pokazalo da je metaheuristika brz i efikasan alat globalne optimizacije koji daje visoko kvalitetna rešenja uz malu računarsku složenost [100-102].

Metaheuristika je u oblasti telekomunikacija do sada uspešno primenjena za rešavanje RWA problema [103, 104] sa ciljem maksimizacije uspostavljenih puteva svetlosti i izbor lokacije konvertora talasnih dužina, respektivno. Nedavno je primenjena i za rešavanje RSA problema [105], gde je vršena minimizacija zauzetih slotova po linkovima mreže, uz pretpostavku uspostavljanja svih konekcija u mreži. Kao rezultat istraživanja problema optičke agregacije saobraćaja, u ovoj disertaciji je, inspirisan prethodnim uspešnim primenama ove metaheuristike u oblasti optičkog umrežavanja, razvijen originalni algoritam za rešavanje statičkog TG-RSA problema. Pokazano je da algoritam može efikasno da rešava problem optičke agregacije u mrežama realnih dimenzija, za složene saobraćajne scenarije, kao i da se njegovom primenom mogu ostvariti značajne spektralne uštede.

Optimizacija performansi optičkih WDM mreža agregacijom saobraćaja i konverzijom talasnih dužina

---

4.

**ODREĐIVANJE OPTIMALNIH LOKACIJA  
ČVOROVA SA KONVERZIJOM TALASNIH  
DUŽINA U OPTIČKIM TRANSPORTNIM  
MREŽAMA**

---

## 4. ODREĐIVANJE OPTIMALNIH LOKACIJA ČVOROVA SA KONVERZIJOM TALASNIH DUŽINA U OPTIČKIM TRANSPORTNIM MREŽAMA

Komunikacija u WRON mrežama funkcioniše po principu uspostavljanja puteva svetlosti ili optičkih putanja. Uspostavljanje puteva svetlosti podrazumeva objedinjeno ili odvojeno rešavanje problema rutiranja i dodele talasnih dužina. To znači da se RWA problem može podeliti na dva problema:

- pronalazak odgovarajuće rute duž koje će put svetlosti biti uspostavljen, i
- dodela odgovarajuće talasne dužine izabranoj ruti.

Prilikom rešavanja RWA problema potrebno je zadovoljiti ograničenja kontinuiteta i različitosti talasnih dužina. Ograničenje kontinuiteta talasne dužine podrazumeva da put svetlosti na svim linkovima duž izabrane rute od izvornog do odredišnog čvora mora koristiti istu talasnu dužinu. Ovo ograničenje je neophodno zadovoljiti kada se u optičkoj mreži ne koriste konvertori talasnih dužina, što je često slučaj zbog tehnoloških i ekonomskih razloga [106]. Ograničenje različitosti talasnih dužina podrazumeva da dva puta svetlosti koja koriste bar jedan zajednički fizički link moraju imati različite dodeljene talasne dužine [106]. Navedena ograničenja značajno degradiraju performanse mreže i utiču na povećanu verovatnoću blokiranja zahteva. Konvertori talasnih dužina omogućavaju da se putevi svetlosti mogu uspostaviti korišćenjem različitih talasnih dužina na pojedinim linkovima duž izabrane rute. Na taj način se postiže manja verovatnoća blokiranja zahteva i efikasnije korišćenje raspoloživih resursa odnosno talasnih dužina u optičkoj WDM mreži. Prema tome, u fazi planiranja i dizajna WRON mreža, važno je određivanje minimalnog broja konvertora, kao i izbora optimalnih lokacija čvorova u kojima konvertori talasnih dužina treba da budu implementirani [32].

Konvertor talasnih dužina je uređaj koji ima funkciju da talasnu dužinu ulaznog optičkog signala konvertuje u neku drugu talasnu dužinu na svom izlazu [32]. Idealan konvertor talasnih dužina mora da poseduje transparentnost u pogledu binarnih protoka i formata signala, da može da se brzo podesi na željenu (konvertovanu) talasnu dužinu, da može da obavlja konverziju i na više i na niže talasne dužine, da ima mogućnost da ulazni i izlazni signal imaju iste talasne dužine, da zadržava srednje nivoe ulazne snage, da bude neosetljiv na polarizaciju ulaznog signala, da ima veliki odnos signal/šum i da se lako implementira [32-34].

### 4.1. Određivanje verovatnoće blokiranja i optimalnih lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina

#### 4.1.1. Osnovni koncept metaheuristike BCO

Metaheuristiku nazvanu Optimizacija kolonijom pčela za rešavanje problema kombinatorne optimizacije razvili su Lučić i Teodorović [100]. Metaheuristika podrazumeva postojanje grupe individua (agenata) čije su ponašanje i moguće interakcije precizno definisani [101, 102]. Agenti-veštačke pčele međusobno sarađuju u cilju rešavanja problema. Na početku procesa traganja za optimalnim rešenjem sve veštačke pčele se nalaze u košnici. Problem se rešava u etapama. Tokom procesa traganja, veštačke pčele imaju direktnu međusobnu komunikaciju. Pčele dodaju komponente rešenja postojećem parcijalnom rešenju sve dok ne stvore jedno ili više dopustivih rešenja. Proces traganja za optimalnim rešenjem je sastavljen od iteracija. Prva iteracija se završava kada pčele prvi put generišu jedno ili više dopustivih rešenja. Najbolje dopustivo rešenje otkriveno u prvoj iteraciji



se pamti i onda počinje druga iteracija. Tokom druge iteracije pčele ponovo konstruišu dopustiva rešenja itd. Broj iteracija se zadaje unapred [101, 102]. Detaljan opis osnovnog koncepta metaheuristike BCO, proces traganja za optimalnim rešenjem, kreiranje parcijalnih rešenja, poređenje, regrutovanje pčela, pseudo kod i primena iste, mogu se pronaći u [100-102], [107].

#### 4.1.2. Algoritam za određivanje optimalnih lokacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina

Za rešavanje problema izbora lokacija ograničenog broja čvorova sa konverzijom talasnih dužina primenom BCO metaheuristike, predložen je BCO-WCP (WCP, *Wavelength Converter Placement*) algoritam [104]. Za scenario sa SWC konvertorima problem se može formulisati na sledeći način: za dati broj konvertora sa potpunim stepenom konverzije, poznate saobraćajne zahteve i datu topologiju mreže potrebno je odrediti koje od čvorova mreže treba opremiti sa konvertorima tako da se minimizira verovatnoća blokiranja zahteva na nivou cele mreže. Cilj sprovedenih istraživanja je analiziranje efikasnosti primene konverzije talasnih dužina i navedenog algoritma, tj. ispitivanje da li se potencijalnom implementacijom konvertora talasnih dužina može postići smanjenje verovatnoće blokiranja zahteva, zatim definisanje uticajnih faktora na vrednosti pojedinih rezultata. U predloženom algoritmu početno rešenje za svaku pčelu generiše se slučajno ( $K$  konvertora talasnih dužina u mreži) ili primenom neke od poznatih heuristika.

Pčele vrše modifikaciju rešenja kroz prolaze unapred i unazad tokom iteracije. Modifikacija rešenja vrši se zamenom određenih lokacija konvertora (čvorova) u odnosu na prethodno rešenje. Broj konvertora (čvorova) koji se menja u svakom prolazu unapred specificira se na početku algoritma. Na taj način se određeni čvorovi mreže izbacuju iz trenutnog rešenja. Nove lokacije konvertora pronalaze se na osnovu koristi čvora,  $V_i$ , koja je definisana na sledeći način [104]:

$$V_i = \frac{T_i}{\max_i T_i}, i = 1, 2, \dots, N \quad (4.1)$$

gde je  $T_i$  ukupan tranzitni saobraćaj kroz čvor  $i$ . Čvorovi sa većim tranzitnim saobraćajem imaju veću korist.

Verovatnoća izbora čvora,  $p_i$ , računa se na sledeći način [104]:

$$p_i = \frac{V_i}{\sum_{j=1}^J V_j}, i = 1, 2, \dots, N \quad (4.2)$$

gde je  $J$  broj čvorova koji nisu uključeni u rešenje a  $N$  broj čvorova mreže. Da bi se donela odluka o izboru čvora, na slučajan način se generiše broj iz intervala  $[0, 1]$ . Na osnovu izračunate verovatnoće  $p_i$  i vrednosti ovog broja pčela donosi odluku o izboru odgovarajućeg čvora. Nakon generisanja parcijalnih rešenja, pčele vrše poređenje kvaliteta rešenja na osnovu vrednosti kriterijumske funkcije (verovatnoće blokiranja) te vrše regrutovanje. Što je veća verovatnoća blokiranja postignuta od strane određene pčele, manje su šanse da će pčela da leti po istoj putanji u narednom prolazu unapred. Procedura se završava kada se postigne unapred zadati maksimalni broj iteracija a ukupan broj prolaza unapred i unazad do pronalaska optimalnog rešenja određuje efikasnost algoritma.

## 4.2. Numerički eksperimenti- poređenje rezultata BCO-WCP algoritma sa egzaktnim i heurističkim rešenjima

U cilju ispitivanja efikasnosti algoritma i njegove primene, rezultati za lokacije konvertora i vrednosti verovatnoće blokiranja prvo su upoređeni sa optimalnim rešenjima dobijenim egzaktnom metodom,

a zatim sa nekoliko heurističkih rešenja. Nakon toga, izvršen je prikaz i analiza rezultata rešavanja problema konverzije dobijenih primenom metaheuristike BCO na različitim topologijama mreža. Izdvojeni su faktori koji najviše utiču na verovatnoću blokiranja. Za potrebe određivanja rešenja korišćeni su programski kodovi razvijeni u Matlabu, a simulacije su sprovedene korišćenjem *Intel(R) i5* računarskog procesora na 3.2 GHz i 8 GB RAM-a.

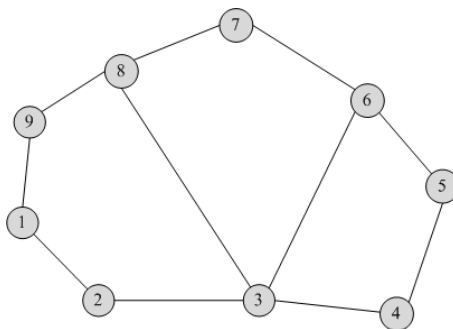
Za sve sprovedene simulacije, ulazni parametri podrazumevaju sledeće:

- Optička mreža se posmatra kao graf  $G = (N, L)$  gde je  $N$  broj čvorova,  $L$  broj linkova mreže;
- Za svaki smer prenosa predviđeno je jedno optičko vlakno;
- Isti broj raspoloživih talasnih dužina ( $W_{max}$ ) na svim linkovima mreže;
- Vrednosti intenziteta saobraćajnih zahteva između pojedinih parova čvorova u mreži,  $\lambda_{sd}$ , definisani su brojem zahtevanih puteva svetlosti u jedinici vremena;
- Specifiran broj raspoloživih konvertora ( $K$ ) sa potpunim stepenom konverzije;
- Za određivanje najkraćih ruta primenjen je *Dijkstra* algoritam;
- BCO parametri (broj pčela, letova unapred i unazad, broj iteracija).

Izlaz: Optimalne lokacije konvertora talasnih dužina (čvorovi mreže) i vrednosti verovatnoće blokiranja na nivou cele mreže.

Cilj: Minimizacija verovatnoće blokiranja zahteva.

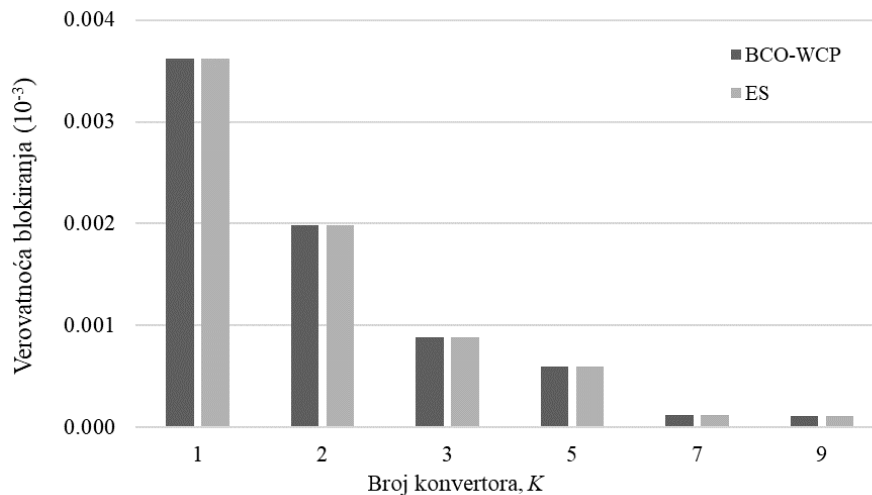
Za potrebe određivanja optimalnog rešenja korišćen je egzaktni metod iscrpljujućeg pretraživanja (ES, *Exhaustive Search*) svih mogućih kombinacija čvorova sa konverzijom talasnih dužina. Za optimalno rešenje se uzima ona kombinacija koja daje najmanju verovatnoću blokiranja zahteva. Međutim, zbog velike složenosti i zahtevanog računarskog vremena, ne može se primeniti na mrežama velikih dimenzija. Testiranja su sprovedena na primeru manje mreže sa 9 čvorova i 11 linkova (N1), čija je topologija prikazana na slici 4.1. Testirani scenario podrazumeva maksimalno  $W_{max} = 8$  talasnih dužina, saobraćaj  $\lambda_{sd} = 0.1$  i broj pčela  $B = 10$ .



Slika 4.1. Topologija posmatrane optičke mreže- N1

Na osnovu rezultata sa slike 4.2. može se primetiti da se vrednosti verovatnoće blokiranja za dati broj konvertora talasnih dužina poklapaju sa rešenjima dobijenim primenom egzaktnog metoda, ES, što znači da se primenom predloženog algoritma mogu postići kvalitetna rešenja. Vrednosti verovatnoće blokiranja za veći broj konvertora ( $K = 5, 7, 9$ ) ne menjaju se značajno.

Lokacije čvorova u kojima konvertori talasnih dužina trebaju biti implementirani prikazane su u tabeli 4.1. Lokacije konvertora dobijene primenom metaheuristike BCO podudaraju se sa lokacijama dobijenim egzaktnim metodom.



Slika 4.2. Poređenje rezultata BCO-WCP i ES metoda

Tabela 4.1. Optimalne lokacije konvertora za mrežu N1 (poređenje sa ES)

$K$	BCO-WCP	ES
	$\lambda_{sd} = 0.1; W_{max} = 8$	
1	3	3
2	3, 7	3, 7
3	3, 7, 8	3, 7, 8
5	2, 3, 5, 7, 8	2, 3, 5, 7, 8
7	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

Zatim su na primeru iste mreže i za isti saobraćajni scenario, rešenja upoređena sa tri heuristike u kojima se redosled lokacija čvorova sa konvertorima određuje na osnovu težina koje se dodeljuju pojedinim čvorovima, i to:

- Heuristika 1 ( $H_1$ )- sortira čvorove prema vrednosti tranzitnog saobraćaja,
- Heuristika 2 ( $H_2$ )- težine čvorova određuju se na osnovu broja putanja koje prolaze kroz taj čvor (*path- based index heuristic*),
- Heuristika 3 ( $H_3$ )- težine čvorova određuju se na osnovu sume dužina putanja svih izvorno-odredišnih putanja koje prolaze kroz taj čvor (*path- length- based index heuristic*).

Rezultati prikazani u tabeli 4.2. pokazuju da je verovatnoća blokiranja zahteva dobijena primenom BCO-WCP algoritma, za dati broj konvertora talasnih dužina, manja u odnosu na vrednosti verovatnoća blokiranja dobijenih primenom navedenih heuristika. To potvrđuje činjenicu da metaheuristički pristup daje bolje rezultate u odnosu na heuristička rešenja. Takođe, može se primetiti da lokacija konvertora značajno menja vrednosti verovatnoće blokiranja.

Tabela 4.2 Poređenje rezultata za verovatnoću blokiranja, mreža N1

$K$	BCO-WCP	$H_1$	$H_2$	$H_3$
	$\lambda_{sd} = 0.1; W_{max} = 8$			
1	$3.62 \times 10^{-06}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$3.62 \times 10^{-06}$
2	$1.98 \times 10^{-06}$	$2.78 \times 10^{-02}$	$2.78 \times 10^{-02}$	$2.78 \times 10^{-02}$
3	$8.87 \times 10^{-07}$	$4.17 \times 10^{-02}$	$2.78 \times 10^{-02}$	$2.78 \times 10^{-02}$
5	$5.97 \times 10^{-07}$	$4.17 \times 10^{-02}$	$4.17 \times 10^{-02}$	$4.17 \times 10^{-02}$
7	$1.21 \times 10^{-07}$	$4.17 \times 10^{-02}$	$4.17 \times 10^{-02}$	$1.39 \times 10^{-02}$
9	$1.09 \times 10^{-07}$	$1.09 \times 10^{-07}$	$1.09 \times 10^{-07}$	$1.09 \times 10^{-07}$

Optimalne lokacije konvertora talasnih dužina dobijene primenom metaheuristike BCO i heurističkim metodama prikazane su u tabeli 4.3. Rezultati pokazuju da se lokacije konvertora dobijene metaheuristikom razlikuju za skoro sve vrednosti  $K$ , zbog čega se razlikuju i verovatnoće blokiranja zahteva.

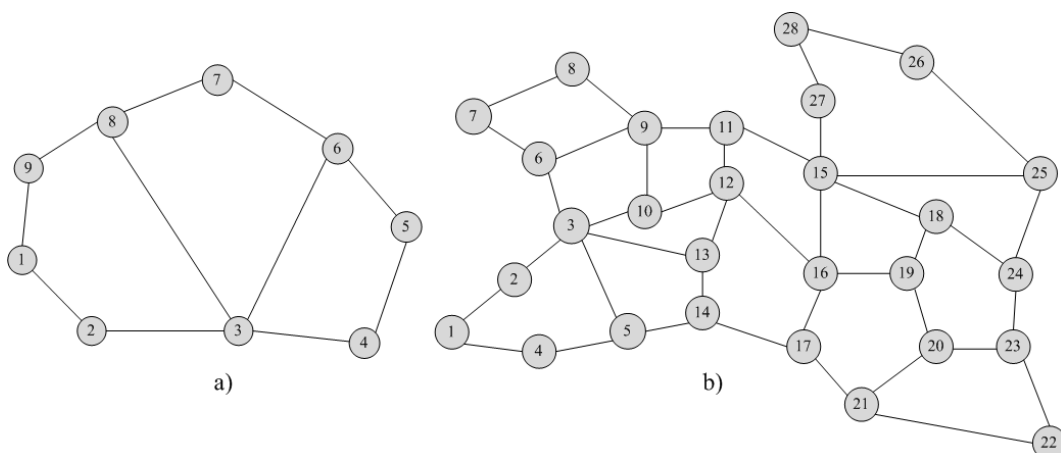
Tabela 4.3. Optimalne lokacije konvertora za mrežu N1 (poređenje sa heuristikama)

$K$	BCO-WCP	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>
		$\lambda_{sd} = 0.1; W_{max} = 8$		
1	3	3	3	3
2	3, 7	3, 8	3, 8	3, 8
3	3, 7, 8	3, 6, 8	2, 3, 8	2, 3, 8
5	2, 3, 5, 7, 8	2, 3, 4, 6, 8	2, 3, 4, 6, 8	2, 3, 4, 6, 8
7	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	1, 2, 3, 4, 6, 8, 9	1, 2, 3, 4, 6, 8, 9	2, 3, 4, 6, 7, 8, 9
9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

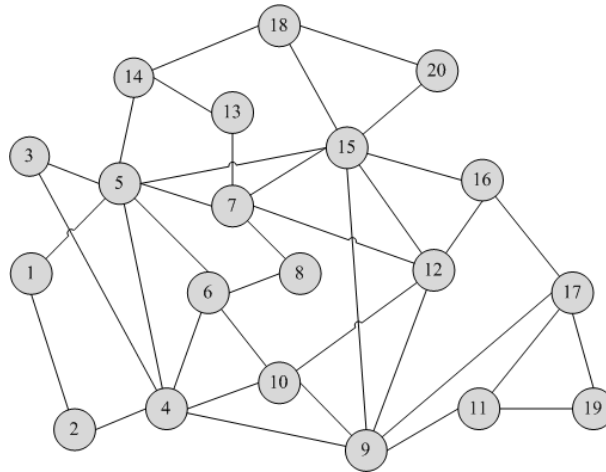
### 4.3. Numerički eksperimenti- analiza rezultata BCO-WCP algoritma

U cilju ispitivanja efikasnosti BCO-WCP algoritma i njegove primene u fazi planiranja mreže, određivanja verovatnoća blokiranja i lokacija konvertora talasnih dužina, kao i određenih uticajnih faktora na vrednosti pojedinih rezultata, sprovedena su testiranja na primeru prethodno navedene manje mreže sa 9 čvorova i 11 linkova (N1), EON (*European Optical Network*) mreže sa 19 čvorova i 39 linkova (EON-19) i EON mreže sa 28 čvorova i 39 linkova (EON-28). Navedene mreže su uzete kao primer da bi se ispitalo kako veličina mreže u smislu broja čvorova (topologije na slici 4.3) i stepen povezanosti mreže (topologija na slici 4.4.) utiču na rezultate. Gama indeks mreže ( $\gamma$  indeks) definiše se kao odnos broja linkova u mreži i maksimalnog broja linkova i određuje koliko je mreža povezana u odnosu na maksimalnu povezanost ( $\gamma = L/L_{max}$ ). Za mrežu EON-19 povezanost iznosi 76 % a za mrežu EON-28 iznosi 50 %.

Testiranja su izvršena za različit broj konvertora sa potpunim stepenom konverzije i tri saobraćajna scenarija koja se razlikuju u smislu parametara  $\lambda_{sd}$  (intenzitet saobraćaja) i  $W_{max}$  (broj talasnih dužina) kao što je prikazano u tabelama 4.4., 4.5., 4.6., za mrežne topologije N1, EON-19 i EON-28, respektivno. Scenario I i II podrazumevaju isti intenzitet saobraćaja  $\lambda_{sd} = 0.05$  a različit broj raspoloživih talasnih dužina,  $W_{max} = 4$  i  $W_{max} = 8$ , respektivno, kako bi se analizirao uticaj raspoloživih talasnih dužina na verovatnoću blokiranja. Scenario II i III razlikuju se po intenzitetu saobraćaja  $\lambda_{sd} = 0.05$  i  $\lambda_{sd} = 0.1$ , respektivno a broj talasnih dužina je isti  $W_{max} = 8$ , kako bi se analizirao uticaj povećanja intenziteta saobraćaja na verovatnoću blokiranja zahteva.



Slika 4.3. Topologije posmatranih optičkih mreža: a) N1 i b) EON-28



Slika 4.4. Topologija posmatrane optičke mreže EON-19

Vrednosti verovatnoće blokiranja za posmatrane optičke mreže i tri navedena saobraćajna scenarija prikazane su na slici 4.5. Povećanjem gustine konvertora u mrežama manjih dimenzija (N1) postižu se nešto bolje performanse odnosno manja verovatnoća blokiranja zahteva. Može se primetiti sa slike 4.5. a) da se vrednosti verovatnoće blokiranja neznatno menjaju tek posle  $K > 7$ . Povećanjem gustine konvertora talasnih dužina u mrežama većih dimenzija (EON-19 i EON-28) odnosno implementacijom konvertora u veći broj čvorova mreže, ne smanjuje se značajno verovatnoća blokiranja zahteva. Za mrežu EON-19 (slika 4.5. b)) vrednosti verovatnoće blokiranja približno su iste za  $K = 7$  i više konvertora, a za mrežu EON-28 (slika 4.5. c)) za  $K = 11$  i više konvertora, odnosno u pitanju su neznatne varijacije rezultata. Lokacije konvertora talasnih dužina dobijene primenom metaheuristike BCO, za sve posmatrane mreže, prikazane su u tabelama 4.4., 4.5. i 4.6.

Tabela 4.4. Optimalne lokacije konvertora talasnih dužina za mrežu EON-19

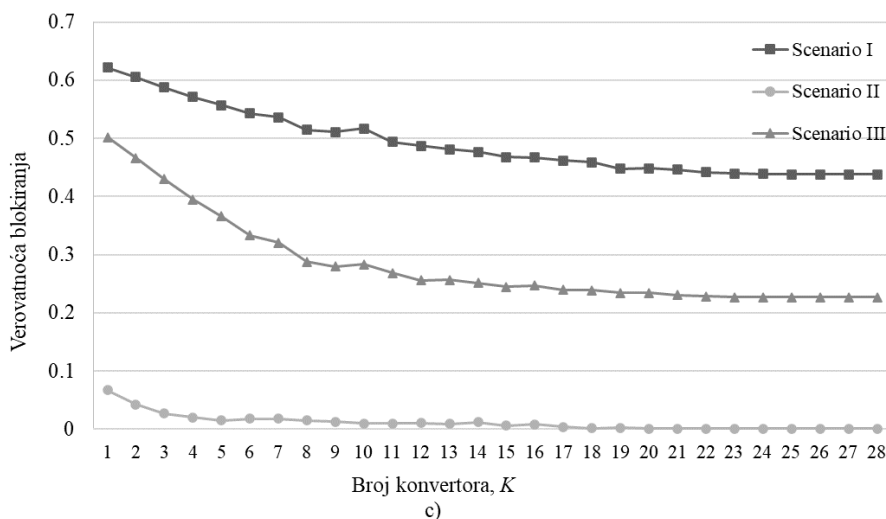
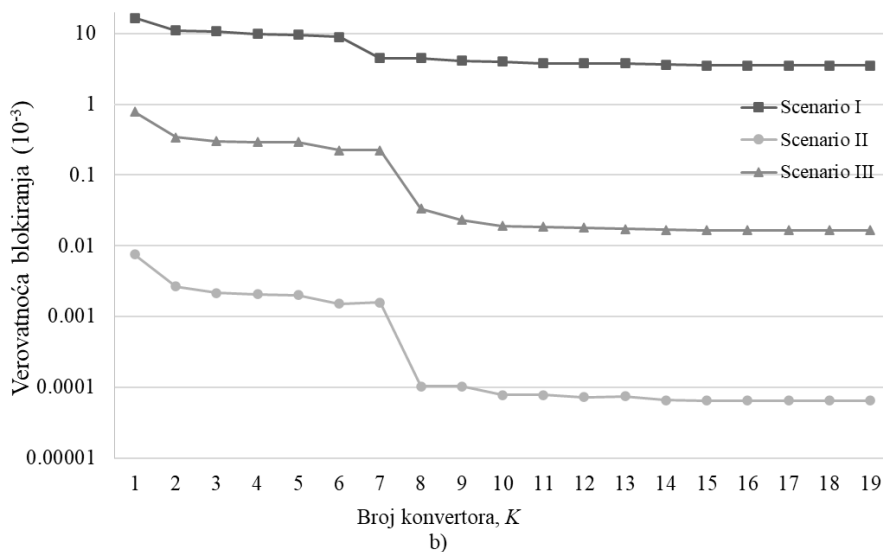
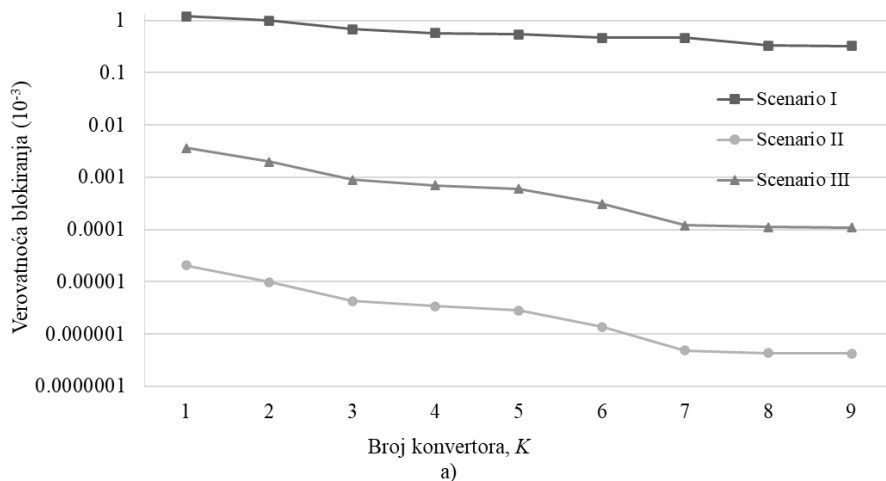
$K$	Scenario I	Scenario II	Scenario III
	$\lambda_{sd} = 0.05; W_{max} = 4$	$\lambda_{sd} = 0.05; W_{max} = 8$	$\lambda_{sd} = 0.1; W_{max} = 8$
1	16	16	16
2	5, 12	5, 12	5, 12
3	5, 12, 17	5, 12, 14	5, 12, 14
4	1, 5, 12, 14	3, 10, 13, 16	3, 10, 16, 17
5	3, 10, 12, 14, 16	3, 10, 16, 17, 18	5, 11, 12, 14, 17
6	1, 5, 12, 14, 16, 17	1, 5, 11, 12, 14, 17	1, 5, 8, 12, 14, 18
7	5, 8, 10, 12, 14, 16, 17	3, 9, 10, 12, 14, 16, 18	1, 5, 9, 12, 14, 17, 18
8	5, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 17	1, 5, 8, 10, 12, 14, 16, 17	3, 5, 8, 10, 12, 14, 16, 17
9	1, 5, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 17	1, 5, 8, 10, 12, 14, 16, 17, 19	1, 3, 5, 8, 10, 12, 14, 16, 17
10	1, 2, 5, 8, 10, 12, 14, 16, 17, 18	1, 3, 5, 8, 10, 12, 13, 14, 16, 17	1, 5, 8, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 19
11	1, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17	1, 3, 5, 8, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 19	1, 2, 5, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17
12	1, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18	1, 2, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17	1, 2, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17
13	1, 2, 5, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19	1, 2, 3, 5, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19	1, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17
14	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17	1, 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19	1, 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19
15	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19
16	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19
17	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
18	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19
19	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19

Tabela 4.5. Optimalne lokacije konvertora talasnih dužina za mrežu N1

$K$	Scenario I	Scenario II	Scenario III
	$\lambda_{sd} = 0.05; W_{max} = 4$	$\lambda_{sd} = 0.05; W_{max} = 8$	$\lambda_{sd} = 0.1; W_{max} = 8$
1	3	3	3
2	3, 7	3, 7	3, 7
3	3, 7, 8	3, 7, 8	3, 7, 8
4	2, 3, 7, 8	2, 3, 7, 8	2, 3, 7, 8
5	2, 3, 5, 7, 8	2, 3, 5, 7, 8	2, 3, 5, 7, 8
6	3, 4, 5, 6, 7, 8	3, 4, 5, 6, 7, 8	3, 4, 5, 6, 7, 8
7	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
8	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

Tabela 4.6. Optimalne lokacije konvertora talasnih dužina za mrežu EON-28

$K$	Scenario I	Scenario II	Scenario III
	$\lambda_{sd} = 0.05; W_{max} = 4$	$\lambda_{sd} = 0.05; W_{max} = 8$	$\lambda_{sd} = 0.1; W_{max} = 8$
1	16	16	16
2	3, 16	11, 16	16, 17
3	3, 12, 16	11, 14, 16	14, 16, 17
4	3, 12, 15, 16	3, 11, 16, 17	14, 15, 16, 17
5	11, 12, 15, 16, 17	3, 11, 14, 16, 17	12, 14, 15, 16, 17
6	3, 9, 12, 15, 16, 17	9, 11, 12, 14, 16, 17	3, 11, 14, 15, 16, 17
7	3, 12, 14, 15, 16, 17, 19	3, 7, 9, 12, 15, 17, 21	9, 11, 13, 14, 15, 16, 17
8	3, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	3, 9, 12, 14, 15, 17, 23, 24	3, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17
9	3, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 23	9, 12, 13, 14, 15, 17, 20, 21, 26	3, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 22
10	2, 3, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 21	9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 23, 25	7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21
11	3, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 24	9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 21, 23, 25, 26	3, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 24, 25
12	3, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18	1, 2, 5, 6, 8, 10, 11, 3, 16, 17, 21, 24	3, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21
13	3, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 22, 25	2, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 21, 24, 25, 27	2, 3, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 25
14	3, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 23, 25, 27	1, 3, 4, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 26	3, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 23, 24, 25, 28
15	3, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 24, 26	1, 3, 4, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 27	3, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 24, 25
16	3, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 24, 25	3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 21, 24, 25, 26, 28	1, 3, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 26
17	3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 24, 25	3, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25	2, 3, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25
18	3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 24, 25, 26, 27	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25	3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 24, 25, 27
19	3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 24, 25	3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 26	2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 27
20	1, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 27	1, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 27	1, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25
21	3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 23, 24, 25, 27, 28	2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 27	2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 25
22	2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 26, 27	3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 26, 27	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 28
23	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 27	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 27	2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 26, 27
24	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 27	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 27	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 27
25	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27
26	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27
27	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27
28	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28

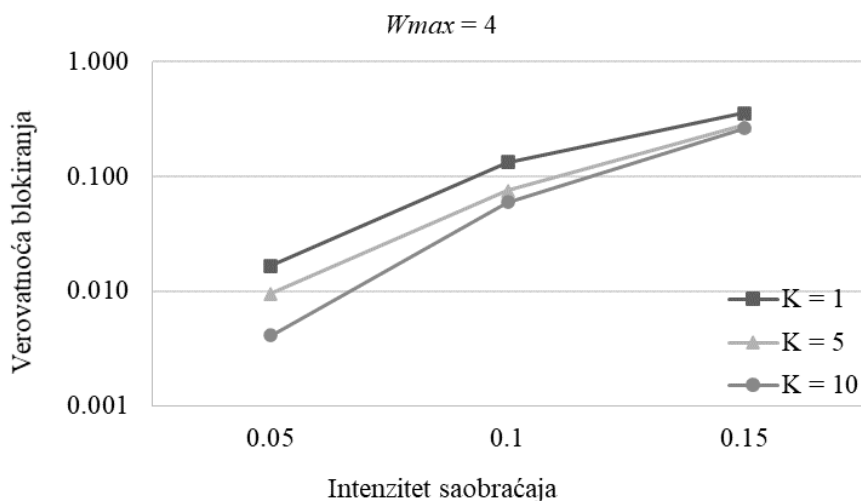


Slika 4.5. Verovatnoće blokiranja: a) N1; b) EON-19 i c) EON-28

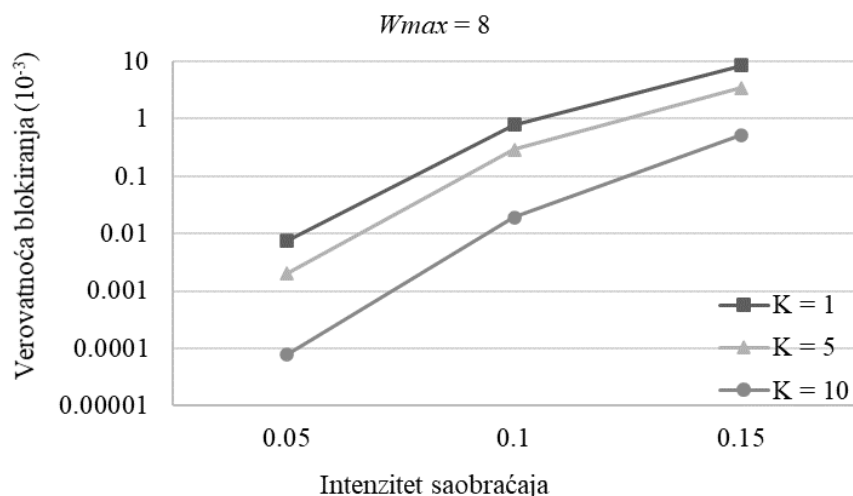
Na slikama 4.6., 4.7. i 4.8. detaljnije je predstavljen efekat primene konverzije talasnih dužina i uticaj parametara kao što su broj talasnih dužina, broj konvertora i saobraćajni scenario na verovatnoću

blokiranja zahteva. Zbog sličnosti rezultata, na dijagramima su predstavljeni rezultati za mrežu EON-19. Performanse mreže su analizirane za različite vrednosti uticajnih parametara, i to: broj talasnih dužina  $W_{max} = 4, 8, 12$ , saobraćajni scenario  $\lambda_{sd} = 0.05, 0.1, 0.15$  i broj konvertora  $K = 1, 5, 10$ .

Za sve posmatrane topologije mreža, bez obzira na broj čvorova i povezanost mreže, verovatnoća blokiranja raste sa povećanjem intenziteta saobraćaja a smanjuje se sa povećanjem raspoloživih talasnih dužina. Pokazuje se da stepen unapređenja performansi mreže ne raste sa povećanjem broja (gustine) konvertora u mreži iznad određenih graničnih vrednosti. Primenom proređene (SWC) konverzije talasnih dužina, mogu se postići približno iste performanse kao i u slučaju primene konverzije talasnih dužina u svim čvorovima mreže. Performanse mreže prvenstveno zavise od broja raspoloživih talasnih dužina, ali i od lokacija čvorova u kojima su postavljeni konvertori. Prema tome, jedno od suštinskih pitanja koje se nameće pri dizajniranju WRON mreža, odnosi se na rešavanje problema određivanja minimalnog broja konvertora, kao i izbora optimalnih lokacija čvorova u kojima konvertori talasnih dužina treba da budu implementirani. To predstavlja veoma složenu problematiku čije se rešavanje zasniva na pronalaženju kompromisnog rešenja između zahtevanih performansi i ukupnih troškova (cene) mreže.

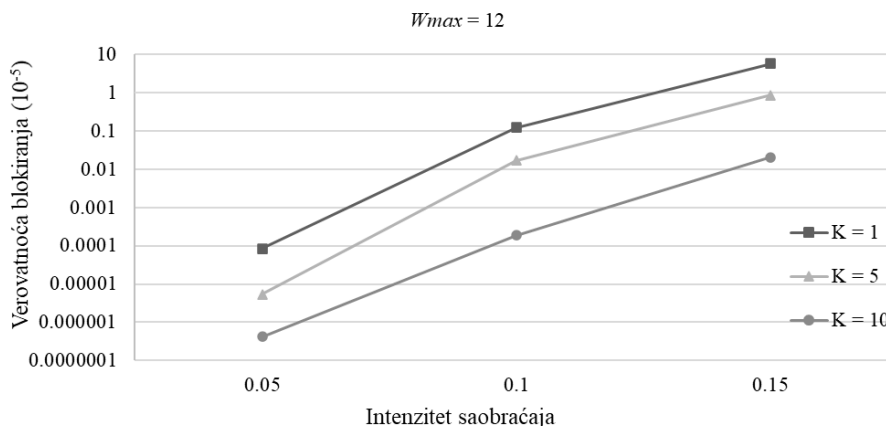


Slika 4.6. Verovatnoća blokiranja za različite vrednosti parametara  $\lambda_{sd}$ ,  $K$  i  $W_{max} = 4$



Slika 4.7. Verovatnoća blokiranja za različite vrednosti parametara  $\lambda_{sd}$ ,  $K$  i  $W_{max} = 8$





Slika 4.8. Verovatnoća blokiranja za različite vrednosti parametara  $\lambda_{sd}$ ,  $K$  i  $W_{max} = 12$

Pokazano je da se BCO-WCP algoritam može efikasno primeniti za rešavanje problema izbora lokacija konvertora talasnih dužina u mrežama realnih dimenzija. Tokom svake iteracije pronalazi se i memoriše postignuto rešenje, a kao konačno usvaja se ono koje daje najbolju vrednost kriterijumske funkcije tokom svih sprovedenih iteracija. Treba napomenuti da povećanje broja pčela ne utiče na poboljšanje kvaliteta rešenja, ali utiče na potrebno računarsko vreme za izvršavanje simulacije. Zbog toga je kao kompromis u sprovedenim simulacijama usvojeno da je  $B = 10$  pčela.

Algoritam se može efikasno koristiti u cilju dimenzionisanja potrebnih resursa optičke mreže i određivanja troškova vezanih za projektovanje mreže sa konvertorima talasnih dužina.

Optimizacija performansi optičkih WDM mreža agregacijom saobraćaja i konverzijom talasnih dužina

---

5.

**PROBLEM RUTIRANJA I ALOKACIJE  
SPEKTRA I OPTIČKA  
AGREGACIJA SAOBRAĆAJA**

---

## 5. PROBLEM RUTIRANJA I ALOKACIJE SPEKTRA I OPTIČKA AGREGACIJA SAOBRAĆAJA

Veliki broj problema koje treba rešavati u elastičnim optičkim mrežama u sebi sadrži i problem rutiranja i dodele/alokacije spektra- RSA odnosno RMSA (*Routing, Modulation and Spectrum Allocation*) ukoliko se uzima u obzir i vrsta modulacije. Izbor pogodnog RSA algoritma je od suštinskog značaja za unapređenje performansi i upravljanje resursima EON mreže. Nekoliko RSA/RMSA algoritama predloženo je u ranijim studijama, kako za statički, tako i za dinamički saobraćajni scenario [10], [108-113]. Studije su uključivale ILP formulacije i heurističke algoritme. Zbog unapređenja kvaliteta rešenja, u rešavanju RSA problema primenjene su i metaheuristike, kao što je prethodno pomenuto [93-97]. Detaljan pregled RSA/RMSA algoritama sa poređenjem njihove efikasnosti, složenosti i vremena potrebnog za dobijanje optimalnog rešenja može se pronaći u [114, 115].

U ovom poglavlju disertacije istražuje se statički RSA problem, gde se procedura rešavanja izvršava u *offline* režimu, odnosno mreža nije u operativnoj fazi rada, tako da sa aspekta vremena dobijanja rešenja nema eksplicitnih ograničenja. Problem se odnosi na fazu planiranja i dimenzionisanja mreža kao i tokom njihove eksploatacije kada nisu izražene česte promene saobraćaja. U ovoj fazi određuju se troškovi čvorova i linkova mreže, kao i potrebne opreme da bi se opslužio prognozirani saobraćaj uz minimizaciju kapitalnih troškova (CAPEX, *Capital Expenditure*). Da bi se opslužio zahtevani saobraćaj u elastičnoj optičkoj mreži, neophodno je rešiti problem rutiranja i dodele spektra, odnosno uspostaviti optičke putanje.

Statički RSA problem može se formulirati kao kombinatorni optimizacioni problem i za rešavanje istog je karakteristično da se vrednosti rešenja uvek moraju pronalaziti iz konačnog skupa mogućih diskretnih vrednosti, što ovaj problem svrstava u opštu kategoriju problema kombinatorne (diskretne) optimizacije. RSA problem se u matematičkom smislu tipično formuliše preko zadataka celobrojnog linearnog programiranja.

### 5.1 RSA kao problem kombinatorne optimizacije

Problem rutiranja i dodele spektra, kao kombinatorni optimizacioni problem, može se uopšteno definisati u sledećem obliku: za dati konačan, diskretan skup  $S$  i funkciju  $F: S \rightarrow \mathbb{R}$ , gde je  $\mathbb{R}$  skup realnih brojeva, pronaći minimum ili maksimum funkcije cilja  $F$  na skupu  $S$ , tj. rešiti sledeći optimizacioni zadatak:

$$\min_{x \in S} F(x).$$

Skup  $S$  se naziva skupom dopustivih rešenja,  $F$  funkcija cilja a za rešenje  $x \in S$  se kaže da je dopustivo rešenje problema. U literaturi se može pronaći više podela metoda za rešavanje problema kombinatorne optimizacije, ali je uopštena podela na: egzaktne i aproksimativne [99], [116]. U aproksimativne metode spadaju: heuristike, aproksimativni algoritmi i metaheuristike [99], [116].

Opšta karakteristika egzaktnih metoda je da omogućavaju pronalazak optimalnog rešenja, mada računarska složenost procedure može imati za posledicu neprihvatljivo dugo vreme do dobijanja rešenja ili se čak rešenje problema ne može odrediti.

Aproksimativni algoritmi se uobičajeno koriste za rešavanje kombinatornih optimizacionih problema, ukoliko za dati problem ne postoji efikasna egzaktna metoda (tehnika dekompozicije, Lagrangean-

ova relaksacija i dr.) i u opštem slučaju ne obezbeđuju optimalna rešenja, već su stvarna rešenja takva da je relativna greška u odnosu na optimalne vrednosti u garantovanim granicama.

Heurističke metode se koriste u situacijama kada se rešenja ne mogu dobiti primenom egzaktnih ili aproksimativnih algoritama, ili kada je računarsko vreme potrebno za izvršavanje ovih algoritama neprihvatljivo dugo. Ove metode uobičajeno ne garantuju optimalnost dobijenog rešenja, ali zato omogućavaju rešavanje složenih problema u prihvatljivom vremenu. U određenim slučajevima primenom „dobrih“ heurističkih algoritama moguće je pronaći i optimalna rešenja naznačenog problema. Razvijaju se za rešavanje određenog problema, što i jeste njihovo osnovno ograničenje i razlog primene metaheuristika ili tzv. modernih heuristika, koje pretražuju veliki skup rešenja i tipično daju bolja rešenja od heuristika.

## 5.2. Klasifikacija RSA problema prema scenariju saobraćaja

RSA problemi se prema saobraćajnom scenariju mogu podeliti na:

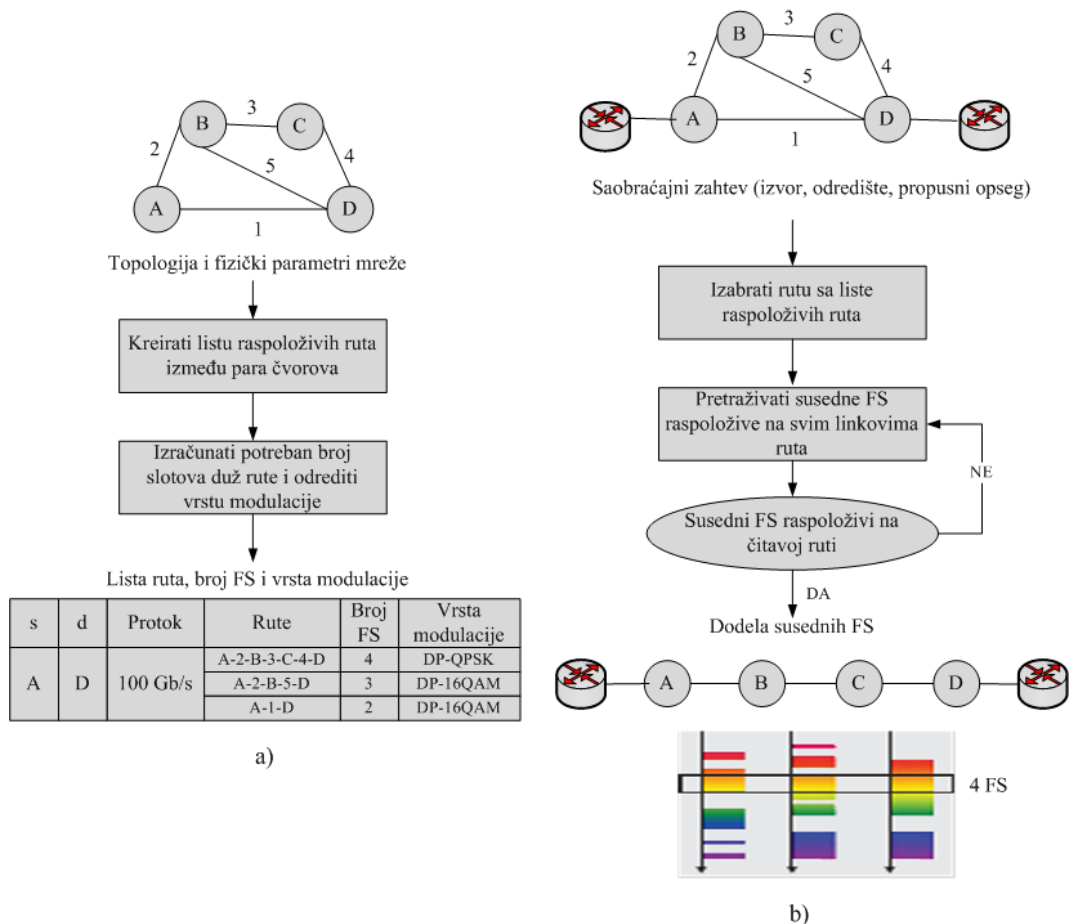
- statičke (*offline*) i
- dinamičke (*online*).

Statički saobraćajni scenario podrazumeva unapred poznat skup zahtevanih konekcija (saobraćajnih zahteva) koje treba uspostaviti u mreži. Broj zahtevanih frekvencijskih slotova za svaki izvorno-odredišni par čvorova može biti određen na osnovu dugoročne procene budućih saobraćajnih zahteva. Donošenje odluke o uspostavljanju puteva svetlosti vrši se na osnovu kompletnih informacija o svim zahtevanim putevima svetlosti. Pronađeno rešenje RSA problema ostaje nepromenjeno tokom dužeg vremenskog perioda (npr. više meseci ili čak godina). Tipična kriterijumska funkcija pri ovakvom saobraćajnom scenariju jeste minimiziranje ukupnog potrebnog spektra, odnosno ukupnog broja frekvencijskih slotova zauzetih u mreži ili na svakom linku mreže.

U dinamičkom saobraćajnom scenariju saobraćajni zahtevi se pojavljuju jedan za drugim u slučajnim vremenskim trenucima, imaju ograničeno (slučajno) trajanje i procesiraju se u trenutku nailaska zahteva. Donošenje odluke o uspostavljanju pojedinačnog puta svetlosti vrši se na osnovu informacija o trenutnom stanju mreže odnosno uspostavljenim putevima svetlosti u posmatranom trenutku. U slučaju da u momentu nailaska zahteva broj raspoloživih frekvencijskih slotova nije dovoljan za uspostavljanje date konekcije, zahtev se odbija, pa je minimizacija verovatnoće blokiranja zahteva tipična kriterijumska funkcija pri ovakvom saobraćajnom scenariju.

## 5.3. Opis RSA problema

U elastičnim optičkim mrežama sa rutiranjem po frekvencijskim slotovima komunikacija između dva krajnja čvora ostvaruje se preko elastičnih puteva svetlosti. Da bi se put svetlosti uspostavio između izvornog i odredišnog čvora, neophodno je rešiti dva problema: (1) pronaći raspoloživu fizičku rutu između čvorova i (2) dodeliti odgovarajuće frekvencijske slotove u okolini centralne frekvencije zahtevanom putu svetlosti. Ova dva zadatka se objedinjeno nazivaju problem rutiranja i dodele/alokacije spektra (šematski ilustrovan na slici 5.1.). Problem RSA u EON mrežama rešava se po sličnom principu kao i RWA u WDM optičkim mrežama, gde se pored pronalaska rute uzimalo u obzir i ograničenje kontinuiteta i različitosti talasnih dužina. Razlika između RSA i RWA problema nastaje usled pojave fleksibilnosti u EON mrežama i mogućnosti alokacije spektra u skladu sa zahtevanim protokom. Specijalan slučaj RSA problema, u kojem bi svaka uspostavljena konekcija zahtevala po jedan frekvencijski slot, odgovarao bi RWA problemu (jedan frekvencijski slot odgovara jednoj talasnoj dužini na svim linkovima duž rute puta svetlosti).

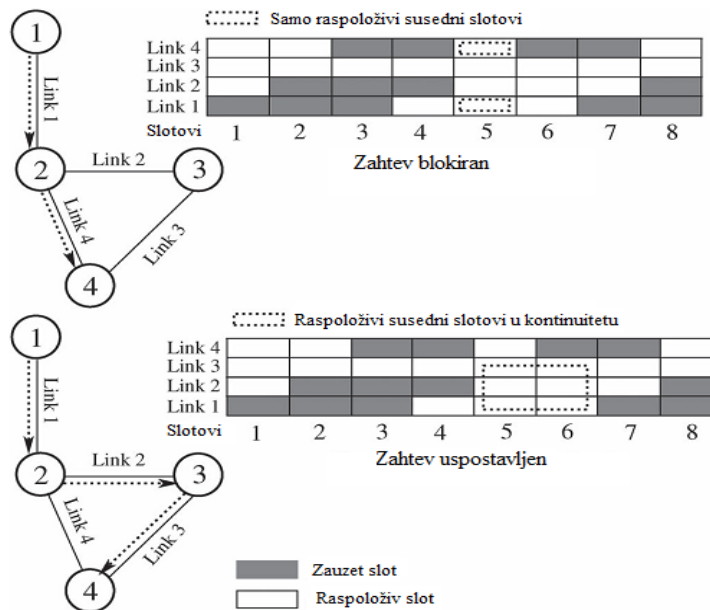


Slika 5.1. Šematski prikaz RSA problema: a) rutiranje i b) dodela spektra [20]

Dodela frekvencijskih slotova u EON mrežama uvodi novo ograničenje koje ne postoji kod RWA problema, a odnosi se na susednost frekvencijskih slotova (*spectrum contiguity*) koji se dodeljuju optičkoj konekciji. To predstavlja osnovnu razliku između RSA i klasičnog RWA problema. Iz tog razloga modeli i algoritmi razvijeni za rešavanje RWA problema nisu direktno primenljivi za rešavanje RSA problema. Susedni frekvencijski slotovi moraju dodatno, u mrežama bez mogućnosti konverzije spektra, ispunjavati i ograničenje kontinuiteta (*spectrum continuity*), što podrazumeva alokaciju istih frekvencijskih slotova datoj optičkoj konekciji na svim linkovima duž odabrane rute od izvornog do odredišnog čvora. Ukoliko jedno od ograničenja nije ispoštovano, konekcija se ne uspostavlja. Dakle, osnovna ograničenja koja figurišu u rešavanju problema rutiranja i dodele spektra u mrežama sa fleksibilnim gridom su:

- ograničenje susedstva frekvencijskih slotova (*spectrum contiguity*), i
- ograničenje kontinuiteta frekvencijskih slotova (*spectrum continuity*).

Na slici 5.2. detaljnije su ilustrovana RSA ograničenja na segmentu mreže od četiri čvora. Pretpostavka je da je potrebno uspostaviti put svetlosti od izvornog čvora 1 do odredišnog čvora 4, a za koji su potrebna dva frekvencijska slota. Najkraća fizička ruta 1-2-4 ne može se koristiti zbog diskontinuiteta slotova koji su ostali izolovani nakon alokacije. Da bi se put svetlosti mogao uspostaviti potrebno je koristiti rutu 1-2-3-4 i slotove 5 i 6 jer ispunjavaju oba RSA ograničenja.



Slika 5.2. Ilustracija ograničenja susedstva i kontinuiteta frekvencijskih slotova u problemu RSA [3]

## 5.4. Metode za izbor rute

Rešavanje RSA problema može podrazumevati pojedinačno rešavanje problema rutiranja pa zatim problema dodele spektra ili njihovo objedinjeno rešavanje (*joint RSA*) [62], [113], [117, 118]. U zavisnosti od toga da li se u rešavanju problema rutiranja uzima u obzir i problem fragmentacije slotova, razlikuju se rutiranje bez i sa posledicom elastičnosti (pojavom fragmenata).

Ukoliko se fragmentacija spektra ne uzima u obzir, metode za izbor rute pronalaze samo odgovarajuću rutu između izvorno-odredišnog para čvorova. Rute se mogu birati iz odabranog podskupa potencijalnih ruta ili iz skupa svih mogućih ruta između posmatranog para čvorova u mreži. Na osnovu toga, metode rutiranja mogu se podeliti na:

- fiksno rutiranje (FR, *Fixed Routing*) – koristi se uvek jedna fiksna ruta,
- fiksno alternativno rutiranje (FAR, *Fixed Alternate Routing*)- koristi se skup  $k > 1$  mogućih alternativnih ruta koje se ispituju po fiksnom redosledu,
- rutiranje po najmanje opterećenoj ruti (LCR, *Least Congested Routing*),
- adaptivno rutiranje (AR, *Adaptive Routing*)- ruta između para čvorova se bira dinamički, na osnovu informacije o stanju linkova u mreži.

Komparacija navedenih metoda rutiranja prikazana je u tabeli 5.1.

Da bi se ublažile posledice RSA ograničenja, primenjuje se rutiranje po višestrukim putanjama. Na taj način se može prevazići problem horizontalne i vertikalne spektralne fragmentacije (ilustrovan na slici 5.3.). Defragmentacija podrazumeva rerutiranje ili realokaciju izolovanih slotova kako bi se poboljšale performanse mreže i izbegao prekid saobraćaja. Na slici 5.3. (levo) može se primetiti da dva slota koja su izolovana (slot 2 i 3) na linku 2 onemogućavaju uspostavljanje konekcije preko putanje 1-2-3. Međutim, nakon njihove realokacije (slika 5.3. desno) na pozicije 4 i 5, oslobadaju se resursi na svim linkovima 1, 2 i 3, te je moguće uspostaviti zahtevani put svetlosti.

Tabela 5.1. Komparacija metoda rutiranja (bez rešavanja problema fragmentacije) [3]

Problem	Metod	Analiza performansi			on/off line	
		BP	AST	TC		
Rutiranje	Statički	FR	Veća BP u odnosu na ostale	Kraće AST u odnosu na ostale	O ( $L_1Z$ )	offline
	Dinamički	FAR	Niža BP u odnosu na FR	Duže AST u odnosu na FR	O ( $L_2KZ$ )	offline
		LCR	Skoro ista kao kod FAR	Skoro isto kao u FAR	O ( $L_3KZ$ )	offline
	Dinamički	AR	Niža BP u odnosu na ostale	Duže AST u odnosu na ostale	O ( $L_2N^2Z$ )	online

BP- Blocking Probability (Verovatnoća blokiranja)

AST- Average Setup Time (Srednje vreme uspostavljanja konekcije)

TC- Time Complexity (Vremenska složenost)

K- broj ruta kandidata za svaki par čvorova

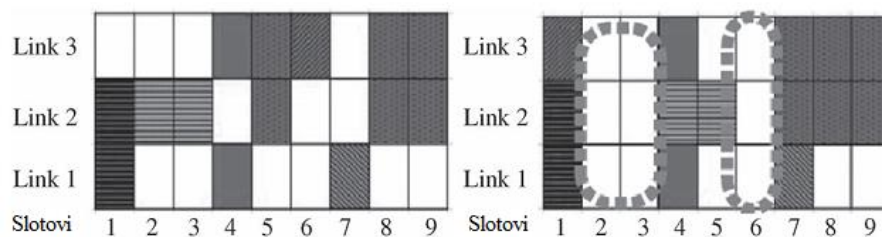
N- broj čvorova mreže

Z- broj saobraćajnih zahteva u mreži

$L_1$ - dužina najduže fiksne rute za svaki par čvorova

$L_2$ - dužina najduže rute sa liste kandidata za svaki par čvorova

$L_3$ - broj hopova najduže rute sa liste ruta kandidata



Slika 5.3. Problem fragmentacije spektra i realokacija slotova [3]

## 5.5. Metode za dodelu spektra

Dodela spektra (SA, *Spectrum Allocation*), kao deo RSA problema, može se vršiti nakon izbora rute ili paralelno sa procesom pronalaska rute. Konekcije se mogu tretirati kao pojedinačne i grupne. Ukoliko se posmatraju pojedinačni zahtevi, spektral je moguće dodeliti nekom od sledećih metoda:

- *First Fit*- frekvencijski slotovi se dodeljuju po principu „prvi raspoloživi“ odnosno bira se najniži indeksiran slobodan frekvencijski slot (*lowest indexed slot*),
- *Random Fit*- frekvencijski slotovi se dodeljuju po slučajnom rasporedu,
- *Last Fit*- frekvencijski slotovi se dodeljuju po principu „poslednji raspoloživi“, odnosno bira se najviši indeksiran slobodan frekvencijski slot (*highest indexed slot*),
- *First-Last Fit*- frekvencijski slotovi svakog linka se podele na nekoliko segmenata (određen broj). Zatim se sa neparnih segmenata traži najniži indeksiran slot, a sa parnih najviši indeksiran slot,
- *Least Used*- frekvencijski slotovi se biraju po principu najmanje korišćenih (najmanje korišćeni slotovi na svim optičkim linkovima),

- *Most Used*- frekvencijski slotovi se biraju po principu najčešće korišćenih na svim linkovima mreže,
- *Exact Fit*- polazi se od početne frekvencije kanala i pretražuje se tačno zahtevani (egzaktan) raspoloživi broj slotova. Ukoliko takav set slotova nije raspoloživ, primenjuje se *First Fit* metoda.

Ako se posmatraju grupni zahtevi i promene koje se dozvoljavaju sa aspekta centralne frekvencije i širine opsega, razlikuju se sledeće metode dodele spektra:

- fiksna dodela spektra (*fixed SA*)- centralna frekvencija i dodeljena širina opsega se ne menjaju (fiksno su karakteristične) što znači da ova metoda ne podržava koncept elastičnosti,
- polu-elastična dodela spektra (*semi-elastic SA*)- centralna frekvencija ostaje ista, a širina opsega se menja u zavisnosti od zahteva,
- elastična dodela spektra (*elastic SA*)- mogu se menjati i dodeljena centralna frekvencija i širina opsega. Centralna frekvencija se može menjati u opsegu susednih ili čak nesusednih frekvencija ukoliko se radi kompletna realokacija opsega.

Komparacija pojedinih metoda dodele spektra za slučaj grupnih zahteva sa aspekta hardvera, kontrolne ravni, signalizacije, iskorišćenosti spektra, računarske složenosti i sl. data je u tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Komparacija metoda dodele spektra za slučaj grupnih zahteva [3]

	Fiksna SA	Polu-elastična SA	Elastična SA
Hardver	Bez dodatnih zahteva	BVT i BV-OXC moraju podržavati veću ili manju upotrebu broja frekvencijskih slotova	Veći hardverski zahtevi u smislu podešavanja lasera
Kontrolna ravan	Ekstenzije: GMPLS, RSVP-TE, OSPF	Ekstenzije RSVP-TE protokola kako bi se mogao modifikovati broj dodeljenih slotova	Kompleksni algoritmi za pronalazak ruta implementirani u rutere (simultani pristup spektralnim resursima)
Složenost postupka signalizacije	Kontrolna ravan ne modifikuje BV-OXC duž rute zbog prilagođavanja propusnom opsegu	RSVP-TE protokol se koristi za signalizaciju tj. šalju se signalizacione poruke svim BV-OXC duž rute u smislu prilagođavanja propusnom opsegu	Slična procedura kao i kod polu-elastičnog SA sa dodatnim vremenom čekanja zbog podešavanja filtera i lasera
Računarska složenost	Potrebno manje CPU vremena nego kod ostalih	Veća računarska složenost od fiksnog SA, a manja od elastičnog SA	Potrebno najviše CPU vremena
Spektralna efikasnost	Manja nego kod ostalih	Veća u odnosu na fiksnu SA a manja u poređenju sa elastičnim SA	Najveća spektralna efikasnost
On/Off line	Off line	On line	On line

## 5.6. Analiza RSA algoritama u EON mrežama

U ovom delu rada dat je pregled RSA/RMSA algoritama poređenjem njihove efikasnosti, složenosti i vremena potrebnog za dobijanje optimalnog rešenja. Podeljeni su na statičke i dinamičke algoritme u zavisnosti od saobraćajnog scenarija. U svakoj od podela, originalni nazivi su dati na engleskom jeziku, a opisane su njihove osnovne karakteristike, način rutiranja i dodele opsega. Algoritmi su poređeni sa kvalitativnog i kvantitativnog aspekta. Sa aspekta granularnosti koju definiše tzv. baza



algoritma ili širina spektra, podeljeni su u pet grupa i to po veličini baze: frekvencijski slot (FS); podnosilac - sastoji se od nekoliko FS; talasna dužina; spektralni blok - sastoji se od većeg broja susednih podnosilaca i spektralni segment - celi spektar se deli na nekoliko definisanih segmenata (fiksne ili adaptivne veličine). U svakom od algoritama baza utiče na složenost samog algoritma i na performanse mreže koje se optimizuju [114, 115].

### 5.6.1. Statički RSA algoritmi

*Routing, Wavelength Assignment and Spectrum Allocation* (RWSA) - baza za dodelu spektra je talasna dužina – kanal, zbog čega se često naziva i rutiranje i dodela kanala. Postoje tri varijante algoritma u zavisnosti od rutiranja i dodele spektra: pohlepni - *Greedy* RWSA, gde se zahtevi sortiraju prema rastojanju između čvorova i zahtevanom spektru, *Kpaths*-RWSA i *SP*-RWSA (*Shortest Paths*-RWSA), gde je  $k = 1$ , a koji problem rutiranja i dodele spektra rešava objedinjeno.

*Adaptive Frequency Assignment- Collision Avoidance* (AFA-CA) - dodela frekvencijskih slotova bez mogućnosti spektralnog preklapanja. Ispitivanje konekcija počinje od one sa najvećim zahtevanim brojem frekvencijskih slotova. Definisana je funkcija *MinFS* kojom se ispituju sve potencijalne rute određenog zahteva. Dodela slotova se vrši počevši od najniže indeksiranog slota. Procedura se nastavlja dok svi zahtevi u mreži ne budu opsluženi.

*Spectrum Path with Maximum Spectrum Reuse* (SPSR) - algoritam se zasniva na ponovnoj upotrebi spektra, prioritet imaju zahtevi većeg kapaciteta. Kombinuje rutiranje po najkraćoj putanji i algoritme zasnovane na ponovnoj upotrebi spektra. Bazu predstavlja podnosilac a čini ga nekoliko susednih FS. Rute koje nemaju zajedničke linkove mogu ponovo koristiti iste podnosioce. Za dodelu spektra koristi se *first fit* princip. Algoritmom se ne postiže ravnomerna raspodela saobraćaja u mreži, ali se izbegava preklapanje ruta.

*Balanced Load Spectrum Allocation* (BLSA) - algoritam koji se zasniva na ravnomernoj raspodeli saobraćaja u mreži, na osnovu čega se i biraju rute. U obzir se uzima saobraćaj na vlaknu koje je najviše opterećeno u mreži. Algoritam obuhvata tri koraka: proračun  $k$  – najkraćih ruta ( $k > 1$ ), izbor ruta i dodela spektra.

*Survivable Multipath Routing and Spectrum Allocation* (SM-RSA) – konekcija se deli na nekoliko manjih koje se dalje rutiraju po različitim rutama. U slučaju da dođe do otkaza na nekom od linkova, saobraćaj se automatski prebacuje na drugu rutu. Na taj način se obezbeđuje zaštita potrebnog dela spektra umesto kompletnog.

*Minimum Interference Routing and Spectrum Allocation* (MI-RSA) – algoritam uzima u obzir i problem fragmentacije spektra, i to na nivou rute, za razliku od drugih algoritama u kojima se problem rešava na nivou linka. Posmatrajući uticaj i na ostale parove čvorova, biraju se one rute koje izazivaju najmanju fragmentaciju spektra. Na svakoj ruti su definisani kritični linkovi kojima se dodeljuju težine kako bi se mogla izabrati najbolja ruta.

*Quality of Service (QoS)-based* RSA – algoritam uzima u obzir i obezbeđenje kvaliteta servisa klasifikacijom saobraćajnih zahteva u zahteve višeg i nižeg prioriteta. Ukoliko nema raspoloživih resursa na HQ (*High Quality*) rutama, algoritam vrši pretragu LQ (*Low Quality*) ruta.

### 5.6.2. Dinamički RSA algoritmi

*Light-Path Fragmentation Algorithm* (LFA) - algoritam se zasniva na podeli konekcija većeg intenziteta na manje konekcije i dodeljuje im fragmentovane slotove nakon postupka defragmentacije. Na taj način se broj fragmentovanih slotova svodi na minimum.

*Adaptive Unconstrained Routing- Exhaustive Spectrum Search* (AUR-ESS)- problem rutiranja i dodele spektra rešava se objedinjeno, sprovođenjem iscrpljujuće pretrage raspoloživih slotova. Algoritam se zasniva na primeni pomoćnih grafova.

*The Most Common Available Patterns* (MCAP) - algoritam se zasniva na GMPLS protokolu. Rutiranje podrazumeva izbor rute sa maksimalnim brojem raspoloživih resursa (frekvencijskih slotova) koji se mogu dodeliti konekciji, ali sa ograničenjem broja hopova (HC, *Hop Count*) kako bi se sprečila mogućnost izbora dužih ruta. Zatim se vrši dodela spektra poštujući ograničenje preklapanja spektra (CA-SA, *Collision Aware-Spectrum Allocation*). Definisana je verovatnoća blokiranja na nivou rute (ako ista nije raspoloživa) i verovatnoća blokiranja u procesu dodele spektra, ako nema dovoljno resursa na izabranoj ruti. Takođe, razmatrana je i verovatnoća blokiranja koja nastaje kao posledica kolizije u procesu rezervacije propusnog opsega.

*Fairness-aware dynamic spectrum allocation algorithm* - saobraćajni zahtevi se dele u različite klase u zavisnosti od potrebnog broja slotova. Iz tog razloga uvedena su dva termina: normalizovana verovatnoća blokiranja i indeks jednakog opsluživanja zahteva (*fairness index*). To se omogućava na dva načina: progresivnom alokacijom PADR (*Progressive Allocation and Dynamic Reallocation*), gde se celokupan spektar deli na nekoliko spektralnih blokova koji se ravnopravno dodeljuju svim konekcijama, i PSPADR (*Partial Sharing PADR*), gde se celokupan spektar deli na dva dela: jedan za dodelu resursa svakoj klasi i drugi koji se deli između klasa u slučaju nedostatka resursa.

*Dinamički RSA sa kombinovanim brzinama prenosa* - ispitivanjem dostupnih ruta (SFPS, *Sorted Feasible Paths Searching*) rešava se problem pronalaska rute. Rute se sortiraju prema broju linkova, odnosno veći broj linkova predstavlja i veće troškove u definisanoj funkciji. Dodela spektra vrši se fiksno ili adaptivno. Fiksno podrazumeva da se celokupan spektar deli na nekoliko spektralnih segmenata iste fiksne širine, a adaptivno da se ukupan spektar deli na nekoliko spektralnih segmenata različite širine.

*First-Last Fit spectrum allocation* (FLF) – ukupan spektar odnosno svi raspoloživi frekvencijski slotovi dele se na nekoliko tzv. particija metodom bojenja grafova. *First-Last Fit* princip se koristi za dodelu spektra. Sa liste raspoloživih slotova iz neparnih particija bira se najniže indeksiran slot, a iz parnih particija najviše indeksiran slot. Analizirani RSA algoritmi sažeti su u tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Poređenje RSA algoritama [114]

Algoritam	Izbor rute	Dodela opsega	Baza
Greedy-RWSA	BFS (Bread First Search), ispituje susedne čvorove	Greedy-RWSA	Talasna dužina
KPaths-RWSA	KSP (K-Shortest Paths)	KPaths-RWSA	Talasna dužina
SP-RWSA	KSP, (k=1)	SP-RWSA	Talasna dužina
AFA-CA	SP (Shortest Path)	AFA-CA	FS
SPSR	SP	First Fit	Podnosilac
BLSA	KSP	First Fit	Podnosilac
SM-RSA	Bhandari algoritam	SM-RSA	Podnosilac
MI-RSA	Dijkstra	FF	Podnosilac
QPS	Floyd-Warshal	FF, Random	FS
QPF	Floyd-Warshal	FF, Random	FS
LFA	KSP	SP-FF	FS
AUR-ESS	Dijkstra	AUR-ESS (Exhaustive)	FS
MCAP	HC-MCAP	CA-SA	FS
PADR	-	FF	Spektralni blok
PSPADR	-	FF	Spektralni blok
FS-SFPS	SFPS	Fiksna segmentacija	Spektralni segment
AS-SFPS	SFPS	Adaptivna segmentacija	Spektralni segment
FLF	-	FLF	Podnosilac

Određen broj algoritama koji uzimaju u obzir statički saobraćajni scenario ima za cilj minimizaciju verovatnoće blokiranja zahteva ( $Q_1$ ) dok se u većini slučajeva kriterijumska funkcija odnosi na unapređenje iskorišćenosti spektra ( $Q_2$ ). Dinamički algoritmi se uglavnom baziraju na minimizaciji verovatnoće blokiranja ( $Q_3$ ). Faktori na osnovu kojih se pojedini algoritmi mogu porediti uzimajući u obzir navedene kriterijumske funkcije dati su sledećim izrazima [114]:

$$Q_1 = \frac{\text{VerovatnoćaBlokiranja}}{\text{Saobraćaj} \times |N| \times |L| \times |S|} \quad (5.1)$$

$$Q_2 = \frac{\text{IskorišćenostSpektra}}{\text{Saobraćaj} \times |N| \times |L| \times |S|} \quad (5.2)$$

$$Q_3 = \frac{\text{VerovatnoćaBlokiranja}}{\text{Saobraćaj} \times |N| \times |L| \times |S|} \quad (5.3)$$

gde su:

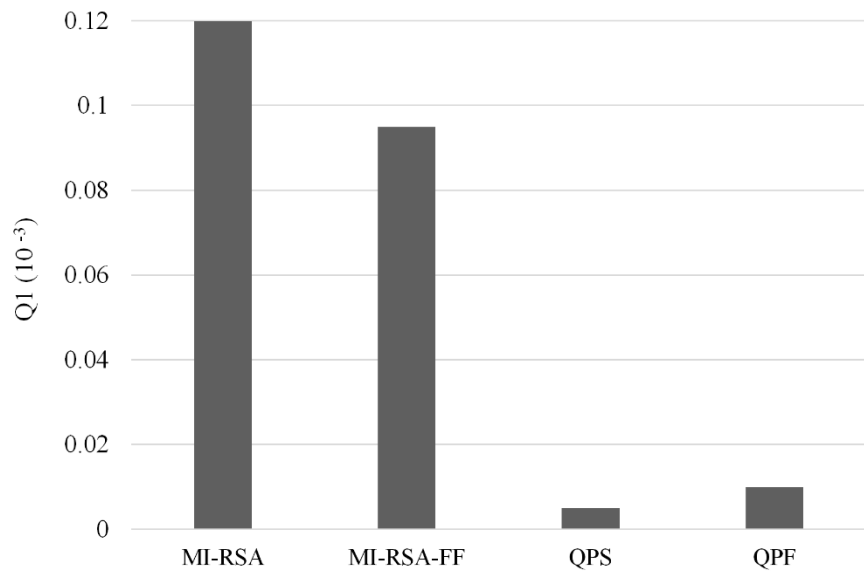
$N$  - broj čvorova mreže,

$L$  - broj linkova i

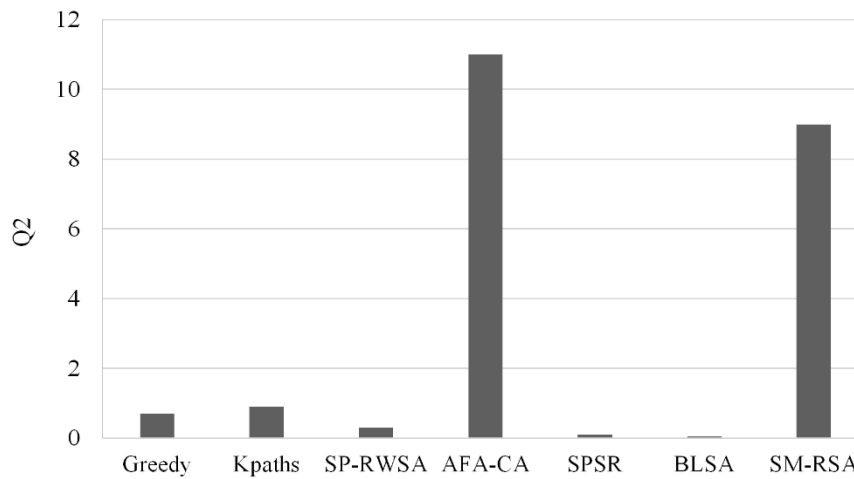
$S$  - broj frekvencijskih slotova.

Kako bi poređenje bilo preciznije moguće je menjati parametar  $S$ , tako da se u istu grupu mogu svrstati svi algoritmi kojima je baza npr. spektralni blok, a u drugu grupu algoritmi kojima je baza segment itd. Vrednosti  $Q$  faktora prikazane su na slici 5.4. Iz grupe statičkih RSA algoritama koji minimiziraju verovatnoću blokiranja najbolje rezultate daje QPS. Iz grupe statičkih RSA kojima se maksimizira iskorišćenost spektra najbolje rezultate daje AFA-CA, a zatim SM-RSA. Na kraju, kod dinamičkih RSA algoritama koji minimiziraju verovatnoću blokiranja, najbolje rezultate daje MCAP.

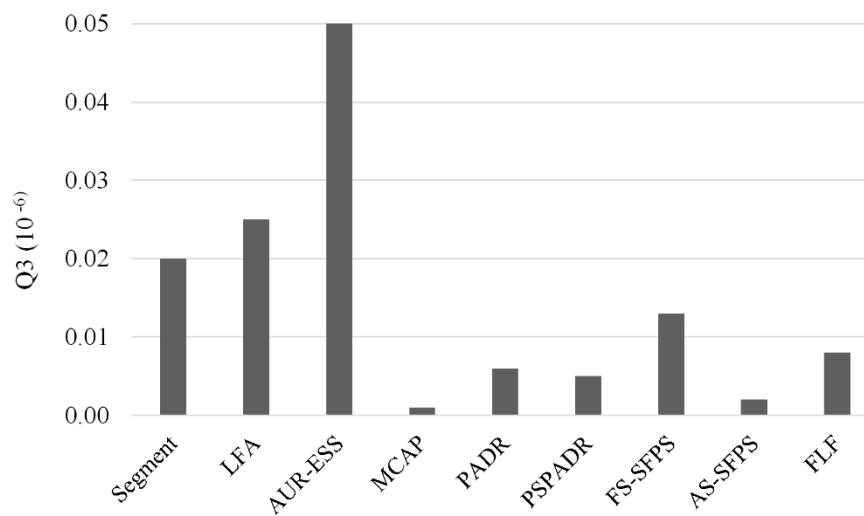
U zavisnosti od primenjenih metoda rutiranja, računarska složenost algoritama je različita u smislu broja operacija koje algoritam izvršava. Ukoliko je baza algoritma manja, složenost je veća i obrnuto. Najmanja granularnost jeste kada je baza frekvencijski slot, zatim podnosilac, spektralni blok, segment, pa talasna dužina. Uzimajući to u obzir, algoritmi su podeljeni u četiri grupe. Prvu grupu čine algoritmi BLSA, SPSR, AFA-CA i SM-RSA, koji imaju najviši nivo računarske složenosti. Druga grupa algoritama FLF, QPS, QPF i AUR-ESS ima manju složenost. Zatim dolaze algoritmi treće grupe (*Greedy* RWSA, *Kpath* RWSA, SP RWSA, MI-RSA, PADR, PSPADR, MCAP) sa još manjim nivoom računarske složenosti. Četvrtu grupu čine algoritmi sa najmanjom računarskom složenošću: LFA, FS-SFPS, AS-SFPS.



a)



b)



c)

Slika 5.4. Evaluacija performansi RSA algoritama: a) statički RSA- verovatnoća blokiranja; b) statički RSA- iskorišćenost spektra i c) dinamički RSA- verovatnoća blokiranja [114]

## 5.7. Rešavanje statičkog RSA problema i numerički rezultati

Statički RSA problem može se definisati na sledeći način: za poznatu matricu saobraćajnih zahteva u kojoj svaki element predstavlja zahtevani broj frekvencijskih slotova za uspostavljanje puta svetlosti između pojedinih čvorova u fizičkoj topologiji mreže, pri datom skupu RSA ograničenja, potrebno je izabrati rute i dodeliti frekvencijske slotove putevima svetlosti tako da se optimizuje neka od izabranih kriterijumskih funkcija. Neke od mogućih kriterijumskih funkcija su:

- uspostaviti sve zahtevane puteve svetlosti tako da se minimizira upotreba ukupnog spektra, odnosno ukupan broj frekvencijskih slotova zauzetih u mreži (ili na svakom linku),
- maksimizirati ukupan broj uspostavljenih puteva svetlosti pri ograničenju broja raspoloživih slotova na pojedinim linkovima ili mreži.

Egzaktno rešavanje RSA problema zasniva se na primeni optimizacionih modela formulisanih preko zadatka celobrojnog linearnog programiranja. Međutim zbog NP- kompleksnosti rešavanja problema (vreme rešavanja NP i NP-teških problema sa povećanjem dimenzija ulaznih podataka raste brže od polinomijalnog vremena eksponencijalnim trendom), ovakav pristup se može primeniti jedino na probleme manjih dimenzija tj. za mreže sa ograničenim brojem čvorova i linkova, i za jednostavnije saobraćajne scenarije. Povećanjem dimenzija ulaznih podataka automatski se povećava broj varijabli i ograničenja, a time i vreme potrebno za izvršavanje algoritma. Vreme izvršavanja algoritma može biti neprihvatljivo dugo a nekada se rešenje i ne može pronaći.

U nastavku rada prikazana je jedna od matematičkih formulacija za rešavanje statičkog RSA problema, gde je kriterijum optimalnosti minimizacija ukupnog broja frekvencijskih slotova zauzetih u mreži. Navedeni skupovi ograničenja odnose se na osnovna RSA ograničenja koja moraju biti zastupljena u svakom RSA ILP optimizacionom modelu. Za rešavanje ovog problema razvijen je programski kod, a testiranja su sprovedena pomoću programskog paketa Matlab korišćenjem *Intel(R) i5* računarskog procesora na 3.2 GHz i 8 GB RAM-a. Programski kod razvijen za rešavanje definisanog ILP modela pruža mogućnost pronalaska optimalnog rešenja problema.

### 5.7.1. Postavka problema

Ulazni parametri:

- Optička mreža se posmatra kao graf  $G = (N, L)$ , gde je  $N$  skup čvorova mreže a  $L$  skup linkova u fizičkoj topologiji mreže  $(l_1, l_2, l_3, \dots)$ .
- Pretpostavka je da svaki fizički link raspolaže sa jednim posebnim optičkim vlaknom za svaki smer prenosa.
- Broj slotova po linku je unapred poznat i označen sa  $F = (f_1, f_2, \dots, f_{|F|})$ .
- Matrica saobraćajnih zahteva specificirana je potrebnim brojem slotova između svakog para čvorova, odnosno svaka konekcija,  $d$ , sa izvornim ( $s_d$ ) i odredišnim čvorom ( $d_d$ ) prevodi se (mapira) u određen broj zahtevanih slotova ( $n_d$ ). Prema tome, za svaku konekciju je poznato:  $s_d, d_d, n_d$ , respektivno. Ukupan broj zahteva je označen sa  $D$ .
- Podskup potencijalnih  $k$ - najkraćih ruta između para čvorova označen je sa  $P_d$ , ukupan broj ruta sa  $P = (p_1, p_2, \dots)$ , a podskup  $P_l \subseteq P$  označava sve rute koje sadrže link  $l$ .

Izlaz: Broj frekvencijskih slotova zauzetih na svim linkovima mreže.

Cilj: rešavanje statičkog RSA problema izborom odgovarajućih ruta i dodela frekvencijskih slotova zahtevanim putevima svetlosti tako da ukupan broj zauzetih slotova na svim linkovima mreže bude minimalan.

### 5.7.2. Matematička formulacija

U posmatranom ILP modelu figurišu sledeće celobrojne (binarne) varijable:

$x_{pf} \in (0, 1)$  - jednaka 1, ukoliko slot  $f \in F$  predstavlja najniži indeksiran slot na ruti  $p \in P$  dodeljen zahtevanom putu svetlosti, 0 u suprotnom.

$y_{pf} \in (0, 1)$  - jednaka 1, ukoliko je slot  $f \in F$  na ruti  $p \in P$  dodeljen zahtevanom putu svetlosti, 0 u suprotnom.

$x_{lf} \in (0, 1)$  - jednaka 1, ukoliko je slot  $f \in F$  zauzet na linku  $l \in L$ , 0 u suprotnom.

Kriterijumska funkcija podrazumeva minimizaciju ukupnog broja frekvencijskih slotova zauzetih na svim linkovima mreže i može se formulisati kao:

$$F = \sum x_{lf} \quad (5.4)$$

pri sledećim ograničenjima:

$$\sum_{p \in P_d} \sum_{f \in F} x_{pf} = 1, \quad \forall d \in D \quad (5.5)$$

$$x_{pf_i} - y_{pf_j} \leq 0, \quad \forall d \in D, \forall p \in P_d, \forall f_i, f_j \in F,$$

$$i = 1, \dots, |F| - n_d + 1 \text{ i } j = i, \dots, i + n_d - 1 \quad (5.6)$$

$$x_{pf_i} = 0, \quad \forall d \in D, \forall p \in P_d, \forall f_i \in F, i = |F| - n_d + 2, \dots, |F| \quad (5.7)$$

$$\sum_{p \in P_l} y_{pf} - x_{lf} = 0, \quad \forall l \in L, \forall f \in F \quad (5.8)$$

$$\sum_{p \in P_d} \sum_{f \in F} y_{pf} = n_d, \quad \forall d \in D \quad (5.9)$$

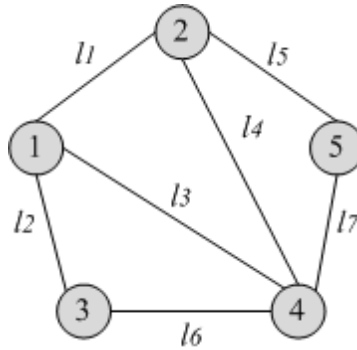
$$x_{pf}, y_{pf}, x_{lf} \in (0, 1), F \in \mathbb{Z}^+, \forall p \in P, \forall f \in F, \forall l \in L \quad (5.10)$$

Skup ograničenja datih relacijom (5.5) odnosi se na izbor rute i slota sa najnižim indeksom koji je dodeljen konekciji  $d$ . Ograničenja (5.6) odnose se na susednost slotova, što znači da, ako je slot  $f_i$  izabran kao slot sa najnižim indeksom i dodeljen konekciji  $d$ , sledeći susedni slot  $f_j$  je takođe namenjen konekciji  $d$ . Ograničenja koja se odnose na zauzetost spektra data su relacijom (5.7), dok skup ograničenja (5.8) obezbeđuje da svaki slot na jednom linku može istovremeno biti dodeljen najviše jednom putu svetlosti kako bi se izbeglo preklapanje. Skup ograničenja (5.9) obezbeđuje da se svakom zahtevu dodeljuje tačno onoliko slotova koliko se zahteva u matrici zahteva  $D$ . Ograničenja (5.10) podrazumevaju da sve varijable binarnog tipa uzimaju vrednost 0 ili 1.

### 5.7.3. Rezultati simulacije

Formulisani ILP model RSA problema rešavan je na primeru optičke transportne mreže sa 5 čvorova i 7 linkova, prikazane na slici 5.5. Saobraćajni zahtevi između parova čvorova, izraženi preko

potrebnog broja frekvencijskih slotova generisani su na slučajan način. Zahtevani broj slotova za pojedine parove čvorova uzima vrednosti između 1-5. Simulacija je sprovedena za saobraćajne scenarije sa 5, 10 i 15 zahteva u mreži i različit broj raspoloživih slotova po linkovima. Broj najkraćih ruta za svaki par čvorova je  $k = 2$ .



Slika 5.5. Topologija posmatrane optičke mreže

Dobijeni rezultati za broj zauzetih slotova u mreži, ukupan broj promenljivih kao i potrebno CPU vreme prikazani su u tabeli 5.4. Iz tabele se može primetiti da je predloženi model pronašao optimalna rešenja za sve date scenarije sa manjim brojem saobraćajnih zahteva u mreži. Poteškoće se javljaju za veći broj zahteva i veći broj raspoloživih slotova po linkovima jer se broj ograničenja i promenljivih značajno povećava, kao i vreme potrebno za pronalazak rešenja (scenario saobraćaja sa 15 zahteva i 10 raspoloživih slotova po linkovima prikazan u tabeli 5.4).

Tabela 5.4. Optimalna RSA rešenja za posmatranu mrežu

Ukupan broj zahteva ( $D$ )	Raspoloživi broj slotova na linkovima ( $F$ )	Broj zauzetih slotova u mreži	Ukupan broj promenljivih	CPU vreme [s]
5	5	11	140	3.28
5	10	11	280	3.95
10	5	23	280	5.47
10	10	23	480	34.14
15	10	40	680	826.12

Tabela 5.5. Saobraćajni scenario sa  $D = 10$  zahteva

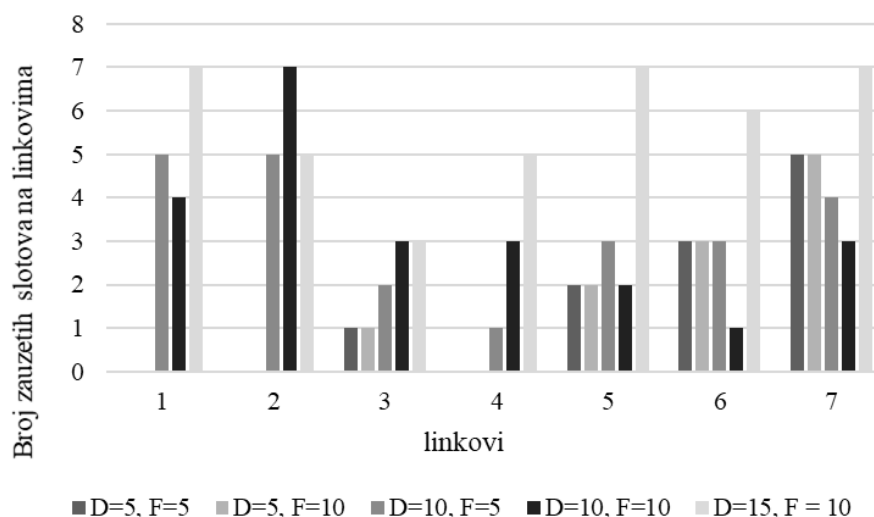
Saobraćajni zahtev	$s_d$	$d_d$	$k = 2$	$n_d$
1	1	2	(1, 2) (1, 4, 2)	2
2	1	3	(1, 3) (1, 4, 3)	1
3	1	4	(1, 4) (1, 3, 4)	2
4	1	5	(1, 2, 5) (1, 4, 5)	1
5	2	3	(2, 1, 3) (2, 4, 3)	2
6	2	4	(2, 4) (2, 5, 4)	1
7	2	5	(2, 5) (2, 4, 5)	2
8	3	4	(3, 4) (3, 1, 4)	2
9	3	5	(3, 4, 5) (3, 1, 2, 5)	3
10	4	5	(4, 5) (4, 2, 5)	1

Kako bi se detaljnije prikazao pronalazak optimalnih rešenja primenom navedenog modela, ilustrovan je saobraćajni scenario sa  $D = 10$  zahtevanih konekcija i brojem slotova po linku  $F = 5$ . Za svaki zahtev prikazani su izvorni i odredišni čvor, rute i zahtevani broj slotova (tabela 5.5.). Za navedeni scenario sa  $D = 10$  zahteva, prikazana je zauzetost frekvencijskih slotova po linkovima i ukupan broj zauzetih slotova u mreži (tabela 5.6.). 1 znači da je slot zauzet, 0 u suprotnom.

Tabela 5.6. Rešenja za scenario sa  $D = 10$  zahteva

	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
link 1	1	1	1	1	1
link 2	1	1	1	1	1
link 3	0	0	1	1	0
link 4	1	0	0	0	0
link 5	1	1	1	0	0
link 6	1	0	0	1	1
link 7	0	1	1	1	1
$\Sigma$	23				

Opterećenost linkova u mreži za sve testirane scenarije, izražena brojem zauzetih frekvencijskih slotova na svakom pojedinačnom linku u zavisnosti od broja saobraćajnih zahteva prikazana je na slici 5.6.



Slika 5.6. Opterećenost linkova u posmatranoj mreži

## 5.8. Tehnika optičke agregacije saobraćaja

Tehnika agregacije saobraćaja, prvobitno primenjena u WDM optičkim mrežama, podrazumeva grupisanje manjih saobraćajnih zahteva u optičke putanje većeg kapaciteta. Električni signali su grupisani a zatim konvertovani u optički. Posledica je veliki broj O/E/O konverzija signala koje izazivaju kašnjenje u čvorovima mreže. Kako bi se to izbeglo, konekcije se mogu grupisati direktno na optičkom sloju bez konverzija signala. Takođe, optimizacijom broja ADM (*Add/Drop Multiplexer*) multipleksera koji su rezervisani u svakom čvoru za samo jednu talasnu dužinu, utiče se na smanjenje troškova i propusnost mreže. Tehno-ekonomska evaluacija postupka električnog naspram optičkog grupisanja analizirana je u [119].

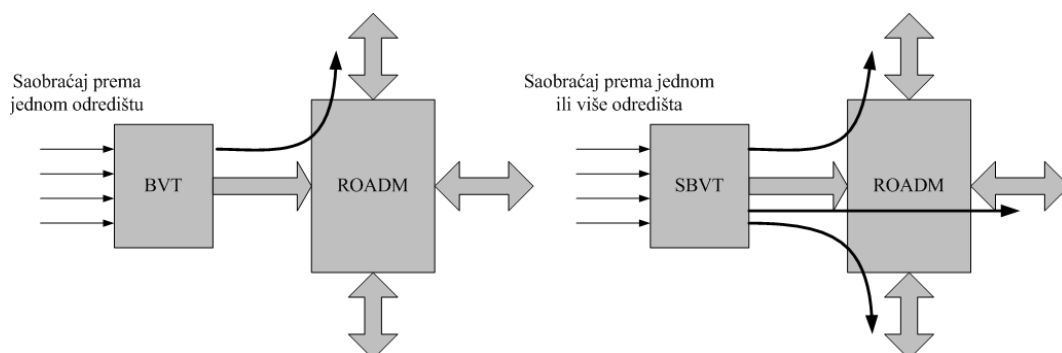


### 5.8.1. Prednosti tehnike agregacije saobraćaja na optičkom nivou

Spektralna efikasnost u EON mrežama može se poboljšati pomoću nekoliko tehnika koje su prikazane u [120]. Agregacija saobraćaja jedna je od potencijalnih tehnika koju omogućava OFDM postupak modulacije i multipleksiranja. U disertaciji se istražuje izvorno grupisanje, odnosno koncept gde se jedan optički predajnik koristi za generisanje više konekcija koje imaju isti izvorni čvor i bar jedan zajednički link počevši od izvornog čvora. Tako grupisane konekcije ili optičke putanje čine optički tunel. Kapacitet optičkog tunela definisan maksimalnim brojem slotova jednak je kapacitetu samog predajnika. Prema tome, sa IP sloja se na optički sloj prebacuju one konekcije koje imaju isti izvorni čvor.

Prednosti agregacije konekcija na optičkom sloju posmatraju se sa dva aspekta. Prvi se odnosi na iskorišćenje kapaciteta optičkog predajnika, a drugi na spektralnu uštedu. Kapacitet optičkog predajnika tipično je veći od zahtevanog kapaciteta jednog puta svetlosti, a koristi se za transmisiju više optičkih konekcija, različitih po veličini. Isti nije moguće iskoristiti na najbolji način ukoliko se svaka konekcija multipleksira pojedinačno. Agregacijom konekcija moguće je postići efikasnije korišćenje optičkih predajnika, odnosno smanjiti njihov potreban broj u mreži. Druga prednost agregacije ogleda se u spektralnoj uštedi. Da bi se izbegla interferencija i razdvojile konekcije potrebno je koristiti zaštitne opsege koji uzrokuju neracionalno trošenje spektra. Zbog ortogonalnosti podnosilaca, sve konekcije sa istim početnim čvorom mogu se grupisati u jedan optički tunel i tada između njih nisu potrebni zaštitni opsezi. Zaštitni opseg je potreban samo između različitih tunela, kao i za razdvajanje konekcija u tranzitnim čvorovima, čime se ostvaruju značajne spektralne uštede. Koncept optičke agregacije saobraćaja i optičkog tunela analiziran je u nekoliko ranijih studija [20], [52-54], [121], koje su bile polazna osnova za razvoj algoritama koji se bave navedenim problemom.

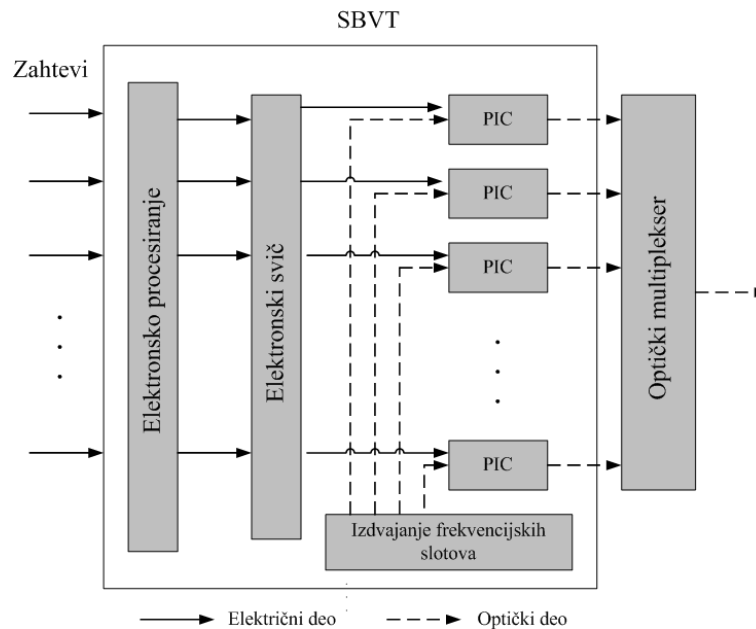
Sa aspekta arhitekture, koncept agregacije konekcija na optičkom nivou omogućava SBVT (*sliceable BVT*) ili elastični BVT, koji predstavlja unapređenu verziju BVT. BVT se softverski prilagođava parametrima i centralnoj frekvenciji dolaznog signala i podržava prenos velikim brzinama primenom spektralno efikasnih tehnika modulacije. Međutim, kada BVT radi na nižoj od maksimalne brzine prenosa, zbog karakteristika zahtevanog puta svetlosti, deo njegovog kapaciteta nije iskorišćen. Zbog toga je predložen SBVT [3], [122-125] kako bi se unapredila elastičnost. SBVT ima sposobnost dodeljivanja kapaciteta jednoj ili više optičkih konekcija koje se prenose na jedno ili više odredišta za razliku od BVT. Kada SBVT generiše optičku konekciju manjeg intenziteta, njegovi slobodni kapaciteti mogu se koristiti za generisanje drugih nezavisnih konekcija. Na slici 5.7. prikazana je razlika između BVT i SBVT.



Slika 5.7. Funkcionalnost BVT i SBVT [3]

Na slici 5.8. izdvojena je arhitektura SBVT koja podrazumeva: izvor koji vrši predaju frekvencijskih slotova (podnosilaca) jednakog razmaka, modul za elektronsko procesiranje, elektronski komutator, integrisano optičko kolo (PIC, *Photonic Integrated Circuit*) i rekonfigurabilni optički multiplekser

(ROADM). Izvor koji radi na više talasnih dužina vrši predaju podnosilaca ili slotova, a moguće ga je zameniti sa više lasera, po jedan za svaki podnosilac. Svaki zahtev se elektronski procesira, a onda se dalje rutira prema određenom optičkom kolu (PIC). Zatim se vrši izdvajanje slotova. Svaki PIC se koristi kao predajnik i podržava različite vrste modulacije. Agregacija se vrši u optičkom multiplekseru, gde se može formirati superkanal potreban za uspostavljenje konekcija sa velikim zahtevanim intenzitetom saobraćaja.



Slika 5.8. Arhitektura SBVT [3]

### 5.8.2. Ograničenja pri rešavanju problema optičke agregacije saobraćaja

Tehnika optičke agregacije saobraćaja čini RSA problem složenijim, jer se pored izvornih RSA ograničenja moraju uzeti u obzir i ograničenja koja se odnose na raspoložive kapacitete i funkcionalnosti optičkih predajnika. Prema tome, osnovna ograničenja koja figurišu u ovom problemu su:

- RSA ograničenja susedstva i kontinuiteta frekvencijskih slotova,
- generisanje grupisanih konekcija u okviru spektralnog opsega predajnika,
- broj grupisanih konekcija u optičkom tunelu ograničen je raspoloživim kapacitetom predajnika izraženim brojem frekvencijskih slotova.

### 5.8.3. Matematička formulacija problema optičke agregacije saobraćaja

Problem optičke agregacije saobraćaja može se formulirati na sledeći način: za datu fizičku topologiju mreže, poznatu matricu saobraćajnih zahteva ( $A_{sd}$ ) i dati skup ograničenja, potrebno je minimizirati ukupan zauzeti spektar ili ukupan broj zauzetih slotova u mreži. Pretpostavka je da se uspostavljaju sve konekcije, grupisanim po optičkim tunelima, koji po kapacitetu, odnosno broju frekvencijskih slotova nisu veći od (može biti i manji) kapaciteta optičkog predajnika.

U nastavku rada data je egzaktna formulacija problema predložena u [54] s obzirom da su određeni rezultati testiranja iz disertacije upoređeni sa rezultatima iz date formulacije, a i sa ciljem da se predstavi kompleksnost ILP modela zbog čega i nemaju primenu u mrežama većih dimenzija. Funkcija cilja podrazumeva minimizaciju zauzetog optičkog spektra ili ukupnog broja optičkih predajnika uz pretpostavku uspostavljanja svih konekcija:  $\min C_{total}(T_{total})$ .

U formulaciji figurišu sledeće varijable:

$C_l$  - broj zauzetih slotova na linku  $l$ ,  $l \in L$

$C_{total}$  - ukupan broj zauzetih slotova u mreži (na svim linkovima)

$T_{total}$  - broj optičkih predajnika potrebnih za uspostavljanje svih konekcija

$x_{sdi}$  - binarna varijabla koja uzima vrednost 1, ukoliko je ruta  $p_i \in P_{sd}$  zauzeta, pri čemu  $P_{sd}$  predstavlja skup alternativnih ruta za par čvorova  $(s, d)$ , u suprotnom uzima vrednost 0

$f_{sd}$  - celobrojna varijabla koja označava početni slot konekcije  $(s, d)$

$F_{sd}$  - celobrojna varijabla koja označava početni slot tunela koji sadrži konekciju  $(s, d)$

$G_{ij}^{sd, sd'}$  - binarna varijabla koja uzima vrednost 1 ako se konekcija  $(s, d)$  uspostavlja preko rute  $p_i$ , ako se preko pojedinih linkova te rute uspostavlja i konekcija  $(s, d')$  i ove dve konekcije su grupisane u optički tunel; u suprotnom uzima vrednost 0.

$\delta^{sd, s'd'}$  - binarna varijabla koja uzima vrednost 1, ako je početni slot konekcije  $(s, d)$  veći od početnog slot konekcije  $(s', d')$ ; 0 u suprotnom.

$M_{sd, sd'}$  - binarna varijabla koja uzima vrednost 1, ako se konekcija  $(s, d)$  uspostavlja preko istog predajnika kao i konekcija  $(s', d')$ ; 0 u suprotnom.

$T_{sd}$  - binarna varijabla koja uzima vrednost 1, ako se konekcija  $(s, d)$  uspostavlja preko posebnog predajnika, a ukoliko deli predajnik sa drugom konekcijom uzima vrednost 0.

Zahtevani kapacitet svih konekcija u mreži dat je kao:  $W = \sum_{s,d} \Lambda_{sd}$

ILP formulacija podrazumeva sledeća ograničenja:

$$C_{total} = \sum_l C_l, \quad l \in L \quad (5.11)$$

$$C_l \geq f_{sd} + \Lambda_{sd} + 2g - 1 - W \times (1 - x_{sdi}),$$

$$\forall (s, d), l, p_{sdi}: (p_{sdi} \in P_{sd}) \cap (l \in p_{sdi}) \quad (5.12)$$

$$T_{total} = \sum_{s,d} T_{sd} \quad (5.13)$$

Prethodno navedena ograničenja odnose se na funkciju cilja odnosno na troškove mreže.

$$\sum_{p_i \in P_{sd}} x_{sdi} = 1, \quad \forall (s, d) \quad (5.14)$$

Ograničenje (5.14) obezbeđuje da se konekcija  $(s, d)$  rutira preko samo jedne rute  $p_i$ .

Za sve konekcije  $(s, d)$  i  $(s', d')$  za koje važi  $p_i \in P_{sd}$  i  $p_j \in P_{s'd'}$ , i ako  $p_i$  i  $p_j$  imaju najmanje jedan zajednički link  $l$  počevši od izvornog čvora tj.  $s = s'$ , moguće je izvršiti grupisanje i figurišu sledeća ograničenja:

$$\delta^{sd, s'd'} + \delta^{s'd', sd} = 1 \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned}
 & (1 - \delta^{s'd',sd} + 2 - x_{sdi} - x_{s'd'j}) \times (W + 2g) \\
 & \geq \begin{cases} f_{sd} + \Lambda_{sd} + 2g \times (1 - G_{ij}^{sd',sd}) - f_{s'd'}, & s = s' \cap d \neq d' \\ f_{sd} + \Lambda_{sd} + 2g - f_{s'd'}, & s \neq s' \end{cases} \quad (5.16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (1 - \delta^{sd,s'd'} + 2 - x_{sdi} - x_{s'd'j}) \times (W + 2g) \\
 & \geq \begin{cases} f_{s'd'} + \Lambda_{s'd'} + 2g \times (1 - G_{ij}^{sd,sd'}) - f_{sd}, & s = s' \cap d \neq d', \\ f_{s'd'} + \Lambda_{s'd'} + 2g - f_{sd}, & s \neq s' \end{cases} \quad (5.17)
 \end{aligned}$$

Ograničenja (5.15)- (5.17) podrazumevaju da ako je početni slot  $f_{sd}$  konekcije  $(s, d)$  na linku  $l$ , veći od početnog slota  $f_{s'd'}$  konekcije  $(s', d')$  na istom linku, tada je varijabla  $\delta^{sd,s'd'}$  jednaka 1, varijabla  $\delta^{s'd',sd}$  jednaka 0 i  $f_{sd}$  mora biti veće od  $f_{s'd'}$ , minimalno za kapacitet konekcije  $(s', d')$  i obrnuto. Ograničenja (5.16) i (5.17) podrazumevaju da ako su konekcije  $(s, d)$  i  $(s', d')$  grupisane, između njih nema zaštitnih opsega.

$$\sum_i \sum_j G_{ij}^{sd,sd'} \leq 1, \quad \forall (s, d), (s', d') \quad (5.18)$$

Ograničenjem (5.18) postiže se da konekcije  $(s, d)$  i  $(s', d')$  mogu biti grupisane samo jednom preko odgovarajuće rute.

$$G_{ij}^{sd,sd'} = G_{ji}^{sd,sd'} \quad (5.19)$$

Ograničenje (5.19) podrazumeva da ako je konekcija  $(s, d)$  grupisana sa konekcijom  $(s, d')$ , tada i konekcija  $(s, d')$  mora biti grupisana sa  $(s, d)$ .

$$F_{sd} \leq f_{sd}, \quad \forall (s, d) \quad (5.20)$$

$$f_{sd} + \Lambda_{sd} \leq F_{sd} + U, \quad \forall (s, d) \quad (5.21)$$

Ograničenja (5.20) i (5.21) znače da je početni slot odgovarajuće konekcije jednak ili veći od početnog slota optičkog tunela koji sadrži datu konekciju a krajnji slot konekcije jednak ili manji od krajnjeg slotu tunela.

$$F_{sd} - F_{sd} \leq W \left(1 - G_{ij}^{sd,sd'}\right), \quad d \neq d', \forall (s, d), (s, d'), (i, j) \quad (5.22)$$

$$F_{s'd'} - F_{sd} \leq W \left(1 - G_{ij}^{s'd',sd}\right), \quad d \neq d', \forall (s, d), (s, d'), (i, j) \quad (5.23)$$

Ograničenja (5.22) i (5.23) podrazumevaju da ako su konekcije  $(s,d)$  i  $(s, d')$  grupisane u jedan optički tunel, tada je početni slot tunela konekcije  $(s, d)$  isti kao i kod tunela konekcije  $(s, d')$ .

$$M_{sd,sd'} \leq \sum_i \sum_j G_{ij}^{sd,sd'} \quad (5.24)$$

$$\sum_{d'} M_{sd,sd'} + T_{sd} = 1 \quad (5.25)$$

$$M_{sd,sd'} \leq T_{sd'} \quad (5.26)$$

$$M_{sd, sd'} - \sum_i G_{ij}^{sd, sd'} - T_{sd'} \geq -1 \quad (5.27)$$

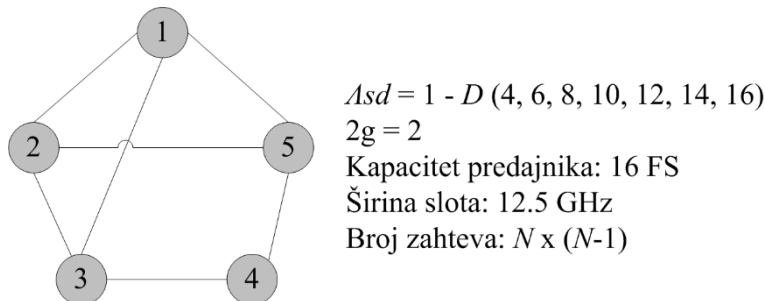
Ograničenje (5.24) podrazumeva da grupisane konekcije  $(s, d)$  i  $(s, d')$  dele isti predajnik. Ograničenje (5.25) podrazumeva da se konekcija  $(s, d)$  uspostavlja preko posebnog optičkog predajnika ili deli predajnik sa grupisanom konekcijom. Ostatak ograničenja odnosi se na konekciju  $(s, d')$  i zauzimanje kapaciteta odgovarajućeg predajnika definisanog maksimalnim brojem frekvencijskih slotova.

Broj varijabli i ograničenja koja se javljaju u navedenoj ILP formulaciji zavise od broja potencijalnih ruta koje se mogu grupisati, kao i linkova koji su zajednički pojedinim rutama. Binarne varijable  $\delta^{sd, sd'}$  i ograničenja (5.15)- (5.17) javljaju se u slučaju kada konekcije  $(s, d)$  i  $(s', d')$  imaju zajednički minimalno jedan link. U najsloženijem slučaju, gde sve konekcije imaju rute koje dele linkove sa drugim konekcijama, ILP formulacija bi zahtevala  $N^4 \delta^{sd, s'd'}$  varijabli i  $N^4$  ograničenja u jednačini (5.15). Praktično, kada nema mnogo ruta koje imaju zajedničke linkove, potrebno je najmanje  $N^3$  varijabli i ograničenja.

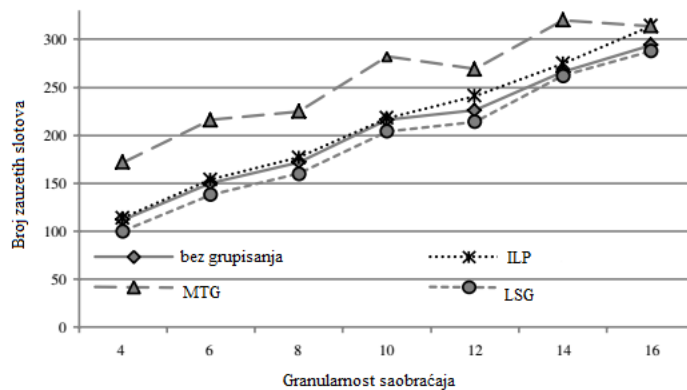
Binarne varijable  $G_{ij}^{sd, sd'}$  postoje kada se mogu grupisati rute konekcija  $(s, d)$  i  $(s, d')$ . U najsloženijem slučaju, kada se mogu grupisati sve konekcije koje imaju isti izvorni čvor, broj varijabli i ograničenja je  $k^2 N^3$  u jednačinama (5.16), (5.17), (5.19) i (5.22), gde se  $k$  odnosi na broj  $k$ - najkraćih ruta. Ukupno posmatrajući, broj varijabli i ograničenja koja se mogu javiti u ILP formulaciji optičke agregacije saobraćaja, za scenario sa maksimalnim grupisanjem konekcija je:

$$(N^4 + k^2 N^3 + N^3 + (k+2)N^2) \text{ i } (N^4 + 4k^2 N^3 + 4N^3 + (k+4)N^2).$$

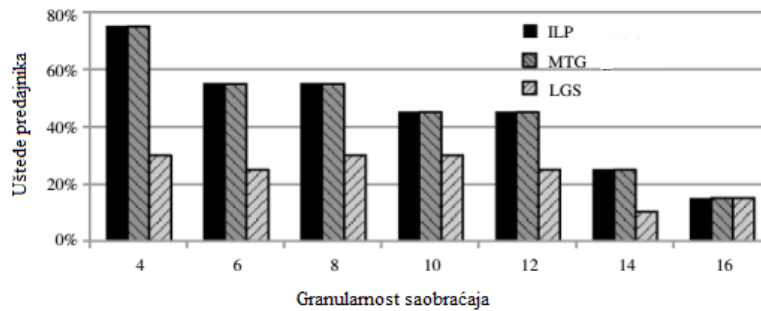
Kompleksnost modela u pogledu broja varijabli i ograničenja podrazumeva primenu na mreže manjih dimenzija. U nastavku je prikazan primer gde je model primenjen na mrežu sa 5 čvorova i 7 linkova (topologija prikazana na slici 5.9.), kao i uštede u pogledu optičkog spektra (slika 5.10.) i broja predajnika (slika 5.11.) [54].



Slika 5.9. Primer manje mreže na kojoj je testiran ILP model [54]



Slika 5.10. Ukupan broj zauzetih slotova/optički spektar [54]



Slika 5.11. Uštede predajnika [54]

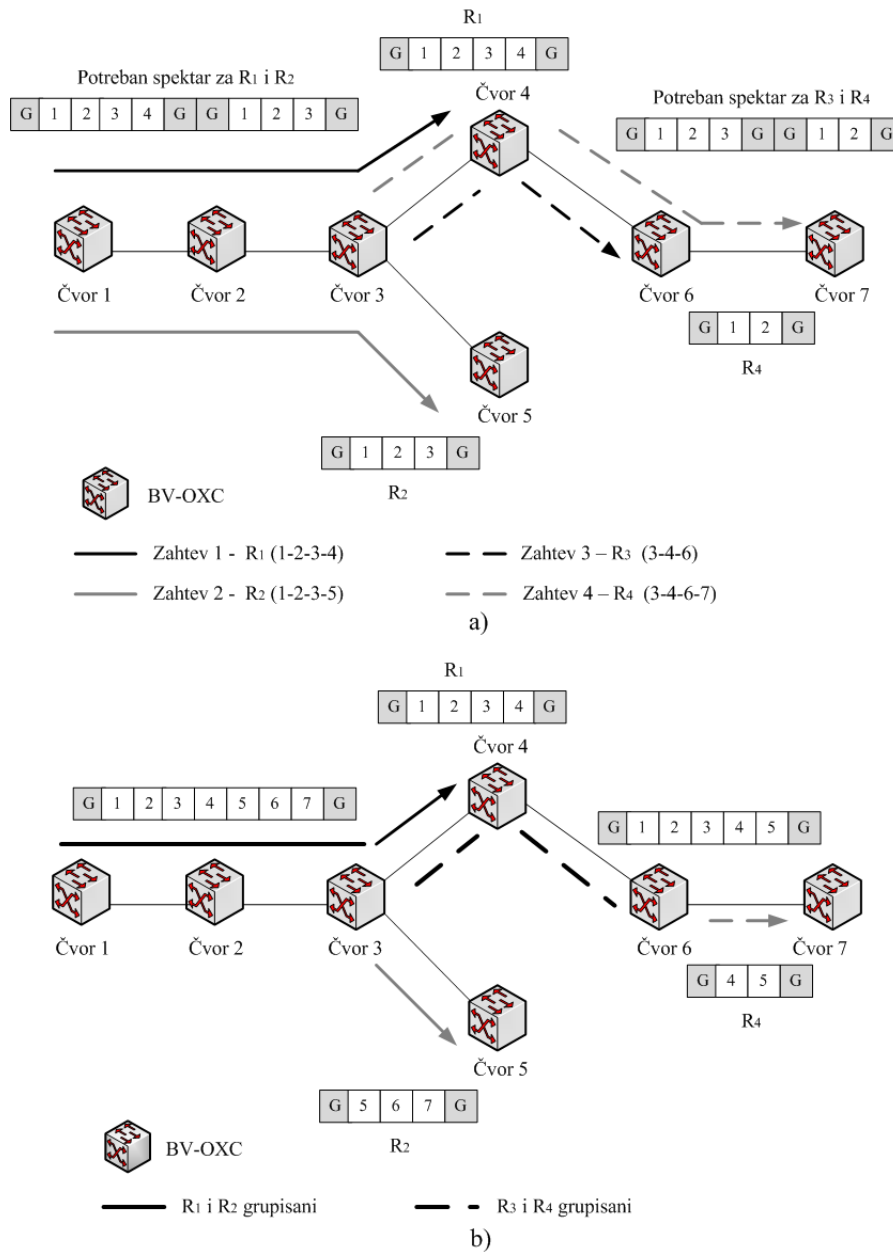
#### 5.8.4. Koncept optičke agregacije saobraćaja

Na primeru manje optičke mreže sa nekoliko zahteva (slika 5.12.) ilustrovan je koncept agregacije saobraćaja u optičkom domenu i prikazane su ostvarene spektralne uštede, kao i potreban broj optičkih predajnika. Optičke konekcije koje imaju isti početni čvor, koje generiše isti SBVT, grupišu se u optički tunel. Konekcije koje imaju isti izvor, a različito odredište, mogu se izdvojiti u svakom tranzitnom čvoru duž rute i dalje rutirati preko BV-OXC. Pretpostavljena su 4 zahteva/konekcije ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  i  $R_4$ ) sa potencijalnim rutama i zahtevanim brojem slotova, prikazanim u tabeli 5.5. Da bi se pojedinačno multipleksirala svaka konekcija, potrebni su zaštitni opsezi za koje je u ovom primeru pretpostavljeno da iznose 2 frekvencijska slota (po jedan slot sa svake strane konekcije ili tunela). Ukupan broj frekvencijskih slotova i optičkih predajnika potrebnih za uspostavljanje konekcija, sa i bez agregacije saobraćaja, prikazan je u tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Zauzeti spektar i potreban broj predajnika bez i sa agregacijom konekcija

Konekcija	$R_1$ (1-2-3-4)	$R_2$ (1-2-3-5)	$R_3$ (3-4-6)	$R_4$ (3-4-6-7)
Zahtevani broj FS	4	3	3	2
<b>Bez grupisanja</b>				
Zauzetost FS u mreži	18	15	10	12
Ukupan broj FS potreban za sve konekcije			55	
Ukupan broj predajnika			4	
<b>Sa grupisanjem</b>				
	$R_1$ i $R_2$ grupisani		$R_3$ i $R_4$ grupisani	
Zauzetost FS u mreži	29		18	
Ukupan broj FS potreban za sve konekcije			47	
Ukupan broj predajnika			2	

Ako se posmatra scenario bez agregacije (slika 5.12. a)), za saobraćajni zahtev  $R_1$ , čija je ruta 1-2-3-4, potrebno je 18 slotova (3 linka x 6 FS), dok je za zahtev  $R_2$  preko rute 1-2-3-5 potrebno 15 FS. Ukoliko se zahtevi  $R_1$  i  $R_2$ , zatim  $R_3$  i  $R_4$  grupišu (slika 5.12. b)) ostvaruje se ukupna ušteda od 8 frekvencijskih slotova, odnosno potrebno je ukupno 47, umesto 55 zahtevanih slotova. Što se tiče ušteda koje se odnose na predajnike, umesto 4, potrebna su 2 optička predajnika. Bitno je napomenuti da se navedenim postupkom minimizira broj optičkih predajnika, ali ne i prijemnika, jer se saobraćaj generisan od strane različitih izvora mora primiti odvojeno.



Slika 5.13. Optička mreža: a) bez primene i b) sa primenom tehnike agregacije saobraćaja

Uzimajući u obzir prethodno navedeno, može se konstatovati da je jedan od ključnih problema EON mreža efikasno rešavanje rutiranja i dodele propusnog opsega, pri čemu se primenom tehnike agregacije saobraćaja mogu postići dodatne uštede u pogledu broja frekvencijskih slotova. Od uspešno postavljenog modela za rešavanje navedenog problema zavise sveukupne performanse mreže. Osim spektralnih ušteda, optičkom agregacijom saobraćaja može se postići i smanjenje broja optičkih predajnika. Istraživanja su dominantno usmerena na agregaciju saobraćaja na optičkom nivou kako bi se izbegle O/E/O konverzije signala u čvorovima mreže, ali se ne isključuje u potpunosti ni postupak agregacije konekcija na električnom nivou zbog tehno-ekonomske opravdanosti.

Optimizacija performansi optičkih WDM mreža agregacijom saobraćaja i konverzijom talasnih dužina

---

6.

**METAHEURISTIČKI ALGORITAM ZA  
REŠAVANJE PROBLEMA OPTIČKE  
AGREGACIJE SAOBRAĆAJA**

---



## 6. METAHEURISTIČKI ALGORITAM ZA REŠAVANJE PROBLEMA OPTIČKE AGREGACIJE SAOBRAĆAJA

U ovom poglavlju predstavljen je originalni metaheuristički algoritam za rešavanje istraživanog statičkog RSA problema uz primenu tehnike agregacije saobraćaja na optičkom nivou, TG-RSA. Rezultati istraživanja pokazuju da se primenom predloženog algoritma postižu značajne spektralne uštede, da je u pogledu računarske složenosti veoma efikasan i da se može primeniti za rešavanje TG-RSA problema u mrežama realnih dimenzija. Algoritam ima za cilj minimizaciju ukupnog zauzetog spektra, odnosno ukupnog broja frekvencijskih slotova zauzetih na svim linkovima mreže, uz pretpostavku uspostavljanja svih zahtevanih konekcija. Rezultati primene algoritma prikazani su na primerima nekoliko mreža u [126], [127].

### 6.1. Postavka problema

Istražuje se statički RSA problem u kombinaciji sa agregacijom saobraćaja na optičkom nivou, koji se tipično rešava u fazi planiranja i projektovanja EON mreža. Problem se može definisati na sledeći način: za datu fizičku topologiju mreže i matricu saobraćajnih zahteva, pri datom skupu ograničenja u pogledu susedstva i kontinuiteta frekvencijskih slotova na linkovima mreže, kao i raspoloživog kapaciteta optičkog predajnika, potrebno je minimizirati ukupan broj zauzetih slotova u mreži, uz pretpostavku uspostavljanja svih zahtevanih konekcija i mogućnost njihovog izvornog grupisanja u optičke tunele. Pretpostavka je da kapacitet optičkog tunela mora biti manji ili jednak kapacitetu optičkog predajnika.

Optička mreža se posmatra kao graf sa  $N$  čvorova i  $L$  linkova. Svaki optički link,  $l$ , se sastoji od dva vlakna, po jedno za svaki smer prenosa. Pretpostavka je da je raspoloživi broj slotova na linkovima mreže dovoljan za uspostavljanje svih puteva svetlosti. Između uspostavljenih optičkih tunela potrebno je rezervisati zaštitni frekvencijski opseg (sa svake strane tunela), kao i prilikom razdvajanja konekcija u tranzitnim čvorovima. Zaštitni opseg  $G$  (*Guard Band*) takođe je izražen brojem frekvencijskih slotova i utiče na ukupan zauzeti spektar. Ukoliko se na nekom linku grupišu bar dve konekcije ostvaruje se ušteda spektra za veličinu  $2G$  jer se time eliminiše zaštitni opseg između konekcija.

### 6.2. Opis predloženog algoritma

U optički tunel mogu se grupisati konekcije koje imaju isti izvorni čvor i zajedničke linkove počevši od izvornog čvora. Što je veći broj zajedničkih linkova grupisanih konekcija, ostvaruje se veća ušteda spektra ili spektralni dobitak. Postupak agregacije konekcija sprovodi se uzimajući u obzir spektralni dobitak. Pojam spektralnog dobitka biće detaljno objašnjen u delu disertacije 6.2.2.

Za rešavanje problema rutiranja primenjuje se metod fiksnog alternativnog rutiranja (unapred definisano  $k$  dopustivih najkraćih ruta za svaki par čvorova), a za dodelu spektra metod *first-fit* (prvi raspoloživi), gde se na svakoj ruti identifikuje najniži indeks raspoloživih slotova i bira se ruta sa najnižim indeksom slotova.

Kriterijumska funkcija je predstavljena u obliku:

$$F = \min FS_{total} \quad (6.1)$$

gde je:

$$FS_{total} = \sum_l FS_l, \forall l \in L,$$

što predstavlja ukupan zauzeti spektar ili ukupan broj frekvencijskih slotova zauzetih na svim linkovima mreže, a  $FS_l$  predstavlja ukupan broj slotova zauzetih na linku  $l$ .

Izlaz: Broj zauzetih frekvencijskih slotova na svim linkovima mreže i dobijene uštede.

Predloženi algoritam namenjen je za rešavanje statičkog TG-RSA problema pri projektovanju elastičnih optičkih mreža i određivanja potrebnih resursa mreže, kako u manjim topologijama optičkih mreža, tako i u složenijim mrežama realnih dimenzija. Zasnovan je na metaheuristici BCO i konstruktivnom pristupu rešavanja problema. Algoritam obuhvata sledeće faze: inicijalizacija, generisanje parcijalnih rešenja, poređenje parcijalnih rešenja i fazu regrutovanja.

### 6.2.1. Inicijalizacija

U ovoj fazi definišu se ulazni parametri optimizacionog modela:

- fizička topologija mreže (broj i raspored čvorova  $N$  i linkova u mreži  $L$ ),
- unapred definisan skup ruta, sastavljen od  $k$  najkraćih ruta za svaki par čvorova  $(s, d)$ ,
- matrica saobraćajnih zahteva (izražena brojem frekvencijskih slotova,  $A_{sd}$ , za svaki par čvorova),
- $G$ - veličina zaštitnog opsega,
- $U$ - kapacitet predajnika,
- $I$ - broj iteracija,
- $r$ - broj zahteva koji se testira u svakom algoritamskom koraku,
- $S$ - ukupan broj prolaza unapred i unazad,  $i$
- $B$ - broj pčela koje učestvuju u procesu pretraživanja.

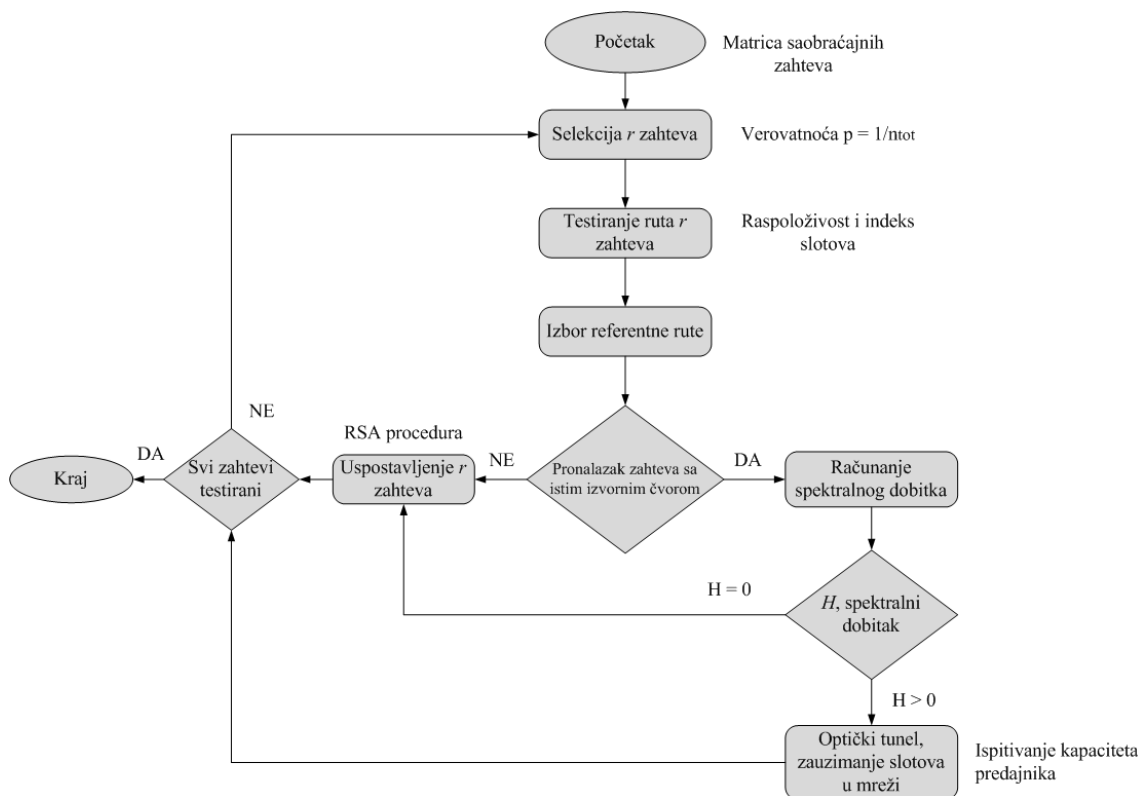
### 6.2.2. Generisanje parcijalnih rešenja

Generisanje parcijalnih rešenja sprovodi se po etapama. U svakom prolazu unapred,  $s = 1, 2, \dots, S$  svaka pčela ispituje unapred definisan broj zahteva,  $r$ , koji se na slučajan način biraju iz skupa svih zahteva,  $R$ . Zahtevi koji se u svakom koraku algoritma testiraju od strane neke pčele biraju se sa verovatnoćom :

$$p = \frac{1}{n_{tot}} \tag{6.2}$$

gde  $n_{tot}$  predstavlja ukupan broj zahteva koji prethodno nisu testirani od strane posmatrane pčele. Izborom specificiranih zahteva, pčele pokušavaju da uspostave zahtevane puteve svetlosti između parova čvorova u fizičkoj topologiji mreže (RSA problem) i istovremeno pokušavaju da grupišu zahteve sa istim izvornim čvorom (problem agregacije- *grooming*).

Dijagram toka procedure grupisanja konekcija prikazan je na slici 6.1.



Slika 6.1. Dijagram toka grupisanja konekcija

Generisanje parcijalnih rešenja može se objasniti kroz sledeće korake:

**Korak 1.** Za svaki od  $r$  slučajno izabranih zahteva, koji je predstavljen brojem frekvencijskih slotova  $A_{sd}$ , između para čvorova ( $s, d$ ), testira se  $k$ - alternativnih ruta. Ispituje se raspoloživost slotova na svakoj ruti za zahtevani broj slotova uključujući i potrebne zaštitne opsege ( $A_{sd} + 2G$ ). Bira se ruta sa najnižim raspoloživim indeksom slota, zatim se zahtevanom putu svetlosti na svim linkovima duž izabrane rute dodeljuje potreban broj susednih frekvencijskih slotova, koji se time zauzimaju u mreži. Pošto se takva ruta koristi za uspostavljanje puta svetlosti (konekcije), u cilju lakšeg razumevanja dalje procedure, uveden je termin *referentna ruta*. Konekcija koja se uspostavlja po referentnoj ruti, prva je u skupu potencijalnih konekcija koje čine optički tunel, i ima svoj početni,  $f_{sd}$ , i poslednji indeks slota optičkog tunela,  $l_{sd}$ .

**Korak 2.** Za svaki prethodno izabrani zahtev  $r$ , pretražuju se svi ostali zahtevi koji imaju isti izvorni čvor i posmatraju se njihove alternativne rute. Iz skupa svih alternativnih ruta uzimaju se u obzir samo one koje imaju bar jedan zajednički link sa *referentnom rutom*, počevši od izvornog čvora. Za svaku od takvih ruta računa se spektralni dobitak,  $H$ , koji je dat sledećim izrazom [54]:

$$H = 2G \cdot X - (Y - Z) \cdot \Lambda_{sd}' \quad (6.3)$$

gde  $G$  predstavlja zaštitni opseg,  $X$  predstavlja broj zajedničkih linkova,  $Y$  predstavlja dužinu rute (broj linkova) potencijalne konekcije za agregaciju (konekcije koja ima isti izvorni čvor),  $Z$  predstavlja dužinu *referentne rute* a  $\Lambda_{sd}'$  broj zahtevanih slotova konekcije  $Y$ . Postupak agregacije ima smisla ukoliko je spektralni dobitak  $H > 0$ . Ukoliko je slobodan kapacitet predajnika i slotovi na potrebnim linkovima, moguće je grupisati konekcije i formirati optički tunel. Na ovaj način se u optičkom tunelu pored *referentne rute* (preko koje se uspostavlja prvi izabrani put svetlosti) dodaju i rute  $Y$ , svaka sa kapacitetom  $\Lambda_{sd}'$  tako da se slotovi na zajedničkim linkovima zauzimaju na sledeći način:  $(G + A_{sd} + \Lambda_{sd}' + G)$ .

**Korak 3.** Ukoliko je spektralni dobitak  $H = 0$ , grupisanje se ne vrši jer ne donosi uštede i tada se samo uspostavljaju testirane konekcije  $r$ , pojedinačno preko *referentnih ruta*  $Z$ . Slučaj  $H < 0$  se ne razmatra jer znači uspostavljanje konekcija preko dužih ruta što automatski povećava zauzeti broj slotova.

Na ovaj način svaka pčela generiše svoje parcijalno rešenje i u svakoj etapi formira vrednost kriterijumske funkcije sa ukupnim brojem slotova zauzetih u mreži. Rešenja su nezavisna jedna od drugih.

### 6.2.3. Poređenje parcijalnih rešenja

Nakon generisanja parcijalnih rešenja, pčele vrše let unazad i vraćaju se u košnicu, gde razmenjuju informacije o kvalitetu ostvarenih rešenja (na osnovu vrednosti kriterijumske funkcije) i učestvuju u procesu odlučivanja. Na osnovu informacije o kvalitetu svih parcijalnih rešenja svaka pčela donosi odluku o tome da li odustaje od svog generisanog parcijalnog rešenja ili nastavlja sa proširenjem rešenja tokom narednog leta unapred. Pčele koje ostanu pri svom parcijalnom rešenju čine grupu pčela koje vrše regrutovanje, dok pčele koje odustanu od svog rešenja čine skup neopredeljenih pčela koje su u narednoj etapi spremne da se pridruže nekoj drugoj pčeli i prihvate njena prethodno generisana parcijalna rešenja u traganju za optimalnim rešenjem.

Verovatnoća da će neka pčela  $b$  tokom narednog leta unapred koristiti isti parcijalni put, tj. ostati pri svom prethodno dostignutom parcijalnom rešenju, data je izrazom:

$$p_{b,loyal} = 1 - \log[1 + (O_{max} - O_b)], b = 1, 2, \dots, B \quad (6.4)$$

gde  $O_b$  predstavlja normalizovanu vrednost kriterijumske funkcije za parcijalno rešenje pčele  $b$ , dok  $O_{max}$  predstavlja maksimalnu od svih normalizovanih vrednosti.

Normalizovana vrednost kriterijumske funkcije data je izrazom:

$$O_b = \frac{F_{max} - F_b}{F_{max} - F_{min}}, b = 1, 2, \dots, B \quad (6.5)$$

gde su  $F_{min}$  i  $F_{max}$  minimalna i maksimalna vrednost kriterijumske funkcije svih pčela, a  $F_b$  je vrednost kriterijumske funkcije  $b$ - te pčele.

Da bi se donela odluka o prihvatanju ili odustajanju od dostignutog parcijalnog rešenja, odnosno donela odluka da li će pčela pripasti grupi pčela koje vrše regrutovanje ili grupi neopredeljenih sledbenika, generiše se slučajan broj (rnd) iz intervala  $[0, 1]$ . Ako je  $rnd \leq p_{b,loyal}$ , pčela ostaje pri svom parcijalnom rešenju. U suprotnom, pčela odustaje od svog rešenja i postaje neopredeljeni sledbenik.

### 6.2.4. Faza regrutovanja

Nakon što pčele donesu odluku da nastave da lete duž istog generisanog puta, odlaze do prostora za igru, oglašavaju svoja parcijalna rešenja i vrše regrutovanje ostalih pčela. Verovatnoća da će neka neopredeljena pčela izabrati reklamirano rešenje neke pčele  $b$ , data je izrazom:

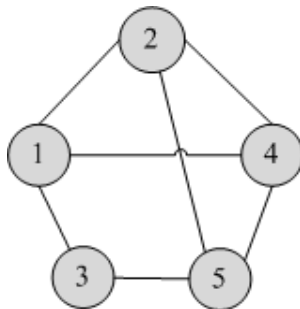
$$p_{b,recruit} = \frac{O_b}{\sum_{r=1}^{RB} O_r}, b = 1, 2, \dots, RB \quad (6.6)$$

gde se  $O_r$  odnosi na normalizovanu vrednost kriterijumske funkcije  $r$ - tog reklamiranog rešenja,  $r = 1, 2, \dots, RB$ , pri čemu  $RB$  predstavlja broj pčela koje vrše regrutovanje, (*Recruiter Bees*). Za svakog neopredeljenog sledbenika generiše se slučajnan broj iz intervala  $[0, 1]$ . Zatim se na osnovu vrednosti slučajnog broja, izračunatih vrednosti verovatnoća  $p_{b, recruit}$  i njihovim kumulativnim sabiranjem donosi odluka o "dodeli" svake neopredeljene pčele nekoj od pčela koje vrše regrutovanje. Da bi neka pčela bila regrutovana, potrebno je da vrednost slučajno generisanog broja za posmatranu neopredeljenu pčelu bude manja ili jednaka kumulativnoj sumi verovatnoće  $p_{b, recruit}$  za posmatranu pčelu koja vrši regrutovanje. Na ovaj način svaka neopredeljena pčela prihvata prethodno generisano parcijalno rešenje pčele  $b$  koja je izvršila njeno regrutovanje, ali u narednom koraku unapred tj. u nastavku procesa pretraživanja može da leti sama i da samostalno gradi svoja parcijalna rešenja. Kako proces pretraživanja napreduje, generisana rešenja sve više konvergiraju ka optimalnom.

Opisana procedura se ponavlja dok se ne testiraju svi saobraćajni zahtevi u jednoj iteraciji. Najbolje rešenje koje se dobije u tekućoj iteraciji (posmatrajući sve pčele) se pamti. Na početku algoritma broj iteracija se specifikira unapred i najbolje rešenje koje se dobije u okviru svih iteracija predstavlja optimalno rešenje.

### 6.3. Ilustrativni primer

Detaljna procedura izvršavanja predloženog BCO-TG-RSA algoritma opisana je na primeru manje mreže, prikazane na slici 6.2., sa  $R = 20$  zahteva. Saobraćajni zahtevi, u smislu potrebnog broja frekvencijskih slotova između svakog para čvorova generisani su slučajno, sa uniformnom raspodelom na intervalu  $[1, 4]$ . Jedno optičko vlakno predviđeno je za svaki smer prenosa i zaštitni opseg  $G = 1$  frekvencijski slot. Za svaki par čvorova unapred je definisano  $k = 3$  dopustive rute (primenom Yenn-ovog algoritma). Broj zahteva koji je testiran u svakom prolazu unapred  $s$  (algoritamskom koraku) je  $r = 3$ . Pretpostavljeni kapacitet predajnika je  $U = 8$  frekvencijskih slotova. Simulacija je sprovedena za  $B = 3$  pčele i  $I = 10$  iteracija.



Zahtev	$s$	$d$	$FS$	Zahtev	$s$	$d$	$FS$
$R_1$	1	2	1	$R_{11}$	3	4	2
$R_2$	1	3	1	$R_{12}$	3	5	1
$R_3$	1	4	2	$R_{13}$	4	1	2
$R_4$	1	5	4	$R_{14}$	4	2	3
$R_5$	2	1	3	$R_{15}$	4	3	4
$R_6$	2	3	2	$R_{16}$	4	5	1
$R_7$	2	4	2	$R_{17}$	5	1	2
$R_8$	2	5	2	$R_{18}$	5	2	2
$R_9$	3	1	3	$R_{19}$	5	3	3
$R_{10}$	3	2	2	$R_{20}$	5	4	1

Slika 6.2. Primer topologije manje mreže i skup od  $R = 20$  saobraćajnih zahteva

U prvom prolazu unapred, odnosno koraku  $s = 1$ , svaka pčela testira po  $r = 3$  zahteva, koji se biraju sa verovatnoćom određenom na osnovu izraza (6.2). Na primer, prva 3 zahteva testirana od strane pčele  $B_1$  su  $R_7$ ,  $R_{16}$  i  $R_9$ . Kako bi se izabrala ruta za uspostavljanje puta svetlosti, posmatraju se dopustive rute svih posmatranih zahteva i broj slotova ( $A_{sd} + 2G$ ). Bira se *referentna ruta*. Susedni frekvencijski slotovi dodeljuju se putu svetlosti duž izabrane rute i time se zauzimaju na linkovima u mreži. Nakon izbora prva tri zahteva i njihovih *referentnih ruta*, pronalaze se zahtevi koji imaju isti izvorni čvor u celoj matrici zahteva. Zahtevi sa istim izvornim čvorom, spektralni dobitak i vrednost kriterijumske funkcije za sve pčele nakon prvog prolaza unapred prikazani su u tabeli 6.1.

Na osnovu rezultata za spektralni dobitak,  $H$ , prikazanih u tabeli, može se primetiti da je pčela  $B_3$  uspela da izvrši agregaciju konekcija, i to testiranjem konekcija  $R_6$  i  $R_{19}$ . Sa ciljem jasnijeg predstavljanja, procedura agregacije je izdvojena za zahtev  $R_6$  i prikazana u tabeli 6.2.

Tabela 6.1. Ilustracija generisanja parcijalnih rešenja u koraku  $s = 1$

Pčela	Prvi testirani zahtevi	Zahtevi sa istim izvornim čvorom	Spektralna dobit $H$	Uspostavljene konekcije	Vrednost kriterijumske funkcije
$B_1$	$R_7, R_{16}, R_9$	$R_7- R_5, R_6, R_8$	$H = 0$	$R_7, R_{16}, R_9$	$F = 12$
		$R_{16}- R_{13}, R_{14}, R_{15}$	$H = 0$		
		$R_9- R_{10}, R_{11}, R_{12}$	$H = 0$		
$B_2$	$R_{13}, R_{20}, R_7$	$R_{13}- R_{14}, R_{15}, R_{16}$	$H = 0$	$R_{13}, R_{20}, R_7$	$F = 11$
		$R_{20}- R_{17}, R_{18}, R_{19}$	$H = 0$		
		$R_7- R_5, R_6, R_8$	$H = 0$		
$B_3$	$R_2, R_6, R_{19}$	$R_2- R_1, R_3, R_4$	$H = 0$	$R_2, R_6, R_7, R_8,$ $R_{19}, R_{17}, R_{18}$	$F = 40$
		$R_6- R_5, R_7, R_8$	$H_5 = 1, H_7 = 2, H_8 = 4$		
		$R_{19}- R_{17}, R_{18}, R_{20}$	$H_{17} = 6, H_{18} = 6, H_{20} = 4$		

Tabela 6.2. Postupak grupisanja konekcija za pčelu  $B_3$  testiranjem zahteva  $R_6$

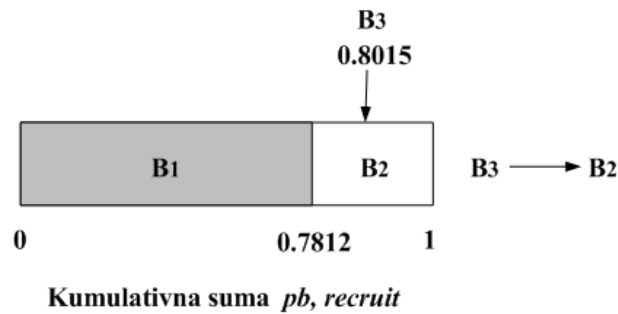
Testiran zahtev	$k$ - dopustivih ruta	Zahtevi sa istim izvornim čvorom i dopustivim rutama	Spektralni dobitak, $H$	Optički tunel
$R_6$	$(2-1-3), (2-5-3),$ $(2-4-1-3)$	$R_5- (2-1), (2-4-1), (2-5-3-1)$	$H_5 = 1$	G R6 R7 R8 G
		$R_7- (2-4), (2-1-4), (2-5-4)$	$H_7 = 2$	
		$R_8- (2-5), (2-4-5), (2-1-4-5)$	$H_8 = 4$	

Na osnovu vrednosti spektralnog dobitka može se primetiti da se uz konekciju  $R_6$  mogu potencijalno grupisati konekcije  $R_5, R_7$  i  $R_8$ . Dopustive rute ovih konekcija prikazane su u tabeli 6.2., gde ruta  $(2-5-3)$  predstavlja referentnu rutu. S obzirom da se agregacijom svih navedenih konekcija prevazilazi kapacitet predajnika ( $U = 8$ ), razmatraju se one konekcije sa većim spektralnim dobitkom. To podrazumeva konekcije  $R_7$  i  $R_8$  kojima se dodeljuju rute  $(2-5-4)$  i  $(2-5)$ , respektivno, a imaju zajednički link  $(2-5)$  sa referentnom rutom počevši od izvornog čvora. Gde je vrednost spektralnog dobitka  $H = 0$ , postupak agregacije nema smisla, jer ne donosi uštedu. U tom slučaju, putevi svetlosti se uspostavljaju za  $r = 3$  zahteva i izvršava se samo RSA postupak bez grupisanja. U narednim koracima algoritma, uspostavljeni zahtevi se više ne razmatraju. Nakon toga vrši se poređenje parcijalnih rešenja pčela sa aspekta kriterijumske funkcije. Posle koraka  $s = 1$  svaka pčela ostaje pri svom parcijalnom rešenju i u narednom koraku samostalno nastavlja dalji proces pretraživanja.

U cilju ilustracije faze poređenja rešenja i regrutovanja pčela, navedeni postupci su izdvojeni u slučaju drugog prolaza unapred ( $s = 2$ ). Relevantni BCO parametri prikazani su u tabeli 6.3. Može se primetiti da je najbolju vrednost kriterijumske funkcije ostvarila pčela  $B_1$  ( $F_{min} = 24$ ). Generisanjem slučajnog broja ( $\text{rnd} = 0.7320$ ) i poređenjem sa verovatnoćama  $p_{b, \text{loyal}}$  dobija se jedan neopredeljeni sledbenik (pčela  $B_3$ ) i dve pčele koje vrše regrutovanje ( $B_1$  i  $B_2$ ). Kumulativnim sabiranjem verovatnoća  $p_{b, \text{recruit}}$  i generisanjem slučajnog broja za pčelu  $B_3$  određuje se oblast pripadnosti. Pošto je slučajno generisan broj za pčelu  $B_3$ , 0.8015, isti pripada kumulativnoj oblasti pčele  $B_2$ . To znači da pčela  $B_3$  preuzima parcijalno rešenje pčele  $B_2$ , odnosno dodeljuje se pčeli  $B_2$ , ali u narednom koraku svaka pčela individualno nastavlja pretraživanje. Procedura regrutovanja ilustrovana je na slici 6.3.

Tabela 6.3. BCO parametri za korak  $s = 2$

Pčela	$F_b$	$O_b$	$p_{b, \text{loyal}}$	rnd	Pčela sledbenik	Pčela koja vrši regrutovanje	$p_{b, \text{recruit}}$
$B_1$	24	1.0000	1.0000	0.7320	-	$B_1$	0.7812
$B_2$	60	0.2800	0.7644		-	$B_2$	0.2187
$B_3$	74	0.0000	0.6989		$B_3$	-	-


 Slika 6.3. Procedura regrutovanja za korak  $s = 2$ 

U narednom koraku,  $s = 3$ , sve pčele nastavljaju individualno da pretražuju prostor dopustivih rešenja. Slučajno izabrani novi zahtevi su prikazani *italic* stilom u tabeli 6.4., a ažurirano parcijalno rešenje pčele  $B_3$  prikazano je podebljanim slovima.

 Tabela 6.4. Ažurirana parcijalna rešenja za korak  $s = 3$ 

Pčela	Saobraćajni zahtev
$B_1$	$R_7$ $R_{16}$ $R_9$ $R_8$ $R_{14}$ $R_{20}$ $R_{11}$ $R_2$ $R_{18}$
$B_2$	$R_{13}$ $R_{20}$ $R_7$ $R_{16}$ $R_{10}$ $R_{12}$ $R_{11}$ $R_9$ $R_4$ $R_1$ $R_3$ $R_2$ $R_5$ $R_{14}$ $R_{17}$
$B_3$	<b><math>R_{13}</math></b> <b><math>R_{20}</math></b> <b><math>R_7</math></b> <b><math>R_{16}</math></b> <b><math>R_{10}</math></b> <b><math>R_{12}</math></b> <b><math>R_{11}</math></b> <b><math>R_9</math></b> <b><math>R_4</math></b> <b><math>R_1</math></b> <b><math>R_3</math></b> <b><math>R_2</math></b> $R_6$ $R_{15}$ $R_{19}$

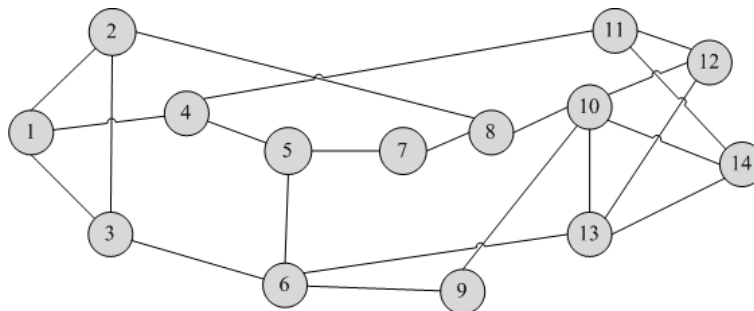
Postupci se ponavljaju i za naredne korake  $s = 4$ ,  $s = 5$  i  $s = 6$ . Na kraju prve iteracije (korak  $s = 6$ ) svi zahtevani putevi svetlosti su uspostavljeni i na osnovu toga svaka pčela  $B_1$ ,  $B_2$  i  $B_3$  dobija vrednost ukupnog broja slotova zauzetih u mreži, koji iznose 104, 106 i 105 slotova, respektivno. Najbolje rešenje je ostvarila pčela  $B_1$  i to rešenje se pamti. Nakon  $I = 10$  iteracija, ukupan zauzeti spektar sa primenom tehnike agregacije iznosi 104 frekvencijska slota, a bez primene agregacije 110 slotova. To znači da je ostvarena spektralna ušteda od 6 slotova na osnovu eliminacije zaštitnih opsega.

Broj frekvencijskih slotova koje je moguće uštedeti na nekom linku primenom tehnike agregacije (u svakom algoritamskom koraku) moguće je izračunati na osnovu izraza:  $2G * (c - 1)$ , gde se  $c$  odnosi na broj konekcija koje su grupisane na posmatranom linku. Na primer, ako se posmatraju 2 linka, pri čemu su na linku 1 grupisane tri konekcije, a na linku 2 dve konekcije, ušteda po osnovu eliminacije zaštitnih opsega na oba linka je sledeća:  $2G * (3-1) + 2G * (2-1) = 4 \text{ FS} + 2 \text{ FS} = 6 \text{ FS}$ . Potrebno je napomenuti da se u prethodno prikazanom ilustrativnom primeru radi o manjoj mreži i manjem brojem zahteva, tako da uštede, odnosno spektralni dobitak koji se ostvaruje primenom tehnike agregacije nije značajno izražen. U narednom poglavlju biće pokazano da tehnika agregacije dolazi do izražaja kada se problem rešava na mrežama sa više čvorova i linkova, kao i više zahtevanih konekcija.

## 6.4. Numerički eksperimenti- poređenje rezultata BCO-TG-RSA sa postojećim algoritmima

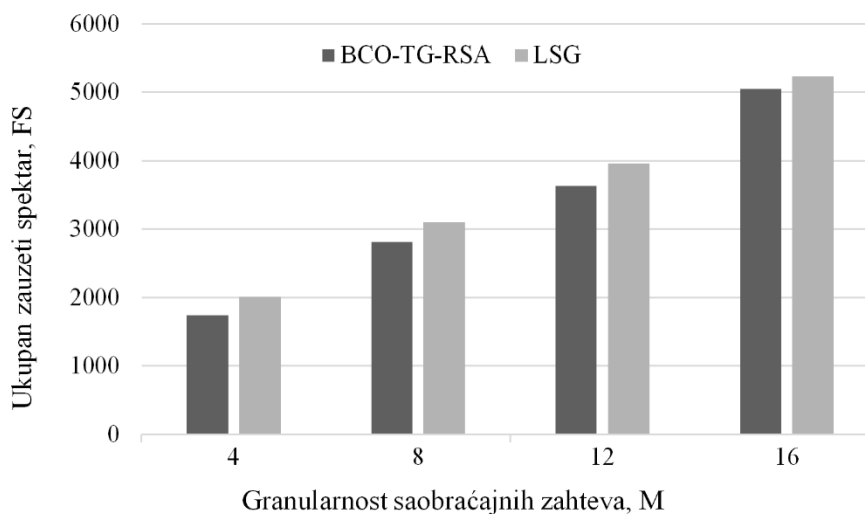
Sa ciljem evaluacije predloženog algoritma, dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima dobijenim primenom LSG (*Least Spectrum Grooming*) algoritma predloženog u [54], gde se tehnika agregacije saobraćaja analizira kao individualni postupak. LSG algoritam zasniva se na ispitivanju zahteva sa definisane liste zahteva i agregaciji konekcija koje imaju isti izvorni čvor i zajedničke linkove, počevši od izvornog čvora. Lista zahteva se formira na osnovu potencijalnih ruta koje su sortirane po opadajućem redosledu na osnovu broja linkova. Da bi poređenje rezultata rešavanog problema bilo relevantno, korišćeni su isti ulazni parametri kao u [54] i ista NSFNet (*National Science Foundation Network*) topologija mreže (prikazana na slici 6.4.). Parametri podrazumevaju sledeće: matrica

saobraćajnih zahteva generisana je na slučajan način gde zahtevani broj frekvencijskih slotova između svakog para čvorova uzima vrednosti između 1 i  $M$ ,  $M \in [4, 8, 12, 16]$ , pri čemu se  $M$  odnosi na maksimalan broj slotova koji se zahteva za uspostavljanje određenog puta svetlosti; veličina zaštitnog opsega  $G = 1$ ; kapacitet predajnika  $U = 16$  slotova i  $k = 2$  alternativnih ruta. Simulirano je deset slučajno generisanih saobraćajnih scenarija i posmatrane su srednje vrednosti prilikom poređenja rezultata. Broj zahteva koji je testiran u svakom koraku algoritma iznosi  $r = 2$ , a simulacija je sprovedena sa ukupno  $B = 5$  pčela. Za potrebe određivanja rešenja korišćen je kod razvijen u programskom jeziku Python, a simulacije su sprovedene korišćenjem *Intel(R) i5* računarskog procesora na 3.1 GHz i 8 GB RAM-a.



Slika 6.4. Topologija NSFNet mreže

Dobijeni rezultati za ukupan broj frekvencijskih slotova zauzetih na svim linkovima mreže (ukupan zauzeti spektar) prikazani su na slici 6.5.



Slika 6.5. Poređenje rezultata BCO-TG-RSA i LSG algoritma

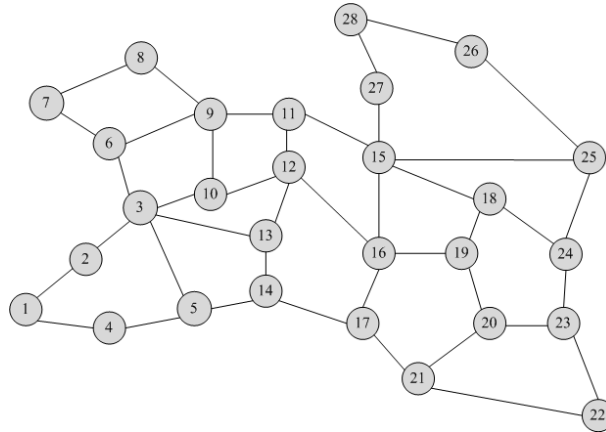
Prikazani rezultati predstavljaju najbolje ostvarene rezultate dobijene tokom  $I = 10$  iteracija izvršavanja BCO-TG-RSA algoritma. Na osnovu slike 6.5. može se uočiti da BCO-TG-RSA algoritam, za sve vrednosti parametra  $M$ , daje bolje rezultate od posmatranog LSG algoritma, kojim se postižu spektralne uštede od 5-15 %. BCO-TG-RSA postiže spektralne uštede od 5-25 %, što znači da je poboljšanje kriterijumske funkcije do 10 % u odnosu na posmatrani algoritam.

Veći maksimalni indeks slotova u slučaju LSG algoritma posledica je velikog broja fragmentovanih slotova. S obzirom da je taj indeks kod predloženog BCO-TG-RSA algoritma niži, može se zaključiti da je sa aspekta fragmentacije slotova BCO-TG-RSA efikasniji. Efikasnost proizilazi iz činjenice da procedura izvršavanja algoritma omogućava češću agregaciju konekcija, a time i manju zauzetost spektra.



## 6.5. Numerički eksperimenti- analiza rezultata BCO-TG-RSA algoritma

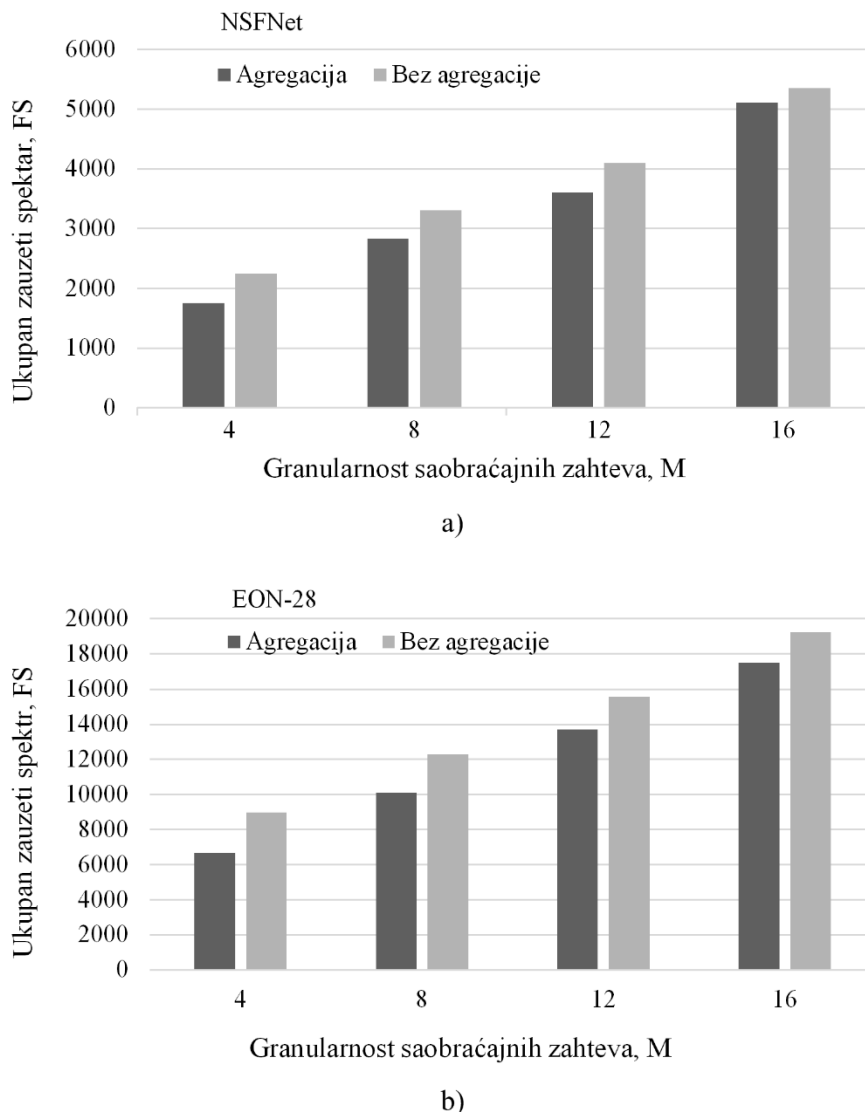
Predloženi BCO-TG-RSA algoritam testiran je, osim na primeru NSFNet mreže sa  $N = 14$  čvorova i  $L = 21$  linkova, i na primeru EON-28 (*European Optical Network*) mreže sa  $N = 28$  čvorova i  $L = 39$  linkova (prikazana na slici 6.6.). Pokazano je kolike su spektralne uštede kada se primenjuje tehnika agregacije u odnosu na slučaj kada se ne primenjuje. Zatim su analizirani određeni faktori koji mogu uticati na efikasnost postupka agregacije.



Slika 6.6. Topologija EON-28 mreže

Ulazni parametri za obe mreže, NSFNet i EON mrežu isti su kao i u poglavlju 6.4. Saobraćajne matrice za obe mreže generisane su slučajno sa različitim maksimalnim vrednostima parametra  $M$ , kako bi se ispitao uticaj granularnosti zahteva na efikasnost tehnike agregacije. Ukupan broj zahtevanih puteva svetlosti koji je testiran u svakoj simulaciji, za svaku posmatranu saobraćajnu matricu je  $R = N * (N - 1)$ , gde se  $N$  odnosi na broj čvorova mreže. Simulacija je sprovedena sa  $B = 5$  pčela. Maksimalan broj iteracija je  $I = 10$ .

Ukupan broj zauzetih slotova u mreži, koji predstavlja zbir maksimalnih indeksa zauzetih slotova na svim linkovima mreže, sa i bez primene tehnike agregacije, prikazan je na slici 6.7. i to a) za NSFNet mrežu i b) EON mrežu. Može se primetiti da se grupisanjem konekcija po predloženom modelu ostvaruju značajne spektralne uštede usled eliminacije nepotrebnih zaštitnih opsega. Dobijene spektralne uštede u odnosu na slučaj kada se izvršava samo RSA postupak (bez tehnike agregacije), iznose između 5 i 25 %, što prvenstveno zavisi od granularnosti saobraćajnih zahteva. Ostvareni rezultati dobijeni su u toku 10 nezavisnih algoritamskih iteracija. Tokom svake iteracije pronalazi se i memoriše postignuto rešenje, a zatim se za konačno rešenje usvaja ono koje daje najbolju vrednost kriterijumske funkcije tokom svih sprovedenih iteracija. Veliki broj sprovedenih testiranja pokazuje da nije potreban suviše veliki broj iteracija da bi se postigli kvalitetni rezultati. Broj iteracija je povećavan na  $I = 20$  i  $30$  kako bi se dodatno ispitao kvalitet rešenja, međutim nije postignuto poboljšanje kriterijumske funkcije. S obzirom da broj iteracija direktno utiče na procesorsko vreme izvršavanja algoritma tj. na dužinu procesa pronalaska rešenja, usvojeno je  $I = 10$ .



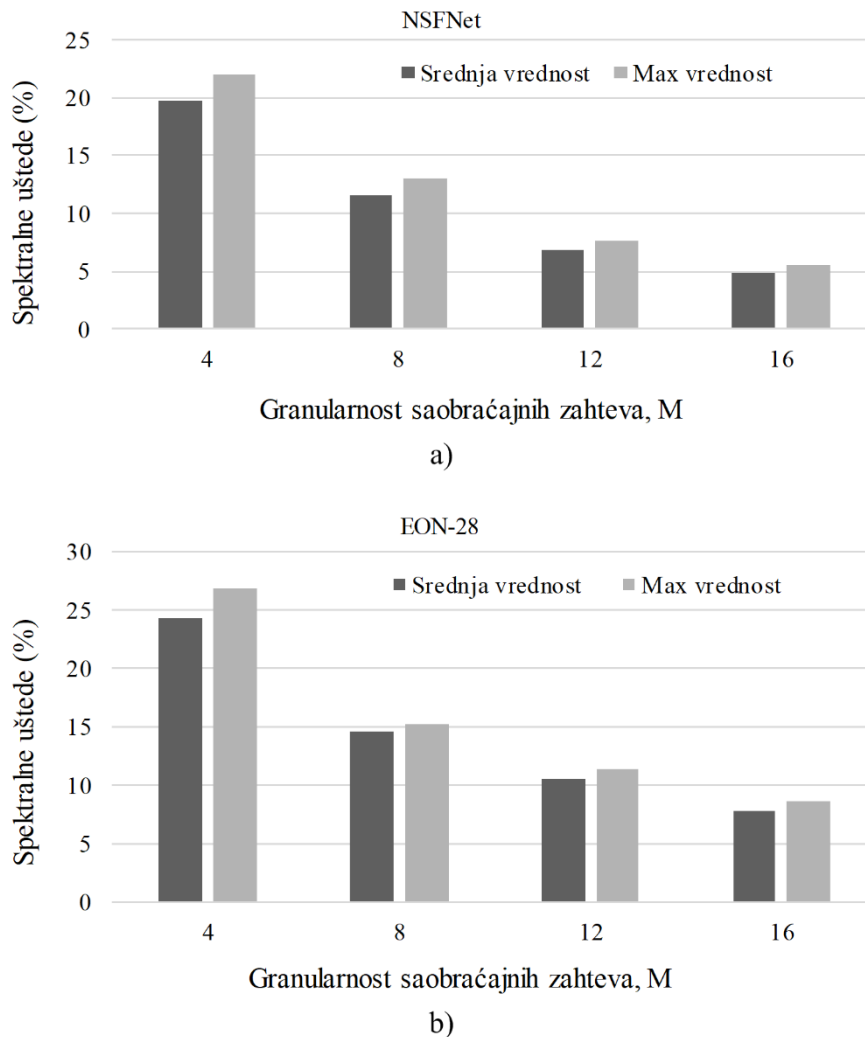
Slika 6.7. Ukupan zauzeti spektar sa i bez primene tehnike agregacije: a) NSFNet i b) EON-28 mreža

### 6.5.1. Granularnost zahteva i efikasnost tehnike agregacije

Efikasnost tehnike agregacije saobraćaja ispitivana je za različite vrednosti parametra  $M$ , odnosno za različite granularnosti saobraćajnih zahteva. Maksimalan broj frekvencijskih slotova potreban za uspostavljanje određene konekcije je u tom smislu uzimao vrednosti 4, 8, 12 i 16 slotova, odnosno  $M \in [4, 8, 12, 16]$ . Maksimalne i srednje procentualne uštede za različite vrednosti parametra  $M$  na primerima testiranih mreža prikazane su na slici 6.8. Spektralne uštede za primer NSFNet mreže su između 5 i 20 % (slika 6.8. a)), dok su za EON-28 mrežu (slika 6.8. b)) čak i veće i iznose između 8 i 26 %. To pokazuje da tehnika agregacije saobraćaja pruža veće spektralne uštede na primerima velikih mreža i u slučaju složenih saobraćajnih scenarija.

Na osnovu rezultata sa slike 6.8., može se primetiti da se efikasnost tehnike agregacije smanjuje ukoliko se veličina konekcije, tj. zahtevani broj frekvencijskih slotova, povećava. Na primerima obe testirane mreže, najveće spektralne uštede su ostvarene kada je vrednost parametra  $M = 4$ . Veličina saobraćajnih zahteva je u tom slučaju najmanja, pa je srednja ostvarena spektralna ušteda za NSFNet mrežu 19 %, a za EON-28 mrežu 24 %. Najmanje spektralne uštede za obe mreže ostvarene su za

vrednost parametra  $M = 16$ . Srednja vrednost uštede u tom slučaju za NSFNet mrežu iznosi 5 %, dok za EON mrežu iznosi 8 %. Na osnovu navedenog, može se zaključiti da tehnika agregacije saobraćaja daje najbolje rezultate kada se grupiše više manjih konekcija u optički tunel preko istog predajnika.



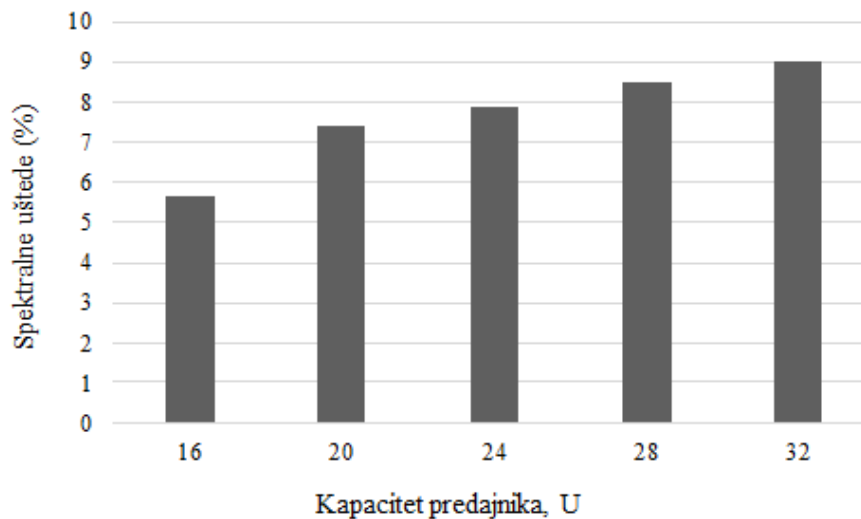
Slika 6.8. Spektralne uštede: a) NSFNet i b) EON-28 mreža

### 6.5.2. Kapacitet predajnika i efikasnost tehnike agregacije

U okviru istraživanja razmatrano je kako povećanje kapaciteta predajnika utiče na efekte tehnike agregacije saobraćaja. Analiza spektralnih ušteda na osnovu različitih maksimalnih kapaciteta predajnika prikazana je na slici 6.9. Rezultati se odnose na NSFNet mrežu i granularnost frekvencijskih slotova sa parametrom  $M = 12$  (konekcije srednje veličine). Slični rezultati su postignuti i za mrežu EON-28.

Slika 6.9. pokazuje da se najveće uštede postižu u slučaju kada je veliki kapacitet predajnika (32 FS). Jasno je da veći kapacitet predajnika daje i veće spektralne uštede, jer je moguće grupisati više konekcija. Konekcije sa manjim zahtevanim brojem slotova je lakše grupisati zbog jednostavnijeg pronalaska slobodnih kapaciteta predajnika, što svakako treba uzeti u obzir prilikom njihovog projektovanja. Međutim, nakon što se u optički tunel grupišu sve konekcije koje imaju isti izvorni čvor i zauzme se kapacitet predajnika, dodatne uštede spektra se ne mogu postići. Takođe, ukoliko se

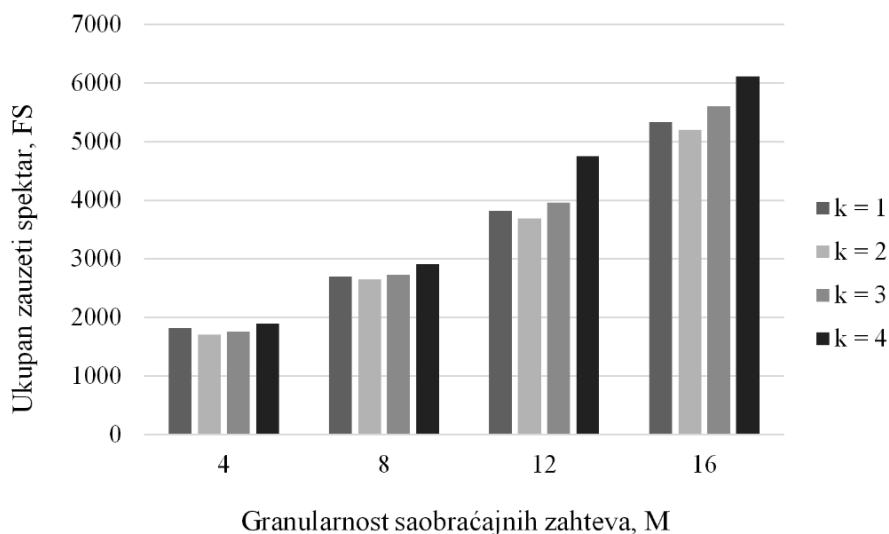
poveća potrebna veličina zaštitnog opsega između pojedinačnih konekcija, spektralne uštede koje se ostvaruju postupkom agregacije će takođe biti veće.



Slika 6.9. Spektralne uštede za različite vrednosti kapaciteta predajnika

### 6.5.3. Broj alternativnih ruta i efikasnost tehnike agregacije

Na osnovu rezultata testiranja sprovedenih za različite vrednosti broja predefinisanih ruta, pokazuje se da ukupan broj zauzetih frekvencijskih slotova u mreži nije manji, tj. ne ostvaruje se poboljšanje vrednosti kriterijumske funkcije ako se broj alternativnih ruta  $k$  povećava (slika 6.10.). Iz tog razloga dovoljno je za svaki par čvorova definisati samo po nekoliko prvih najkraćih ruta, što je i korišćeno u navedenim primerima ( $k = 2$ ). U prilog tome stoji činjenica da se povećanjem broja ruta povećava i broj linkova preko kojih se uspostavljaju fleksibilni putevi svetlosti, čime se zauzima i više frekvencijskih slotova u mreži. Rezultati testiranja odnose se na NSFNet mrežu a slično je postignuto i za EON-28 mrežu.



Slika 6.10. Ukupan zauzeti spektar za različit broj alternativnih ruta

#### 6.5.4. Analiza CPU vremena i granularnosti procesa pretraživanja

U nastavku rada analizirano je računarsko (CPU) vreme potrebno za pronalazak najboljeg rešenja primenom predloženog algoritma. Za analizu CPU vremena prilikom izvršavanja predefinisano broja iteracija, kao i za određeni broj pčela, korišćena je slučajno generisana matrica sa maksimalnom veličinom konekcija  $M = 4$  i topologija NSFNet mreže. Na osnovu sprovedenih testiranja, pokazano je da broj pčela koje učestvuju u procesu pretraživanja značajno utiče na potrebno računarsko vreme, ali se kvalitet rešenja ne poboljšava sa povećanjem njihovog broja (za  $B = 10, 15, 20$  itd.). Iz tog razloga, proces pretraživanja je ograničen na  $B = 5$  pčela. Kvalitet rešenja, u smislu broja zauzetih frekvencijskih slotova i CPU vremena, za različit broj pčela, prikazan je u tabeli 6.5. Rezultati se odnose na 10 iteracija. Potrebno je napomenuti da u procesu simulacije pčele tokom više iteracija, mogu pronaći različita rešenja, ali sa istom vrednošću kriterijumske funkcije.

Tabela 6.5. Kvalitet rešenja i CPU vremena za različit broj pčela  $B$

<b>B</b>	<b>Ukupno zauzetih slotova [FS]</b>	<b>CPU vreme [s]</b>
5	1741	40.34
10	1752	110.78
15	1794	139.64

U predloženom algoritmu, kao ulazni parametar definiše se i broj zahteva koji se ispituje u svakom letu unapred  $r$ , odnosno granularnost procesa pretraživanja. Vrednost ovog parametra utiče na kvalitet dobijenog rešenja jer se u svakom koraku algoritma zauzima određen broj slotova u mreži, bez obzira da li je agregacija u posmatranom trenutku moguća ili nije. Prema tome, određene konekcije mogu biti uspostavljene sa ili bez zaštitnih opsega. Testirane su različite vrednosti parametra  $r$  ( $r = 2, 3, 5, 10$ ) i pokazano je da najbolje rešenje daje vrednost  $r = 2$ , zbog čega je i usvojena ova vrednost u simulacijama. Lošiji rezultati za veće vrednosti  $r$  su posledica uspostavljanja većeg broja konekcija bez agregacije. To znači da ukoliko nisu zadovoljena sva ograničenja koja se javljaju u problemu optičke agregacije, ista se ne primenjuje, već se samo izvršava postupak RSA.

#### 6.5.5. Redosled ispitivanja zahteva i efikasnost tehnike agregacije

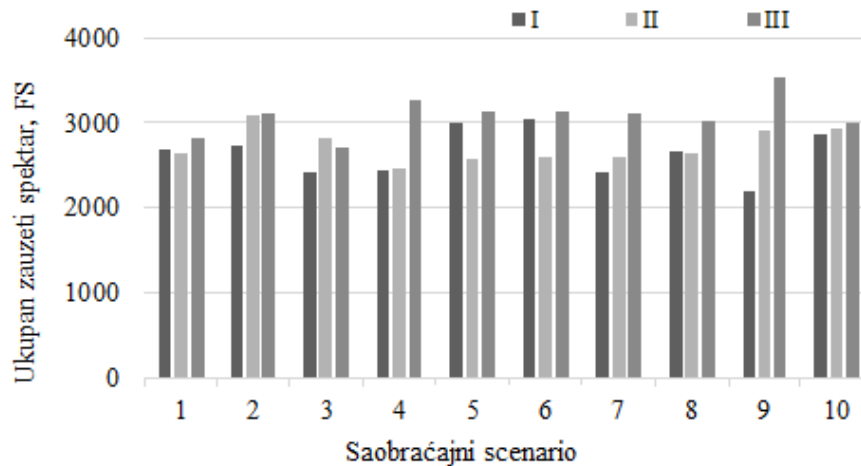
Kao deo rezultata istraživanja, u nastavku rada biće prikazano kako redosled ispitivanja konekcija utiče na efikasnost postupka agregacije. S tim u vezi, konekcije su ispitivane na tri načina:

- Prvi način (I)- slučajnim odabirom  $r$  zahteva. U svakom prolazu unapred,  $s$ , svaka pčela ispituje specifikovan broj zahteva koji se na slučajan način biraju iz skupa svih zahteva  $R$ . Zahtevi koji se testiraju od strane neke pčele biraju se sa verovatnoćom definisanom izrazom (6.2).
- Drugi način (II)- svi zahtevi se sortiraju po rastućem redosledu, sa aspekta broja zahtevanih slotova, tj. prioritet su konekcije manjeg intenziteta.
- Treći način (III)- svi zahtevi se sortiraju po opadajućem redosledu, sa aspekta broja zahtevanih slotova, tj. prioritet su konekcije većeg intenziteta.

Da bi se analizirao efekat redosleda ispitivanja zahteva na postupak agregacije, testiranja su izvršena na primeru NSFNet mreže, gde je matrica zahteva generisana na slučajan način, a maksimalan broj slotova potreban za određenu konekciju je  $M = 8$ . Ostali parametri su isti kao i u poglavlju 6.5. Rezultati sa slike 6.11. pokazuju da redosled ispitivanja konekcija od najmanjih ka najvećim i obrnuto ne daje bolje rezultate u odnosu na slučajni odabir konekcija. Takvi rezultati su posledica samog postupka agregacije, jer se izborom početnog zahteva  $r$ , biraju svi ostali koji imaju isti početni čvor,

bez obzira na veličinu konekcije. Na taj način se zauzimaju slotovi u mreži, ne po veličini konekcije, već po redosledu koji definiše postupak agregacije u predloženom modelu.

Ukoliko se poredi ispitivanje konekcija samo sa aspekta veličine, bolji rezultati se dobijaju ukoliko se prvo ispituju manje konekcije, jer veće konekcije prouzrokuju i veću fragmentaciju opsega.



Slika 6.11. Redosled ispitivanja konekcija i zauzeti broj slotova

### 6.5.6. Analiza opterećenosti linkova mreže

Na slikama 6.12. i 6.13. prikazana je opterećenost linkova u NSFNet mreži (uzeta je kao primer, zbog sličnosti rezultata i manjeg broja linkova u odnosu na EON-28) izražena brojem zauzetih frekvencijskih slotova preko svakog pojedinačnog linka. Testirani su saobraćajni scenariji kada je maksimalan broj zahtevanih slotova po konekciji uzimao sve posmatrane vrednosti  $M$  (slika 6.12. za  $M = 4$  i  $M = 8$  i slika 6.13. za  $M = 12$  i  $M = 16$ ).

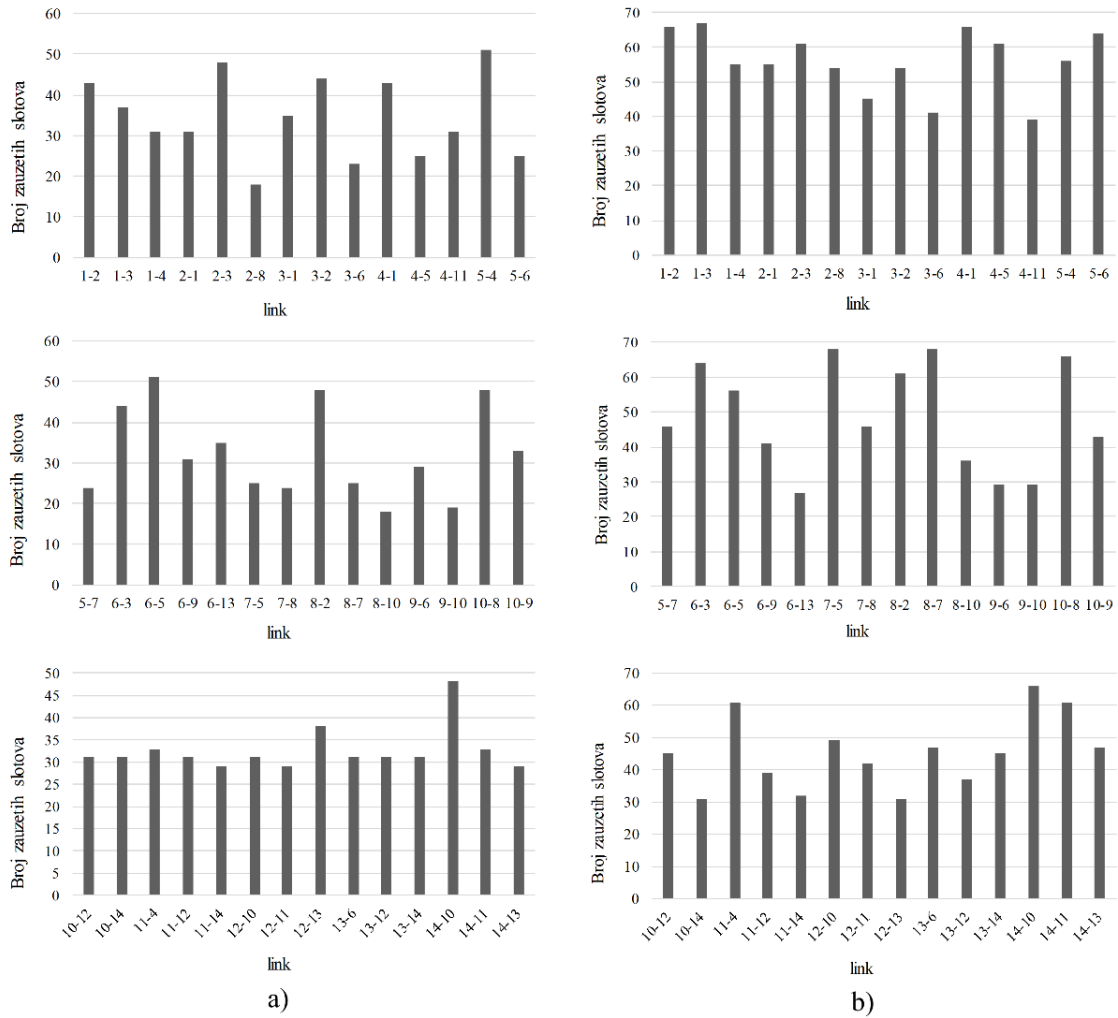
Na osnovu prikazanih rezultata može se konstatovati da su linkovi približno ravnomerno korišćeni u mreži. Prosečna vrednost stepena iskorišćenosti mreže je sledeća:

- $M = 4$  - 65.12 %,
- $M = 8$  - 73.41 %,
- $M = 12$  - 62.41 % i
- $M = 16$  - 79.66 %.

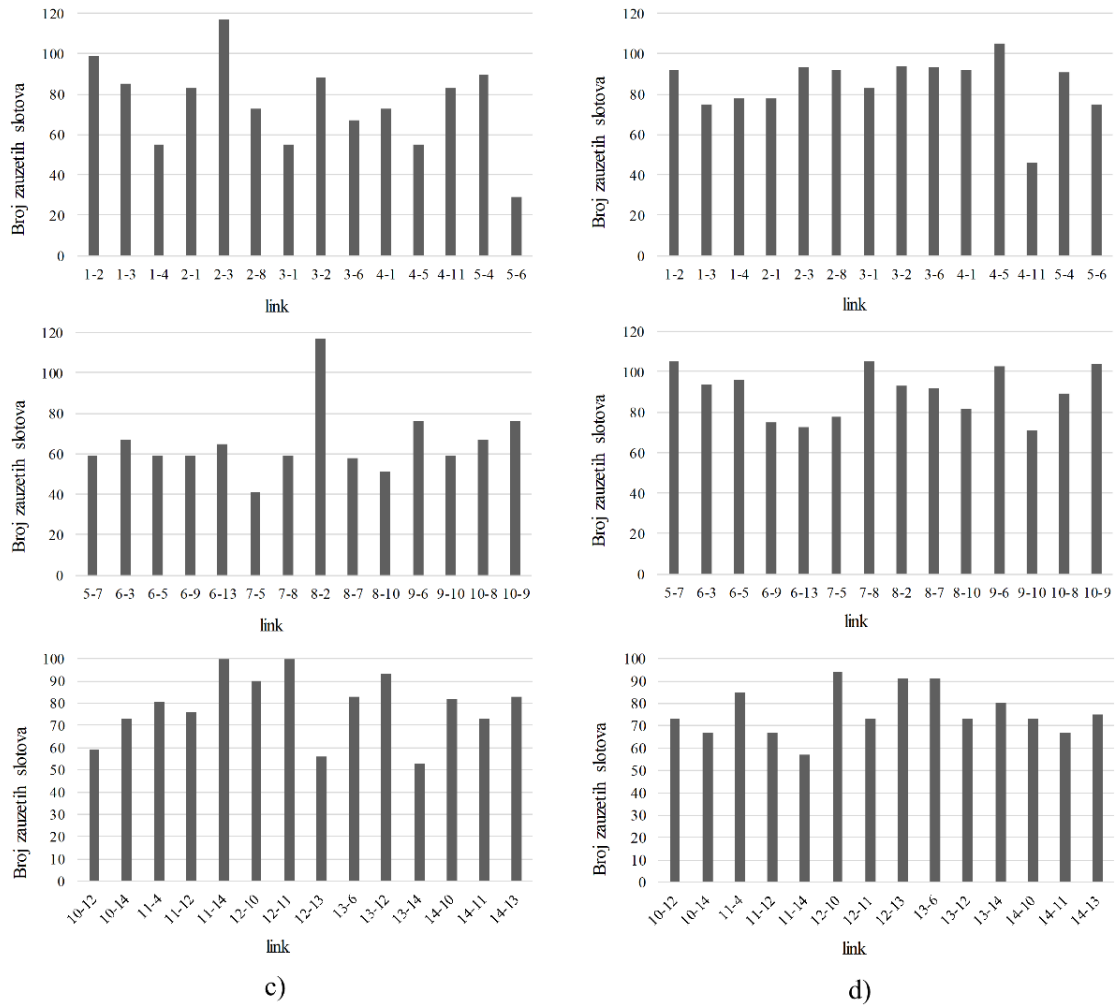
Svi analizirani faktori koji utiču na efekte tehnike agregacije saobraćaja veoma su bitni prilikom projektovanja optičkih mreža i za racionalno korišćenje resursa. Tehniku agregacije saobraćaja je potrebno primeniti uvek kada je zaštitni opseg veliki, kada je potrebno uspostaviti više manjih konekcija, zatim kada je u pitanju veliki kapacitet predajnika kako bi se isti maksimalno iskoristio. S obzirom da svaki operator ima krajnji cilj, rešenje koje će prihvatiti kao najbolje, svakako mora biti kompromis između dodatnih troškova koji nastaju prelaskom na novu tehnologiju fleksibilnog grida i benefita koji se primenom iste ostvaruju.

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da se predloženi BCO-TG-RSA algoritam može koristiti za efikasno rešavanje statičkog TG-RSA problema u mrežama realnih dimenzija. Efikasnost

algoritma se odnosi kako na performanse koje se mogu postići njegovom primenom, tako i na potrebno računarsko vreme za pronalazak najboljeg rešenja.



Slika 6.12. Opterećenost linkova u NSFNet mreži: a)  $M = 4$  i b)  $M = 8$



Slika 6.13. Opterećenost linkova u NSFNet mreži: a)  $M = 12$  i b)  $M = 16$



Optimizacija performansi optičkih WDM mreža agregacijom saobraćaja i konverzijom talasnih dužina

---



**USPOSTAVLJANJE KONTROLNE  
RAVNI U OPTIČKIM  
TRANSPORTNIM MREŽAMA**

---

## 7. USPOSTAVLJANJE KONTROLNE RAVNI U OPTIČKIM TRANSPORTNIM MREŽAMA

Osnovni cilj uvođenja kontrolne ravni u optičku transportnu mrežu jeste mogućnost dinamičkog uspostavljanja i održavanja konekcije po kojoj se vrši isporuka servisa od jedne do druge tačke mreže. S obzirom da su optičke mreže postale sastavni deo okosnica ali i mreža za pristup, javila se potreba da se MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) tehnologija prilagodi za primenu u optičkim mrežama. To bi omogućilo integraciju mreža koje koriste različite tehnologije i medijume za prenos u jednu zajedničku mrežu [128-131] što je postavljeno kao zadatak pred GMPLS skup signalizacionih protokola.

Osnovna ideja u razvoju GMPLS arhitekture jeste da se definiše zajednički skup kontrolnih funkcija i mehanizama povezivanja koji omogućavaju jedinstvenu komunikaciju, rutiranje i kontrolu, preko različitih transportnih tehnologija kao što su IP, ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), SONET/SDH (*Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy*) i DWDM. U postojećim mrežama, svaka tehnologija poseduje sopstvene kontrolne ravni, zbog čega se mreža sastoji od više slojeva, svaki od njih ima sopstvenu konfiguraciju i rezervaciju resursa, a upravljanje od jedne do druge tačke u takvoj mreži preko nekoliko kontrolnih ravni je veoma teško.

Protokoli od kojih se sastoji GMPLS su:

- *Resource Reservation Protocol- Traffic Engineering (RSVP-TE)* i alternativni *Constraint-Based Routing- Label Distribution Protocol (CR-LDP)* signalizacioni protokoli, mada se od 2002. god. IETF fokusira samo na RSVP-TE.
- *Internal Gateway Protocol (IGP)* sa TE ekstenzijama (*OSPF-TE* i *Intermediate System to Intermediate System-TE (ISIS-TE)*) protokoli rutiranja.
- *Link Management Protocol (LMP)* i *LMP-DWDM* protokoli za upravljanje linkom.

Proširenje MPLS-a na optičke mreže izvodi se na nekoliko načina: razdvajanje kontrolne i korisničke ravni, mogućnost identifikacije linkova bez IP adresa, grupisanje linkova i proširenje LSP (*Label Switched Path*) na TE link [132], a takođe je i omogućena interkonekcija preko različitih mrežnih tehnologija. Uvođenje fleksibilnog grida u optičke mreže čini postupak projektovanja kontrolne ravni složenijim. Projektovanje kontrolne ravni EON mreža zasnivaće se na principima GMPLS-a uz odgovarajuća poboljšanja i izmene skupa GMPLS protokola, s obzirom da se akcenat stavlja na RSA problem i frekvencijske slotove.

Glavne funkcije kontrolne ravni u GMPLS mreži, koja upravlja konekcijom koja pripada korisničkoj ravni su sledeće [31]:

- kontrola rutiranja (otkrivanje topologije i resursa mreže kao i proračun putanja),
- signalizacija (sintaksa u komunikaciji),
- upravljanje konekcijom i lokalnim resursima,
- određivanje susedstva čvorova u mreži,
- definisanje zaštitnih putanja u slučaju otkaza.

U optičkim mrežama postoje dva načina projektovanja kontrolne ravni: signalizacija unutar optičkog vlakna i van prenosnog opsega i signalizacija van optičkog vlakna i van prenosnog opsega. Sa aspekta pouzdanosti, kašnjenja itd. svaki od navedenih metoda ima određene prednosti i nedostatke, pa je u ovom delu disertacije predstavljen hibridni metod za uspostavljanje kontrolne ravni kojim se

kombinuju prednosti prethodna dva. Predloženi metod omogućava fleksibilno planiranje i dizajn kontrolne ravni odnosno daje mogućnost projektantu mreže da smanjuje kašnjenje ili da unapređuje pouzdanost kontrolne ravni mreže. Analiza i primena predloženog metoda detaljno je predstavljena u [133]. Rezultati simulacije su pokazali da je hibridni metod primenjiv i za inženjering saobraćaja između domena odnosno za uspostavljanje LSP putanja u scenarijima sa više domena gde je neophodno poznavanje stanja TE linkova i GMPLS informacija van granica domena u kome se vrši proračun putanje [133].

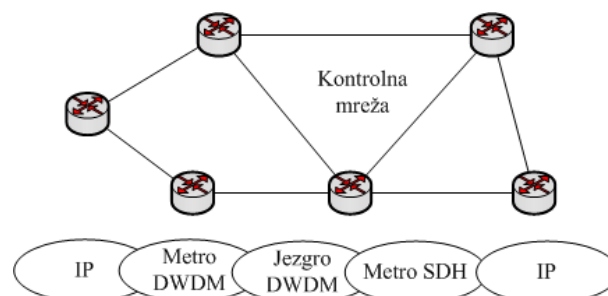
## 7.1. Generalizacija kontrolne ravni

Ideja da se osnovni koncepti MPLS tehnologije, originalno razvijeni za mreže sa komutacijom paketa, generalizuju i primene u sistemima sa vremenskom, prostornom ili komutacijom talasnih dužina uslovlila je razvoj generalizovane multiprotokolske komutacije labela. GMPLS podrazumeva modifikaciju protokola za signalizaciju i protokola rutiranja sa ciljem da omogući optimalno korišćenje resursa, razvoj protokola za upravljanje linkovima u optičkoj mreži i razvoj novih mogućnosti za inženjering saobraćaja [128-131].

U MPLS tehnologiji, svaki paket se obeležava jedinstvenim identifikatorom koji se naziva labela i koju svaki ruter u mreži koristi da odredi sledeći hop za paket. Novi format labela ili „generalizovana labela“ omogućava uređaju koji prima podatke da programira svoj komutator i da prosleđuje saobraćaj bez obzira u kojem je obliku. Pošto su resursi direktno pridruženi labelama, putanja komutirana labelom (LSP) definiše se kao niz susednih kros-konektovanih resursa sposobnih za isporuku saobraćaja. Informacija koja se nalazi u generalizovanoj labeli sadrži:

- Tip labela koji se prenosi,
- Tip komutacije
- Tip korisničke informacije koji se prenosi kroz LSP.

Prema tome, tehnologija korišćena za GMPLS kontrolnu ravan ostaje IP bazirana, dok matrica podataka uključuje raznovrsni saobraćaj (slika 7.1.). GMPLS kontrolna ravan podrazumeva uspostavljanje LSP s kraja na kraj a sastoji se od ravnopravnih mrežnih elemenata. Svi linkovi i čvorovi GMPLS mreže dele isti IP adresni prostor a informacije se mogu prosleđivati svim čvorovima mreže. Rezultat razdvajanja kontrolne i korisničke ravni je da, u slučaju otkaza na konekcijama kontrolne ravni, ne dolazi do problema u isporuci podataka.



Slika 7.1. Generalizacija/unifikacija kontrolne ravni [132]

Tri osnovne organizacije koje se bave standardizacijom i konfigurisanjem fleksibilne kontrolne ravni u optičkim mrežama su: IETF organizacija koja je razvila skup protokola koji obavljaju funkcije kontrolne ravni GMPLS mreže; ITU koja je razvila standard za automatski komutiranu optičku mrežu, ASON (*Automated Switched Optical Network*) i OIF (*Optical Internetworking Forum*) koja

radi na razvijanju standarda O-UNI (*Optical User-to-Network Interface*) i O-NNI (*Optical User-to-Network Interface*) i usklađuje rešenja prethodna dva standarda.

## 7.2. Signalizacija u GMPLS mrežama

Kako bi se MPLS mogao koristiti u optičkom domenu (prosleđivanje kroz OXC) razvijena je ideja da se potpuno odvoji kontrolna ravan od ravni podataka. Trenutni mehanizmi zauzimanja mrežnih resursa u optičkim mrežama su statički i zahtevaju manuelnu konfiguraciju. Ukoliko bi se dozvolilo krajnjim korisnicima da sami generišu zahteve za mrežnim resursima, tada bi se smanjila opterećenost mrežnih operatora. Taj cilj traži razvoj inteligentnih optičkih komutatora koji bi imali mogućnost kontrole kapaciteta s kraja na kraj, te distribucije na optičkom sloju.

Signalizacija u GMPLS mrežama podrazumeva proces razmene poruka u kontrolnoj ravni sa ciljem uspostavljanja, održavanja, modifikacije i raskida putanja podataka u korisničkoj ravni. LSP putanje kojima su podržani servisi imaju svojstva tunela (LSP tunel) jer se labeliranjem podataka u izvornom čvoru i njihovim prosleđivanjem definisanom interfejsu, selektuje LSP, a zatim određište [129]. Svaka LSP se identifikuje kao deo sesije pomoću objekta *Session* (RSVP-TE objekat koji sadrži određište tunela, 16-bitni identifikator i prošireni identifikator tunela kojim se definiše izvor tokova saobraćaja). Termin LSP ima definisano značenje i u kontrolnoj i u korisničkoj ravni. U korisničkoj ravni, LSP je putanja prosleđivanja podataka definisana u komutatoru a u kontrolnoj ravni LSP je stanje uspostavljeno preko protokola za signalizaciju, kako bi se upravljalo LSP putanjom u korisničkoj ravni.

Razmena signalizacionih poruka odvija se posredstvom posebnog protokola između softverskih komponentata koje nazivamo signalizacionim kontrolerima, a koji međusobno komuniciraju preko kontrolnih kanala. Identifikuju se preko IP adresa tako da je kontrolna ravan u stvari IP mreža. Pod kontrolnim komunikacionim kanalom podrazumeva se fizički ili logički link koji je uspostavljen između signalizacionih kontrolera odgovornih za susedne komutatore u korisničkoj ravni [129].

Signalizaciona mreža predstavlja osnovu kontrolne ravni optičke transportne mreže. U IP/MPLS mrežama signalizacione poruke se prenose po istim kanalima kao korisnički podaci i za kontrolne kanale se kaže da su unutar opsega (u opsegu). Pošto analiziranje tokova podataka s ciljem izdvajanja signalizacionog saobraćaja nije praktično u optičkim mrežama (u uređajima za kros-konekciju), ovde se signalizacioni saobraćaj prenosi posebnim kanalima tj. odvojeno od korisničkog saobraćaja. U zavisnosti od toga kako je kontrolni kanal projektovan, postoje sledeće vrste signalizacije [131]:

- Signalizacija unutar optičkog vlakna i van prenosnog opsega, IFOB (*In-Fibre-Out-of-Band*)-signalizacione poruke se prenose preko rezervisanog kanala (slot, talasna dužina itd.) odvojeno od kanala koji prenose korisničku informaciju, ali unutar istog optičkog vlakna. Dakle, signalizacione poruke se ne multipleksiraju sa korisničkim podacima.
- Signalizacija van optičkog vlakna i van prenosnog opsega, OF (*Out-of-Fibre*)-signalizacione poruke se prenose preko posebnog fizičkog linka unutar posebnog optičkog vlakna koje se isključivo koristi za prenos signalizacionih poruka. Kontrolni saobraćaj se rutira kroz posebnu mrežu koju čine signalizacioni kontroleri i optička vlakna koja prenose takav saobraćaj.

Kada je u pitanju vreme uspostave LSP putanje, pokazano je da IFOB predstavlja bolje rešenje [134], dok je OF metod bolje rešenje u slučaju otkaza u korisničkoj ravni [135]. OF konfiguracija takođe omogućava fleksibilna rešenja vezana za skalabilnost rutiranja u kontrolnoj ravni (uvođenje PCE (*Path Computation Elements*) elemenata). Prednosti i nedostaci navedenih metoda, detaljnije poređenje sa aspekta vremena uspostave LSP putanje, dodavanja novih resursa, otkaza, pouzdanosti i sl. mogu se pronaći u [136, 137].

### 7.3. Ekstenzije kontrolne ravni elastičnih optičkih mreža

Kontrolna ravan obuhvata niz protokola koji su zaduženi za uspostavljanje konekcija, agregaciju saobraćaja, kvalitet servisa kao i za određene strategije u slučaju otkaza [31]. Pošto tehnologija fleksibilnog grida omogućava uspostavljanje super kanala odnosno optičkih putanja velikog kapaciteta, kontrolna ravan EON mreža mora omogućiti sledeće uslove:

- fleksibilnost optičkih putanja sa aspekta veličine ili širine
- različite vrste modulacije
- promenu veličine kanala
- pridržavati se dodeljenih frekvencija definisanih u [2]
- sposobnost paralelnog upravljanja čvorovima mreže koji podržavaju i fleksibilni i fiksni grid
- brzi oporavak u slučaju otkaza
- vraćanje mreže u prvobitno stanje nakon oporavka od otkaza

S obzirom da je GMPLS najčešća arhitektura kontrolne ravni kod optičkih mreža, prirodno je da će se projektovanje kontrolne ravni EON mreža takođe zasnivati na principima GMPLS-a, uz odgovarajuća poboljšanja i izmene skupa GMPLS protokola. Pitanja skalabilnosti kao i protokoli kontrolne ravni EON mreža moraju se prilagoditi granularnosti od 12.5 i 6.25 GHz a u nekim studijama je čak analizirana i granularnost od 3 GHz [138]. Kod EON mreža akcentat se stavlja, ne na talasne dužine kao kod klasičnih WDM mreža, već na frekvencijske slotove. S tim u vezi, predložene su modifikacije RSVP i OSPF protokola, RSVP-TE i OSPF-TE, respektivno, sa mogućnošću inženjeringa saobraćaja. Određeni predlozi kontrolne ravni za EON mreže kao i ekstenzije GMPLS protokola prikazani su u [31], [139, 140].

Tabela 7.1. prikazuje pitanja koja se odnose na kontrolnu ravan i njene zadatke kod pojedinih RSA algoritama.

Tabela 7.1. Pitanja kontrolne ravni EON mreža i pojedinih RSA algoritama [31]

Algoritam	Kontrolna ravan
Statički RSA	Kontrolna ravan raspolaže sa informacijama koje se odnose na širinu frekvencijskog slota i granularnost nominalnih centralnih frekvencija.
Dinamički RSA	Kontrolna ravan raspolaže sa informacijama koje se odnose na širinu frekvencijskog slota i granularnost nominalnih centralnih frekvencija. Poznavanje stanja trenutnih/aktivnih konekcija i slotova koji su zauzeti.
RMSA	Poznavanje vrste modulacije svih aktivnih konekcija i njihovih karakteristika kao što su: format modulacije, broj bita po simbolu, broj podnosilaca i maksimalno rastojanje.
RSA sa promenljivim saobraćajem	Poznavanje varijacija i profila saobraćaja konekcija. RSVP protokol mora razlikovati rezervisane od realociranih slotova. Ažuriranje baze o stanju mreže.
RSA sa uključenim oporavkom od otkaza mreže	Kontrolna ravan raspolaže sa informacijama o alternativnim ( <i>back-up</i> ) rutama i vrstama zaštite konekcija u slučaju otkaza. Informacija o rezervisanim resursima za slučaj otkaza obuhvata broj slotova i nominalne centralne frekvencije.
RSA sa defragmentacijom	Kontrolna ravan pokreće mehanizam defragmentacije (realokacija slotova) na osnovu definisane granice fragmentacije slotova.
RSA i QoS	Kontrolna ravan raspolaže sa informacijama o prioritnim konekcijama prilikom proračuna ruta i dodele slotova konekcijama odnosno definišu se konekcije nižeg i višeg prioriteta.
Agregacija saobraćaja	Čvorovi moraju prepoznavati signale različitih konekcija i vršiti njihovo filtriranje. Oslanjaju se na LSP set labela.

### 7.3.1. Link Management Protocol (LMP) protokol

LMP protokol pripada GMPLS steku protokola i zadužen je za upravljanje linkovima mreže. Osnovni zadaci protokola odnose se na [141]:

- pregovaranje o parametrima linka,
- potvrda o povezanosti linka,
- identifikacija karakteristika linka susednog čvora,
- izolacija greške.

Inicijative od strane IETF-a usmerene su na prilagođavanje LMP protokola EON okruženju zbog zamene DWDM čvorova sa EON čvorovima. Novi način kodovanja gde se LMP proširuje sa mogućnošću podešavanja parametara predložen je u [142]. Link između dva *flexgrid* čvora, svaki sa različitom granularnošću, mora biti konfigurisan na način da podržava veću granularnost. U slučaju dva čvora koji podržavaju različite širine slotova, potrebno je pronaći odgovarajući presek opsega. Npr. ako jedan čvor podržava opseg od 12.5- 100 GHz a susedni čvor 25- 200 GHz presek opsega na linku između ovih čvorova će biti podešen na 25- 100 GHz.

U klasičnom radu GMPLS-a susedni čvorovi razmenjuju *LinkSummary* poruke koje sadrže informaciju o karakteristikama zajedničkih linkova. Kada se primi poruka od susednog čvora, porede se informacije sa onim koje su skladištene u lokalnoj bazi. Za rad u EON mrežama, karakteristike kao što su vrsta rešetke i razmak između kanala koje podržava određeni čvor predstavljene su uvođenjem objekata *grid property* i *channel spacing* [143]. Provera povezanosti čvorova odvija se na bazi frekvencijskog slota umesto talasne dužine.

### 7.3.2. Open Shortest Path First- Traffic Engineering (OSPF-TE)

OSPF-TE koristi koncept transparentnog oglašavanja stanja linka– LSA (*Link State Advertisement*). Informacije potrebne za inženjering saobraćaja razmenjuju se transparentno između rutera, kako ih ruteri ne bi procesirali u postupku IP rutiranja, a prosledili susednim ruterima i TED (*Traffic Engineering Database*) bazi. LSA poruke sadrže atribute rutera i linkova tačka-tačka. Osnovna jedinica razmene informacija u okviru OSPF-TE protokola je LSA. Svaka LSA ima identifikator kako bi se znalo koji je tip informacije u pitanju i prosleđuje se svakom od rutera u domenu postupkom plavljenja što je prvenstveno zastupljeno i kod OSPF protokola.

Struktura TE LSA polja podataka je oblika: tip-dužina-vrednost (*Type-Length-Value*, TLV). TLV TE linka se koristi za oglašavanje atributa TE linka pošto u procesu inženjeringa saobraćaja nije dovoljno koristiti samo informacije o karakteristikama linkova već je neophodno predstaviti TE linkove kao apstrakcije koji svojim atributima predstavljaju mrežne resurse. Svaki atribut je kodiran kao pod-TLV. TE link nije raspoloživ ukoliko oba njegova kraja (ruteri na oba kraja) nisu međusobno korelisana, odnosno, da bi se ostvarila sinhronizacija između linkova (obe strane linka) uvedeni su sledeći atributi: tip linka (tačka-tačka i linkovi sa višestrukim pristupom), ID linka (identifikator rutera na drugom kraju TE linka), IP adresa lokalnog interfejsa, IP adresa udaljenog interfejsa, identifikator lokalnog linka, identifikator udaljenog linka. Informacije o TE linkovima se nalaze u bazi podataka inženjeringa saobraćaja (TED).

Da bi to funkcionisalo u EON mrežama neophodno je da protokol opisuje stanje elemenata mreže, i to BVT i ROADM, kao i informacije o stanju TE linkova koje se odnose na nominalnu centralnu frekvenciju i raspoloživost frekvencijskih slotova. U [144] razmatrane su dve ekstenzije OSPF-TE protokola. Prva podrazumeva uvođenje polja *zauzet/raspoloživ* u LSA *Label Set* objekat čime bi se

omogućila razmena informacija o stanju susednih slotova. Uvode se pojmovi početni slot, krajnji slot i trenutno stanje slotova. Druga ekstenzija se odnosi na oglašavanje stanja slotova preko *bitmapa* čija se veličina razlikuje u zavisnosti od ukupnog broja slotova na optičkom linku.

### 7.3.3. Signalizacija i rezervacija resursa

Signalizacija u GMPLS mreži se odvija preko RSVP-TE protokola a dodela spektra vrši se u svakom čvoru po prijemu RSVP-TE *Path* poruke koja u stvari predstavlja zahtev za uspostavljanje optičke putanje između izvorno-odredišnog para čvorova. RSVP-TE predstavlja proširenje RSVP protokola uvođenjem inženjeringa saobraćaja i koncepta tunela, pošto se GMPLS fokusira na isporuku servisa od jednog do drugog kraja mreže (tunel). Inženjering saobraćaja ima za cilj optimizaciju korišćenja resursa mreže u cilju njihovog optimalnog planiranja i projektovanja kao i obezbeđenja zahtevanih performansi u mreži. Da bi se omogućio inženjering saobraćaja, RSVP-TE uvodi nove generalizovane objekte: *Label Request*, *Label* (koji se pridružuju porukama *Path* i *Resv* (prihvatanje veze i potvrda rezervacije resursa), i mora ih podržavati svaki čvor LSP tunela), labelu za komutaciju opsega talasnih dužina, zatim *Suggested Label* i *Label Set*. Svi zajedno predstavljaju generalizovanu labelu. Za vreme procesa signalizacije RSVP-TE pretražuje susedne slotove na zahtevanim linkovima (*hop-by-hop*) i ažurira objekat *Label Set*.

Signalizacioni kontroleri, u IP datagramima razmenjuju RSVP-TE poruke odnosno poruke za uspostavljanje, održavanje i prekid TE LSP-a, te signalizaciju grešaka. Razlika u odnosu na klasični RSVP je u tome što je RSVP podrazumevao rezervaciju resursa za pojedinačni tok saobraćaja. U GMPLS mreži, cilj je da kontrolne poruke prate rezervaciju resursa odnosno da poruke kontrolne ravni slede definisanu putanju između signalizacionih kontrolera i time uspostavljaju putanje podataka u korisničkoj ravni. Svaka GMPLS RSVP-TE poruka sastoji se, u opštem obliku, od zaglavlja i serije objekata koji se mogu sastojati i od podobjekata. Zaglavlje definiše tip i dužinu poruke.

Proces signalizacije u EON mrežama odnosi se na:

- Format labele,
- Kontrolisanu identifikaciju resursa,
- Stanje frekvencijskih slotova,
- Karakteristike korisničkih signala i
- *Explicit Route Object* (ERO)- ruta LSP

RSVP-TE ekstenzije podrazumevaju sledeće:

- U okviru objekta *Label Request* koji se nalazi u *Path* poruci, potrebno je proširiti polje koje se odnosi na komutaciju da bi se mogle opisati LSP sa adaptivnim protokom;
- Objekti *Upstream Label*, ERO, *Label* i *Record Route* sadrže informaciju o početnom i krajnjem slotu;
- Objekti *Sender TSpec* i *Flow Spec* sadrže informaciju o vrsti modulacije, broju podnosilaca, itd.

### 7.3.4. Softverski definisane mreže

Kao alternativa GMPLS arhitekturi kontrolne ravni EON mreža, predložena je softverski definisana mreža sa *OpenFlow* protokolom [30], [145]. U *OpenFlow* paketski baziranoj mreži svaki komutator

sadrži tabelu tokova podataka. Tok podataka se u EON mreži identifikuje preko interfejsa, nominalnom centralnom frekvencijom, širinom slota, brojem slotova i tipom signalnog polja dodeljenog komutatoru. Karakteristike EON mreža omogućavaju softversku programabilnost koja znači programabilne optičke signale sa različitim kapacitetom i alokacijom spektra. SDN mrežu omogućava implementacija softverski programabilnih predajnika i prijemnika koji se prilagođavaju protoku, vrsti modulacije, ekvalizaciji signala i korekciji grešaka.

Inicijalno predložen za MPLS i GMPLS, PCE element takođe može biti implementiran zbog skalabilnosti rutiranja u kontrolnoj ravni baziranoj na *OpenFlow* protokolu. Kada se implementira u EON mrežama, PCE može preuzeti RSA postupak ili zbog složenosti samog problema, PCE može preuzeti postupak rutiranja a dodelu spektra preuzima RSVP protokol [146, 147]. PCE protokol (PCEP) u EON mrežama proširuje se sa RSA ograničenjima i da bi obuhvatio informacije koje se odnose na fleksibilnost mreže. Npr. PCE *reply* poruka (*PCRep*) mora uključiti dodatne objekte koji se odnose na vrstu modulacije i broj zahtevanih slotova. Kada je u pitanju problem fragmentacije, dve ekstenzije PCE protokola predložene su u [148]. Ekstenzije se odnose na dva nova tipa poruka: *Spectrum Defragmentation Request Message* i *Spectrum Defragmentation Reply Message*. Obe poruke su unapređene sa objektom *Spectrum Defragmentation Target Object* (SDTO) koji sadrži informaciju o dozvoljenoj granici fragmentacije opsega (*fragmentation threshold*), nakon koje se aktivira mehanizam defragmentacije.

#### 7.4. Hibridni metod za uspostavljanje kontrolne ravni u GMPLS mrežama

Osnovni cilj predloženog hibridnog metoda jeste da kombinuje prednosti IFOB i OF metoda analizom posmatrane topologije mreže i da se primenom istog ostvari kompromis između zahteva sa aspekta niskog kašnjenja i visoke pouzdanosti. Ideja je da se u čvorove mreže sa većim stepenom povezanosti implementiraju signalizacioni kontroleri, dok ostali čvorovi mreže ostvaruju signalizaciju preko proksi rutera koji funkcionišu kao posebni kontroleri. IFOB metod se primenjuje samo na one linkove koji povezuju čvorove sa većim stepenom čvora. U slučaju da dođe do otkaza na takvom linku, dolazi do gubitka saobraćaja i na kontrolnoj i na korisničkoj ravni zbog čega procenat takvih linkova treba biti ograničen. Naravno, potrebno je primenjivati procedure oporavka mreže. U ostalim segmentima mreže, gde se koristi OF metod, primenjuju se mehanizmi zaštite protiv pojedinačnih otkaza u okviru kontrolne ravni (preusmeravanje na IP sloju i sl.).

Mreža se posmatra kao graf sa  $N$  čvorova i  $L$  linkova. Stepenn čvora mreže je označen sa  $k_n$ , a srednja vrednost stepena čvora mreže,  $\bar{k}$ , data je izrazom:

$$\bar{k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N k_n = \frac{2L}{N} \quad (7.1)$$

Raspodela stepena čvora, JDD (*Joint Degree Distribution*) podrazumeva verovatnoću da slučajno odabran link mreže povezuje čvorove koji imaju  $k$  i  $k'$  stepene čvorova.

$$JDD(k, k') = L((k, k')/L \quad (7.2)$$

gde je  $L(k, k')$  ukupan broj linkova koji povezuju čvorove sa stepenom čvora  $k$  i  $k'$ .

Neka su  $k_{min}$  i  $k_{max}$  minimalni i maksimalni stepen povezanosti čvora, respektivno, a  $k_T$  je prag stepena čvora za koji važi  $k_{min} < k_T < k_{max}$ . Dalje,  $p_{IF}$  je verovatnoća da slučajno odabran link mreže povezuje čvorove kod kojih je  $k_n \geq k_T$ , a data je izrazom:

$$p_{IF} = JDD(k_n \geq k_T, k_n \geq k_T) \quad (7.3)$$



Unapred definisana gornja granica  $p_{IF}$  je označena sa  $P_{max}$ .

Predloženi hibridni metod sastoji se od sledećih koraka:

Korak 1: Definirati vrednost  $P_{max}$ .

Korak 2: Za svaki čvor mreže  $n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$  izračunati stepen čvora  $k_n$ .

Korak 3: Pronaći  $k_{min}$  i  $k_{max}$ .

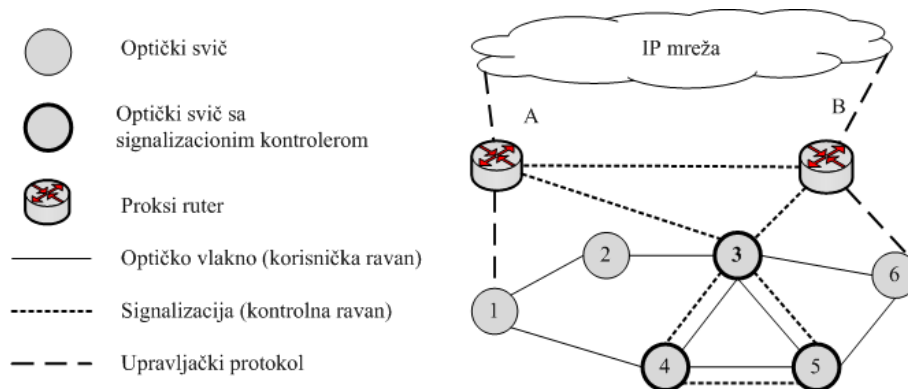
Korak 4: Postaviti granicu  $k_T$ ,  $k_{min} < k_T < k_{max}$ .

Korak 5: Izračunati  $p_{IF}$ .

Korak 6: Ako je  $p_{IF} \leq P_{max}$  prelazi se na korak 7, inače se vratiti na korak 4.

Korak 7: Za svaki čvor  $n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , ukoliko je  $k_n \geq k_T$ , implementirati signalizacioni kontroler u optički komutator. U suprotnom primeniti proksi ruter.

Granica  $k_T$  omogućava fleksibilno planiranje i dizajn odnosno projektovanje kontrolne ravni. Za početnu vrednost obično se postavlja  $k_T = \bar{k}$ , a kasnije se menja u skladu sa ciljem. Ilustracija predloženog metoda je predstavljena na slici 7.2.



Slika 7.2. Ilustracija predloženog hibridnog metoda

Mreža se sastoji od 6 čvorova sa stepenima čvorova:  $k_1 = k_2 = k_6 = 2$ ,  $k_3 = 4$ ,  $k_4 = k_5 = 3$ . Srednja vrednost stepena čvora je  $\bar{k} = 2.67$  a vrednost  $k_T = \bar{k} = 3$ .  $P_{max} = 0.5$ . Na osnovu izraza (7.2) dobija se vrednost  $p_{IF} = 0.375 < P_{max}$ . Dakle, signalizacione kontrolere je potrebno implementirati u svičeve 3, 4 i 5. Susedni čvorovi 1 i 2 imaju stepen čvora manji od  $k_T$  pa dele isti proksi ruter, A. Susedni čvorovi čvora 6 imaju implementirane signalizacione kontrolere, pa ovaj čvor koristi poseban proksi ruter, B. Proksi ruteri komuniciraju preko protokola za upravljanje.

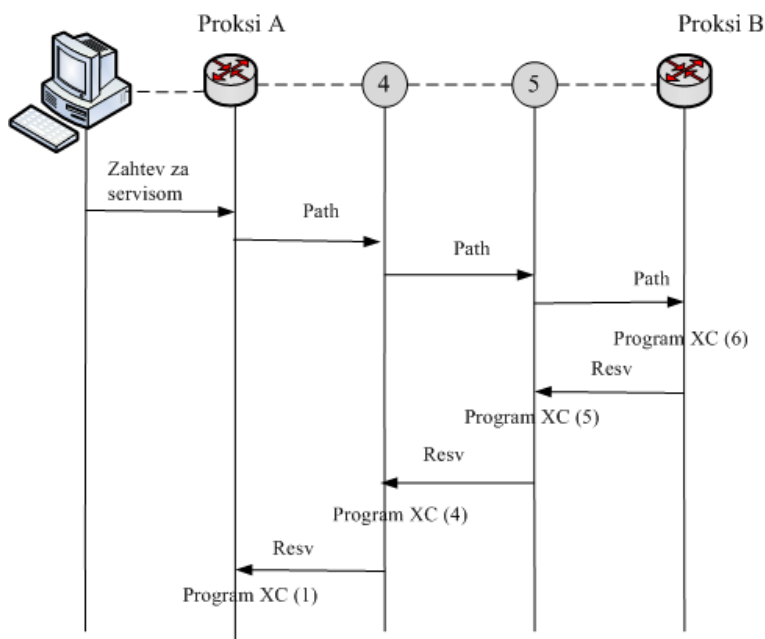
Primer RSVP-TE signalizacije u procesu uspostavljanja LSP putanje 1-4-5-6 (za mrežu sa slike 7.2.) u korisničkoj ravni prikazan je na slici 7.3. Inicijalizacija uspostave LSP putanje vrši se preko poruke *Path* koju prosleđuje signalizacioni kontroler A u *downstream* smeru. Porukom *Resv* prihvata se uspostava veze i potvrđuje rezervacija resursa (proksi ruter B). Poruka *Resv* se prosleđuje od čvora do čvora u *upstream* smeru i to podrazumeva kros-konekciju resursa u korisničkoj ravni (*Program XC*).

U GMPLS mreži, cilj je da kontrolne poruke prate rezervaciju resursa odnosno da poruke kontrolne ravni slede definisanu putanju između signalizacionih kontrolera i time uspostavljaju još stabilnije putanje podataka u korisničkoj ravni. RSVP-TE poruke su izvedene iz osnovne RSVP specifikacije tj. preslikavaju se iz bazičnih u RSVP-TE poruke (tabela 7.2.).

Dve osnovne RSVP poruke su: *Path* poruka- zahtev za uspostavu LSP i *Resv* poruka- prihvatanje uspostave LSP.

Tabela 7.2. Bazične RSVP poruke mapirane u poruke RSVP-TE protokola

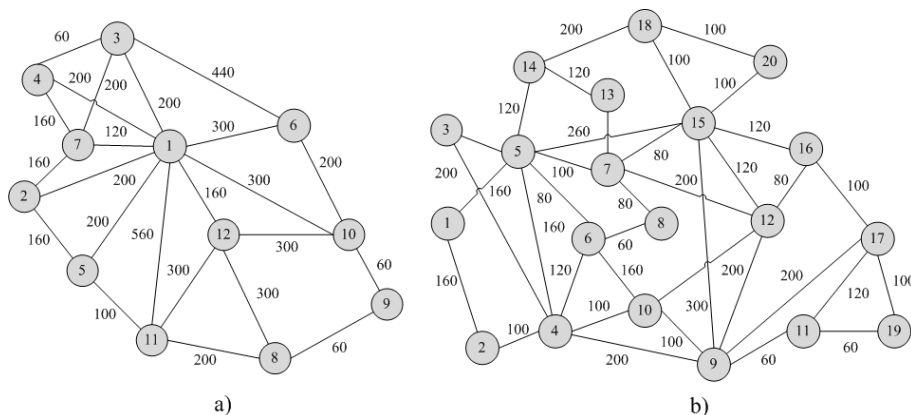
Bazična poruka	RSVP-TE poruka	Funkcija
LSP setup	Path	Zahtev za uspostavu LSP
LSP Accept	Resv	Prihvatanje uspostave LSP
LSP Confirm	ResvConfirm	Potvrda o uspostavljanju LSP
LSP Upstream error	PathErr	Greška na LSP u upstream smeru
LSP Downstream error	ResvErr	Greška na LSP u downstream smeru
LSP Downstream release	PathTear	Zahtev za raskid LSP u downstream smeru
LSP Upstream release	ResvTear	Zahtev za raskid LSP u upstream smeru
LSP Notify	Notify	Izveštavanje



Slika 7.3. Primer uspostave LSP putanje

## 7.5. Numerički eksperimenti- analiza performansi mreže

Primenom simulatora NS2 i njegovih alata *Trace Graph* i *NS2 Trace Visual Analyser*, simulirane su tri konfiguracije kontrolne ravni IFOB, OF i hibridni metod. Topologije ispitivanih mreža, NET1 i NET2, prikazane su na slici 7.4. Za obe mreže vrednost  $P_{max} = 0.5$ .  $\bar{k}_{NET1} = 3.83$  i  $\bar{k}_{NET2} = 3.80$  pa su početne vrednosti  $k_{T, NET1} = k_{T, NET2} = 4$ . Izračunate su vrednosti  $p_{IF, NET1} = 0.348$  i  $p_{IF, NET2} = 0.447$ .

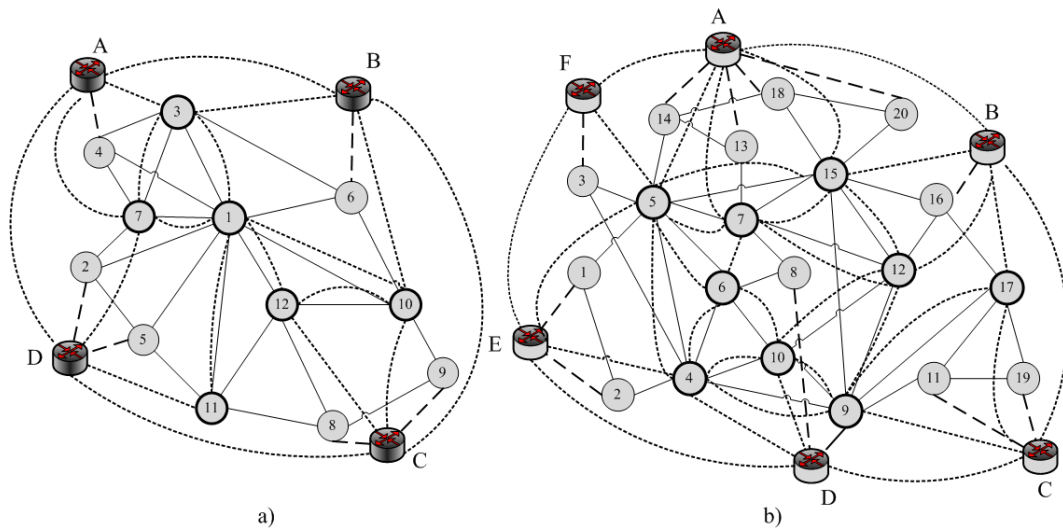


Slika 7.4. Topologije posmatranih optičkih mreža: a) NET1 i b) NET2

U IFOB konfiguraciji kontrolne ravni signalizacioni kontroleri su implementirani u komutatore koji se nalaze u korisničkoj ravni. Propagaciono kašnjenje se računa kao  $t_p = d/v$ , gde se  $d$  odnosi na fizičko rastojanje između čvorova (prikazano na slici 7.4.) a  $v$  na brzinu prostiranja svetlosti kroz vlakno ( $2 \times 10^8$  m/s). Vreme potrebno za obradu paketa u signalizacionom kontroleru je 10 ms [149].

U OF konfiguraciji, svaki komutator je povezan u IP mrežu. Rezervisani propusni opseg za signalizacioni saobraćaj na svakom linku je 20 Mb/s. Pretpostavka je da je srednje kašnjenje na svakom linku u mreži (*hop-by-hop*) 2.5 ms (uključujući propagaciono kašnjenje, vreme čekanja i obradu paketa).

Hibridna konfiguracija kontrolne ravni prikazana je na slici 7.5. NET1 kontrolna ravan sastoji se od 6 implementiranih signalizacionih kontrolera (čvorovi 1, 3, 7, 10, 11 i 12) i 4 proksi rutera (A-D). NET2 kontrolna ravan sastoji se od 9 implementiranih signalizacionih kontrolera (čvorovi 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 15 i 17) i 6 proksi rutera (A-F). Srednje kašnjenje na svakom linku između rutera i između rutera i signalizacionih kontrolera je 2.5 ms (propagaciono kašnjenje, vreme čekanja i obrada paketa).



Slika 7.5. Primena hibridnog metoda: a) NET1 i b) NET2

Signalizacione poruke se rutiraju preko najkraće putanje. Pretpostavimo da se jedna bidirekciona LSP putanja u isto vreme uspostavlja između svakog para čvorova. Ukupan broj simultano uspostavljenih putanja je  $S = N * (N-1) / 2$  pa je za posmatrane topologije mreža  $S_{NET1} = 66$  i  $S_{NET2} = 190$ . Takođe,  $m_{i,j}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N, i < j$ ) je ukupan broj čvorova koji generišu bidirekzione putanje između čvorova  $i$  i  $j$ . Broj signalizacionih poruka koje se razmenjuju u jednoj transakciji *request-response* (zahtev-uspostava) je  $M_{i,j} = 2 * (m_{i,j} - 1)$ . Ukoliko je simultano uspostavljeno  $S$  putanja, ukupan broj signalizacionih poruka,  $M$ , je:

$$M = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{i,j} = 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (m_{i,j} - 1), \quad i < j \quad (7.4)$$

Simulacijom su za posmatrane mreže dobijene vrednosti  $M_{NET1} = 238$  i  $M_{NET2} = 902$ . Srednje i maksimalno vreme potrebno za uspostavu LSP putanje, za  $k_T = 4$ , prikazano je u tabeli 7.3. Može se primetiti da je vreme uspostave LSP putanje dobijeno primenom hibridnog metoda približno jednako vremenu dobijenom preko IFOB metoda. Pošto u mreži NET1 samo čvor 1 ima stepen čvora veći od 4, a čvor 9 stepen čvora manji od 3, postavljanje vrednosti  $k_T = 4$  je odgovarajuće rešenje za kontrolnu ravan ove mreže.

Topologija NET2 mreže pruža više mogućnosti za izbor vrednosti  $k_T$ . U tabeli 7.4 nalazi se srednje i maksimalno vreme potrebno za uspostavu LSP putanje i verovatnoća  $p_{IF}$  za veće vrednosti granice  $k_T$

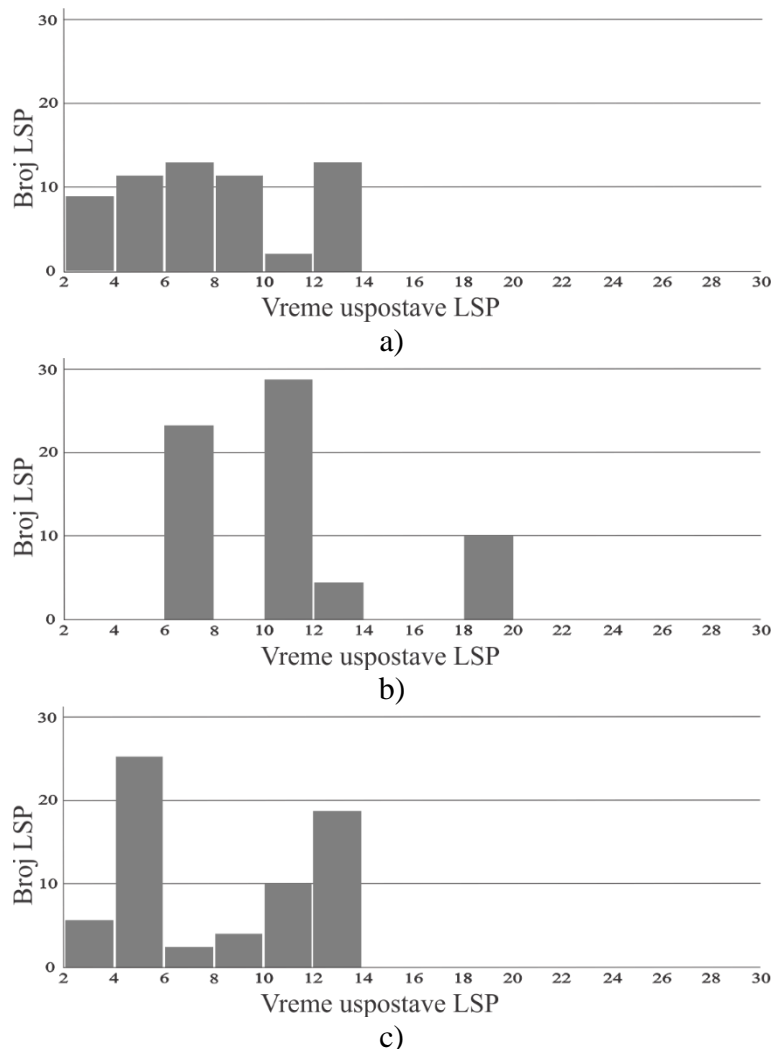
(5, 6 i 7). Dobijeni rezultati pokazuju da izbor vrednosti  $k_T$  daje mogućnost projektantu mreže da smanjuje kašnjenje ili da unapređuje pouzdanost kontrolne ravni mreže.

Tabela 7.3. Srednje i max vreme uspostave LSP putanje

Metod	NET1		NET2	
	Srednje vreme uspostave	Max vreme uspostave	Srednje vreme uspostave	Max vreme uspostave
IFOB	8.02 ms	14.10 ms	8.26 ms	16.82 ms
OF	10.60 ms	18.30 ms	14.28 ms	29.92 ms
Hibridni metod, $k_T = 4$	8.54 ms	13.60 ms	9.02 ms	17.50 ms

Tabela 7.4. Performanse NET2 mreže za različite vrednosti  $k_T$

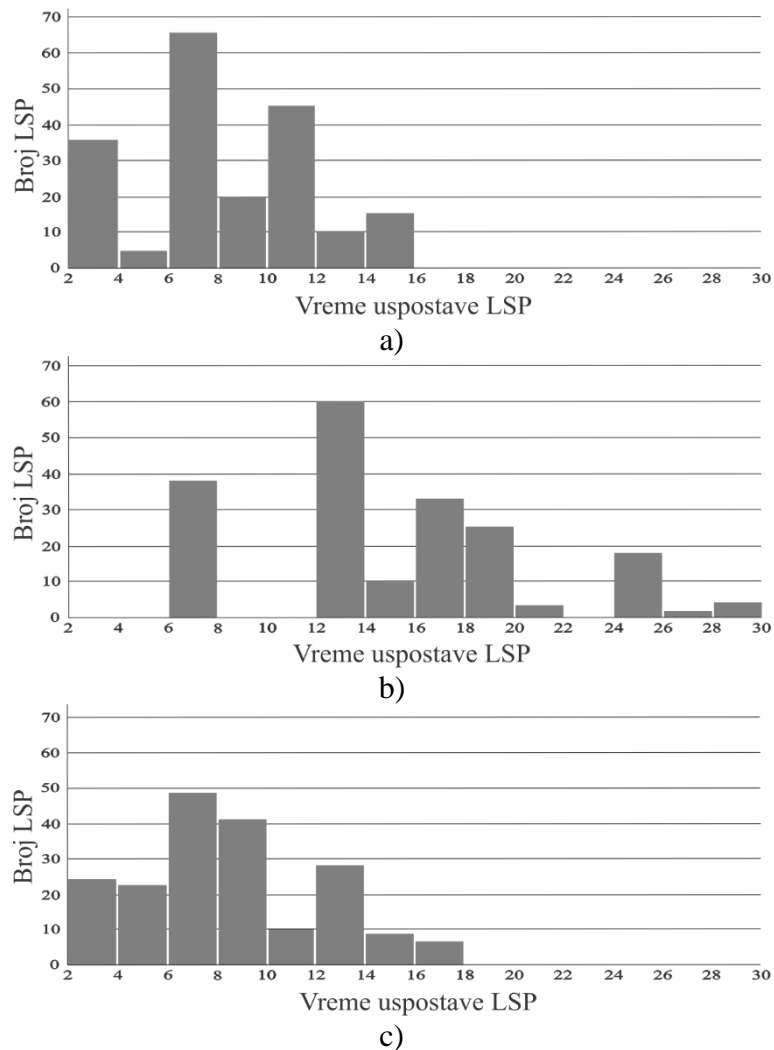
$k_T$	Srednje vreme uspostave	Max vreme uspostave	$p_{IF}$
5	9.19 ms	18.83 ms	0.316
6	11.98 ms	23.50 ms	0.158
7	14.34 ms	26.57 ms	0.026



Slika 7.6. Vreme uspostave LSP putanje za NET1 mrežu,  $k_T = 4$ ,  $p_{IF} = 0.348$ : a) IFOB; b) OF metod i c) hibridni metod

Na slikama 7.6. i 7.7. prikazana su vremena uspostave LSP putanja za sva tri metoda signalizacije u NET1 i NET2 mreži. Manje kašnjenje dobijeno primenom hibridnog metoda u poređenju sa OF metodom posledica je toga što manji broj rutera utiče na manje vreme procesiranja i što je određeni

broj LSP putanja (15 LSP u NET1 mreži i 32 LSP u NET2 mreži) uspostavljen kao kod IFOB metoda (bez proksi rutera).



Slika 7.7. Vreme uspostave LSP putanje za NET2 mrežu sa  $k_T = 4$ ,  $p_{IF} = 0.447$ : a) IFOB; b) OF metod i c) hibridni metod

Inženjering saobraćaja između domena obuhvata optimizaciju performansi saobraćaja koji se prenosi kroz različite administrativne domene. Da bi se LSP uspostavila između domena neophodno je poznavanje stanja TE linkova i GMPLS informacija van granica domena u kome se vrši proračun putanje. Uspostavljanje LSP putanja u slučaju više domena nameće nove izazove u dizajnu kontrolne ravni. Glavna pitanja odnose se na proračun putanja i zahteve po pitanju kašnjenja. Razdvajanje kontrolne od korisničke ravni dovodi do toga da bilo koja podela u okviru ove dve ravni može kreirati domen. Predloženi hibridni metod ispunjava zahteve po pitanju niskog kašnjenja s kraja na kraj a istovremeno se može fleksibilno integrisati sa algoritmima rutiranja unutar domena preko PCE elementa. Potpuno je primenjiv za scenarije u kojima se jedan domen bazira na GMPLS distribuiranom protokolu a ostali na centralizovanom *OpenFlow* protokolu.

Na osnovu sprovedenih simulacija može se konstatovati da se predloženi hibridni metod može efikasno koristiti za projektovanje kontrolne ravni optičkih transportnih mreža. Omogućava fleksibilnost u fazi projektovanja kontrolne ravni mreže postavljanjem granice vezane za stepen čvora mreže. Razdvajanje kontrolne i korisničke ravni u GMPLS mrežama omogućava integraciju različitih tehnologija u jednu zajedničku mrežu koja može da prenese signale različitih tipova komutacije.

Optimizacija performansi optičkih WDM mreža agregacijom saobraćaja i konverzijom talasnih dužina

---

8.

**ZAKLJUČAK**

---



## 8. ZAKLJUČAK

### 8.1. Zaključna razmatranja

Karakteristike savremenog tržišta i stalno rastući zahtevi korisnika određuju i promene u telekomunikacionim mrežama. Arhitektura i karakteristike mreže budućih generacija moraju se prilagođavati aktuelnim trendovima, novim uslovima saobraćaja i zahtevanom kvalitetu servisa. Ovo praktično znači da operatori telekomunikacionih mreža moraju permanentno unapređivati ili menjati celokupnu mrežu kako bi odgovorili na sve veće zahteve novih generacija servisa. Razni tipovi servisa omogućeni su komercijalizacijom i eksploatacijom optičkih komunikacionih sistema, zbog čega se i promene sa kojima se telekomunikaciona mreža suočava odnose na rešavanje određenih problema optičkog umrežavanja. U rešavanju ovih problema moguće je primeniti određene tehnike mrežnog i saobraćajnog inženjeringa kako bi se resursi iskoristili na najbolji način, a istovremeno poboljšao kvalitet servisa. U novoj generaciji optičkog umrežavanja neće biti prostora za neracionalnim korišćenjem resursa tj. racionalna upotreba raspoloživog propusnog opsega, optičkih predajnika i prijemnika, kao i ostalih resursa biće imperativ.

U drugom poglavlju disertacije prikazani su osnovni koncepti optičkog umrežavanja, nedostaci aktuelnih i prednosti budućih tehnologija, preduslovi za implementaciju sa aspekta arhitekture mreže, strategije i izazovi koji se postavljaju pred operatora, kao i mogućnost koegzistencije tehnologija. Fiksna dodela spektra na nivou talasne dužine neće biti održiva u budućem periodu zbog neracionalnog korišćenja spektra kao resursa. Logični pravac i nastavak u razvoju optičkih mreža su elastične ili *flexgrid* optičke mreže koje donose niz prednosti, kao što su poboljšana spektralna efikasnost, veći kapacitet, poboljšana energetska efikasnost i dr. Elastičnost ili fleksibilnost, kao novi termin koji se uvodi u savremenom konceptu mreža, omogućava da se spektar dodeljuje u skladu sa zahtevima, tj. *bandwidth on demand*. Realno posmatrajući, trenutni prelazak na *flexgrid* tehnologiju na nivou cele mreže neće biti ekonomski prihvatljivo rešenje zbog neophodnih ulaganja u mrežnu opremu, kao i zbog interesa mrežnih operatora da što duže eksploatišu već uvedene tehnologije. Parcijalna nadgradnja određenih delova mreže (kao npr. uskih grla) će omogućiti postepeni prelazak na tehnologiju fleksibilnog grida i nameće se kao kompromisno rešenje za buduće transportne mrežne arhitekture. Navedeni kompromis će biti prihvatljiv sve do momenta kada mreža više neće biti u mogućnosti da pruža zadovoljavajući odgovor na nivo rastućih zahteva, odnosno do trenutka kada će zamena *fixgrid* sa *flexgrid* tehnologijom biti neizbežna.

Tehnike mrežnog i saobraćajnog inženjeringa, konverzija talasnih dužina/frekvencijskih slotova i agregacija saobraćaja na optičkom nivou, koje se primenjuju u WDM i EON mrežama sa ciljem poboljšanja performansi mreže istražene su kroz pregled literature u trećem poglavlju disertacije. Konverzija frekvencijskih slotova nije još uvek tehnološki zastupljena zbog visokih cena i neophodne modifikacije arhitekture mreže. Problem agregacije saobraćaja je istražen uz pretpostavku da se tehnika primenjuje direktno na optičkom nivou kako bi se izbegle O/E/O konverzije i kašnjenje signala. Predstavljeni su primenjeni algoritmi rešavanja navedenih problema (egzaktni, heuristički ili metaheuristički), klasifikacija i njihove kriterijumske funkcije.

Ovom doktorskom disertacijom potvrđene su hipoteze da se tehnikom konverzije talasnih dužina i agregacijom saobraćaja može uticati na efikasnost korišćenja resursa, odnosno na unapređenje performansi optičke mreže. Izborom optimalnih lokacija konvertora talasnih dužina moguće je smanjiti verovatnoću blokiranja zahteva, dok se optimalnim grupisanjem konekcija u optičke tunele može povećati spektralna efikasnost, odnosno postići ušteda ukupnog optičkog spektra, čime se utiče na smanjenje operativnih troškova mreže.

S tim u vezi, četvrto poglavlje disertacije obuhvata problem konverzije talasnih dužina odnosno određivanje optimalnih lokacija konvertora talasnih dužina. Konverzijom talasnih dužina ublažavaju se posledice ograničenja koja su prisutna prilikom rutiranja i dodele talasnih dužina u WDM mrežama. U okviru disertacije testiran je algoritam za izbor optimalnih lokacija čvorova u kojima konvertori talasnih dužina trebaju biti implementirani. Istraživani su različiti parametri koji utiču na performanse mreže. Simulacijom je pokazano da postavljanje konvertora u nekoliko čvorova mreže značajno smanjuje verovatnoću blokiranja zahteva, kao i da značajno povećanje gustine konvertora ne unapređuje bitno performanse mreže. Dobijeni rezultati su dokazali postavljenu hipotezu da se primenom konverzije talasnih dužina može uticati na poboljšanje performansi mreže.

U petom poglavlju disertacije detaljno je predstavljen RSA problem, koji je sastavni deo većine problema koji se rešavaju u elastičnim optičkim mrežama. Teoretske osnove tehnike agregacije saobraćaja na optičkom nivou, ograničenja kao i potrebne modifikacije u čvorovima odnosno arhitekturi mreže, takođe su predstavljene u ovom poglavlju. Efikasnim rešavanjem RSA problema utiče se i na kvalitet rešavanja ostalih pitanja mreže, odnosno na sveukupne performanse. Pored osnovnih RSA ograničenja koja se odnose na kontinuitet i susedstvo frekvencijskih slotova, agregacija saobraćaja uvodi i ograničenje koje se odnosi na kapacitet predajnika. Shodno tome, u disertaciji je razmatrano rešavanje RSA problema u kombinaciji sa agregacijom saobraćaja.

Predloženi algoritam kojim se rešava problem optičke agregacije saobraćaja, zasnovan na metaheuristici Optimizacija kolonijom pčela prikazan je u šestom poglavlju disertacije. Omogućava efikasno rešavanje problema u optičkim mrežama realnih dimenzija. Algoritam ima za cilj minimizaciju ukupnog optičkog spektra odnosno broja frekvencijskih slotova zauzetih u mreži uz pretpostavku uspostavljanja svih konekcija. Funkcioniše po principu da se konekcije sa istim izvornim čvorom, a koje imaju bar jedan zajednički link počevši od izvornog čvora, grupišu u optički tunel i generišu istim predajnikom. U okviru jednog optičkog tunela nije potreban zaštitni opseg između konekcija zbog ortogonalnosti podnosilaca. Zaštitni opseg je potreban samo između različitih tunela i prilikom razdvajanja konekcija u tranzitnim čvorovima pa se na taj način ostvaruje spektralna ušteda eliminacijom nepotrebnih zaštitnih opsega. Optimalna rešenja su dobijena na osnovu posebno razvijenih programskih kodova koji pružaju mogućnost testiranja TG-RSA algoritma u optičkim mrežama različitih topologija, sa različitim statičkim saobraćajnim scenariom i kapacitetom predajnika. Predloženi algoritam je testiran na primerima manje mreže sa 5 čvorova, 14 linkova i 20 zahtevanih puteva svetlosti, NSFNet mreže sa 14 čvorova, 21 linkom i 182 zahtevana puta svetlosti i EON mreže sa 28 čvorova, 39 linkova i 756 zahtevanih puteva svetlosti. U prvom slučaju spektralna ušteda koja se ostvaruje tehnikom agregacije postoji ali nije toliko izražena jer je u pitanju mala mreža i jednostavniji saobraćajni scenario. Rezultati pokazuju da u slučaju većih mreža i složenijih saobraćajnih scenarija primena tehnike agregacije saobraćaja donosi značajne spektralne uštede u odnosu na scenario bez primene agregacije. Identifikovani su faktori koji utiču na efikasnost primene tehnike. U poređenju sa nekim razmatranim heurističkim algoritmima u literaturi pokazano je da se predloženim BCO-TG-RSA algoritmom mogu postići značajna poboljšanja u pogledu minimizacije ukupnog broja zauzetih frekvencijskih slotova. Dobijeni rezultati su dokazali postavljenu hipotezu da se primenom agregacije saobraćaja može uticati na poboljšanje performansi mreže.

Na kraju je razmatran problem uspostavljanja kontrolne ravni u optičkim transportnim mrežama, kao i moguće ekstenzije kontrolne ravni za EON mreže. Kontrolna ravan omogućava uspostavljanje, održavanje i upravljanje saobraćajem putem uređenih putanja kako bi se mreži omogućilo da efikasno prenosi korisničke podatke od izvora do odredišta kroz različite domene. Simulacijom nekoliko konfiguracija kontrolne ravni na primeru dve optičke mreže, pokazano je da predloženi hibridni metod predstavlja kompromisno rešenje između zahteva sa aspekta niskog kašnjenja i visoke pouzdanosti.



## 8.2. Najznačajniji doprinosi disertacije

U skladu sa predmetom i ciljem disertacije, izdvajaju se sledeći ključni naučni doprinosi:

- Predložen je novi metaheuristički algoritam za rešavanje kompleksnog objedinjenog problema rutiranja, alokacije spektra i agregacije saobraćaja na optičkom nivou, zasnovan na metaheuristici Optimizacija kolonijom pčela. Pokazano je da algoritam rešava problem optimalnog korišćenja i uštedu spektra eliminacijom nepotrebnih zaštitnih opsega, tako da se može praktično koristiti u fazi planiranja i projektovanja realnih optičkih mreža. U poređenju sa referentnim heurističkim algoritmima u literaturi postignuti su bolji rezultati i poboljšanje kriterijumske funkcije.
- Istraženi su efekti primene konvertora talasnih dužina u realnim optičkim mrežama za različite mrežne scenarije i uticajne parametre. Analizirani su rezultati testiranja metaheurističkog algoritma za optimizaciju lokacija ograničenog broja konvertora talasnih dužina. Minimizirana je verovatnoća blokiranja zahteva u mrežama različitih topologija, pri različitim intenzitetima saobraćajnih zahteva i raspoloživom broju talasnih dužina. Algoritam omogućava operatorima mreža da na optimalan način izvrše alokaciju konvertora talasnih dužina u odgovarajuće čvorove mreže sa ciljem minimizacije verovatnoće blokiranja zahteva pri datim mrežnim scenarijima. Manja verovatnoća blokiranja znači i veću raspoloživost mreže, odnosno servisa a time i veći prihod za operatora.
- Predložen je nov hibridni metod za uspostavljanje kontrolne ravni u optičkim transportnim mrežama kojim se daje mogućnost projektantu mreže da smanjuje kašnjenje ili unapređuje pouzdanost kontrolne ravni mreže, odnosno da kompromisno rešava ova dva zahteva.

## 8.3. Pravci budućih istraživanja

Imajući u vidu da su elastične optičke mreže nedavno postale predmet istraživačke zajednice, brojna su otvorena pitanja vezana za kontrolu i upravljanje mrežom, skalabilnost, zaštitu mreže, iskorišćenje spektra, hardversku realizaciju itd. Mogućnosti za buduća istraživanja u domenu ovih mreža, odnosno mogućnosti za analizu svojstva elastičnosti su višestruke. Svojstvo elastičnosti ili fleksibilni grid omogućava primenu određenih tehnika mrežnog i saobraćajnog inženjeringa kojima se dodatno unapređuju performanse mreže i štede resursi.

Predloženi algoritmi se u predmetu daljih istraživanja mogu modifikovati u smislu kreiranja parcijalnih rešenja, načina donošenja odluke o napuštanju generisanog rešenja, kao i načina evaluacije parcijalnih rešenja. Istraživanje se može proširiti i u smislu da se vrši paralelna optimizacija nekoliko ciljeva. Pored spektralne efikasnosti, može se razmatrati i energetska efikasnost, defragmentacija spektra, konverzija frekvencijskih slotova itd.

Uzimajući u obzir dinamiku razvoja i česte promene saobraćajnih zahteva u Internet okruženju, istraživanje se može proširiti i na dinamički saobraćajni scenario tj. rešavanje dinamičkog problema rutiranja, alokacije spektra i agregacije saobraćaja.

Optimizacija performansi optičkih WDM mreža agregacijom saobraćaja i konverzijom talasnih dužina

---



L

**LITERATURA**

---

## LITERATURA

- [1] *Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers*, Recommendation G.692, International Telecommunication Union, Geneva, 1998.
- [2] *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, Recommendation G.694.1 (v.2.0), International Telecommunication Union, Geneva, 2012.
- [3] B. C. Chatterjee, N. Sarma and E. Oki, "Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1776-1800, 2015.
- [4] Cisco Systems, "Cisco visual networking index: forecast and trends, 2017–2022", Cisco, White Paper, 2019, [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.pdf> [Accessed: 02.06.2019].
- [5] F. Zhang, X. Zi, O.G. de Dios, R. Casellas, "Requirements for GMPLS control of flexible grids", IETF RFC Draft, October 2011.
- [6] F. Zhang, X. Zi, R. Casellas, O.G. de Dios, D. Ceccarelli, "GMPLS OSPF-TE extensions in support of flexible-grid in DWDM networks", IETF RFC Draft, October 2011.
- [7] D. King, A. Farrel, Y. Li, F. Zhang, R. Casellas, "Generalized labels for the flexi-grid in lambda-switch-capable (LSC) label switching routers, IETF RFC Draft, March, 2012.
- [8] F. Zhang, O.G. de Dios, D. Ceccarelli, RSVP-TE signaling extensions in support of flexible grid, IETF RFC Draft, March 2012.
- [9] G. Zhang, M. De Leenheer, A. Morea, B. Mukherjee, "A survey on OFDM-based elastic core optical networking", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 65-87, 2013.
- [10] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, E. A. Varvarigos, "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM- based optical networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 9, pp. 1354-1366, 2011.
- [11] I. Tomkos, S. Azodolmolky, J. Sole-Pareta, D. Careglio, E. Palkopoulou, "A tutorial on the flexible optical networking paradigm: state of the art, trends and research challenges", *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 9, pp. 1317-1337, 2014.
- [12] M. Jinno, "Elastic optical networking: roles and benefits in beyond 100 Gb/s era", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 5, pp. 1116-1124, 2017.
- [13] S. Miladić, G. Marković, "Elastične optičke mreže", *XXXIII Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju*, Zbornik radova, str. 241-250, Beograd, 2015.
- [14] P. Bhaumik, S. Yhang, P. Chowdhury, S. Lee, J. H. Lee, B. Mukherjee, "Software-defined optical networks (SDONs): a survey", *Photonic Network Communications*, vol. 28, no. 1, pp. 4-18, 2014.
- [15] Z. Chen, P. Zhu, J. Li, Y. Xu, Z. Wu, X. Chen, Y. Chen, Y. He, "Key technologies for elastic optical networks", *13th International Conference on Optical Communications and Networks*, Proceedings, pp. 1-3, China, 2014.

- [16] A. Ahmad, A. Bianco, E. Bonneto, M. Garrich, J. Oliveira, "Switching node architectures in flexible-grid networks: A performance comparison", *International Conference on Optical Network Design and Modeling*, Proceedings, pp. 19-22, Sweden, 2014.
- [17] A. Mitra, D. Ives, A. Lord, S. Savory, S. Kar, P. Wright, "Network equipment and their procurement strategy for high capacity elastic optical networks", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 7, pp. A201-A211, 2016.
- [18] M. Song, E. Pincemin, A. Josten, B. Baeuerle, D. Hillerkuss, J. Leuthold, R. Rudnick, D. M. Marom, S. Ben Ezra, J. F. Ferran, G. Thouenon, P. S. Khodashenas, J. M. Rivas-Moscoso, C. Betoule, D. Klionidis, I. Tomkos, "Flexible optical cross-connects for high bit rate elastic photonic transport networks [Invited]", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 7, pp. A126-A140, 2016.
- [19] A. Peters, E. Hugues-Salas, M. Gunkel, G. Zervas, "Key performance indicators for elastic optical transponders and ROADMs: The role of flexibility", *Optical Switching and Networking*, vol. 25, July, pp. 1-12, 2017.
- [20] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, S. J. Ben Yoo, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer", *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. 12-20, 2012.
- [21] M. Jinno, "Elastic optical networking: Roles and benefits in beyond 100-Gb/s era", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 5, pp. 1116-1124, 2016.
- [22] N. Amaya, G. Zervas, D. Simeonidou, "Introducing node architecture flexibility for elastic optical networks", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 6, pp. 593-608, 2013.
- [23] P.S. Khodashenas, J. Comellas, S. Spadaro, J. Perello, "Dynamic source aggregation of subwavelength connections in elastic optical networks", *Photonic Network Communications*, vol. 26, no. 2-3, pp. 131-139, 2013.
- [24] G. Marković, S. Miladić, "Elastično optičko umrežavanje- od istraživanja do implementacije", *XXXIV Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju*, Zbornik radova, str. 244-252, Beograd, 2015.
- [25] X. Yu, M. Tornatore, M. Xia, J. Wang, Y. Zhao, J. Zhang, B. Mukherjee, "Migration from fixed grid to flexible grid in optical networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 2, pp. 34-43, 2015.
- [26] X. Yu, M. Tornatore, Y. Zhao, J. Zhang, X. Wang, S. Zhang, R. Wang, J. Wang, J. Zhang, B. Mukherjee, "When and how should the optical networks be upgraded to flex grid", *The European Conference on Optical Communication*, Proceedings, pp. 1-3, France, 2014.
- [27] A. Mayoral, V. López, O.G. de Dios, J.P. Fernández-Palacios, "Migration steps towards flexi-grid networks", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, no. 11, pp. 988-996, 2014.
- [28] A. Leiva, A. Beghelli, C. Mas Machuca, R. Olivares, M. Saavedra, R. Ahumada, "Generic techno-economic evaluation methodology: the case of migration to flexible grid networks", *Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics*, Proceedings, pp. 1-8, Germany, 2015.
- [29] X. Yu, "What's coming next in the near future for optical networks", *International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies*, Proceedings, pp. 1-1, Pakistan, 2017.

- [30] Y. Zhao, J. Zhang, H. Yang, Y. Yu, "Which is more suitable for the control over large scale optical network, GMPLS or OpenFlow", *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Proceedings, pp. 1-3, USA, 2013.
- [31] J. Sócrates-Dantas, D. Careglio, J. Perelló, R. Melo Silveira, W. V. Ruggiero, J. Solé-Pareta, "Challenges and requirements of a control plane for elastic optical networks", *Computer Networks*, vol. 72, pp. 156-171, 2014.
- [32] G. Marković, D. Teodorović, "Problem lociranja čvorova sa konverzijom talasnih dužina u optičkim transportnim mrežama", *XXVII Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju*, Zbornik radova, str. 305-316, Beograd, 2009.
- [33] H-Y. Jeong, S-W. Seo, "A binary (0-1) linear program formulation for the placement of limited-range wavelength converters in wavelength-routed WDM networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 10, pp. 3076-3091, 2005.
- [34] P. N. Tran, U. Killat, "An exact ILP formulation for optimal wavelength converter usage and placement in WDM networks", *IEEE Global Telecommunications Conference*, Proceedings, pp. 1-6, USA, 2008.
- [35] J. H. Siregar, H. Takagi, Y. Zhang, "Optimal wavelength converter placement in optical networks by genetic algorithm", *IEICE Transactions on Communications*, vol. E85-B, no 6, pp. 247-256, 2002.
- [36] X. Chu, B. Li, I. Chlamtac, "Wavelength converter placement under different RWA algorithms in wavelength-routed all-optical networks", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 4, pp. 607-617, 2003.
- [37] C. Fang, C. Low, "Optimal wavelength converter placement with guaranteed wavelength usage", *International Conference on Research in Networking*, Proceedings, pp. 1050-1061, Berlin, 2006.
- [38] V. J. Gond, A. Goel, "Performance evaluation of wavelength routed optical network with wavelength conversion", *Journal of Telecommunications*, vol. 2, no. 1, pp. 110-114, 2010.
- [39] C. Yang, S. Chen, "Performance analysis of topologies for optical wavelength convertible networks", *Optik*, vol. 123, no. 11, pp. 1001-1005, 2012.
- [40] S. Chaturvedi, P. Dutta, "Utilization of optical fibre WDM channel in wavelength routed networks using sparse partial limited wavelength conversion", *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 546-549, 2013.
- [41] K. Roy, M. K. Naskar, "Genetic evolutionary algorithm for optimal allocation of wavelength converters in WDM optical networks", *Photonic Network Communications*, vol. 16, no. 1, pp. 31-42, 2008.
- [42] C. F. Teo, Y. C. Foo, S. F. Chien, A. L. Y. Low, A. H. You, G. Castañón, "Wavelength converters placement in all optical networks using particle swarm optimization", *Photonic Network Communications*, vol. 10, no. 1, pp. 23-37, 2005.
- [43] D. Pinto-Roa, B. Barán, C. A. Brizuela, "Routing and wavelength converter allocation in WDM networks: a multi-objective evolutionary optimization approach", *Photonic Network Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 23-45, 2011.
- [44] D. Pinto-Roa, C. A. Brizuela, B. Barán, "Multi-objective routing and wavelength converter allocation under uncertain traffic", *Optical Switching and Networking*, vol. 16, pp. 1-20, 2015.

- [45] F. Lezama, G. Castañón, A. M. Sarmiento, "Differential evolution optimization applied to the wavelength converters placement problem in all optical networks", *Computer Networks*, vol. 56, no. 9, pp. 2262-2275, 2012.
- [46] J. H. Shen, J. Chen, "An improved ACO based RWA algorithm and its application in wavelength converter allocation issue of the intelligent optical networks", *Journal of Computational Information Systems*, vol. 10, no. 8, pp. 3341-3349, 2014.
- [47] G. Marković, "Wavelength converter placement in optical networks using bee colony optimization", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 3-10, 2016.
- [48] Y. Wei, G. Shen, S. K. Bose, "Span-restorable elastic optical networks under different spectrum conversion capabilities", *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 63, no. 2, pp. 401-411, 2014.
- [49] N. Kitsuwon, P. Pavarangkoon, B. C. Chatterjee, E. Oki, "Performance of elastic optical network with allowable spectrum conversion at intermediate switches", *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1-4, Spain, 2017.
- [50] M. Hadi, M. R. Pakravan, "Spectrum-convertible BVWXC placement in OFDM-based elastic optical networks", *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 1-12, 2017.
- [51] U. Vyas, S. Prakash, "Routing modulation and spectrum assignment under spectrum conversion in elastic optical networks", *International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)*, pp. 1-2, India, 2018.
- [52] O. Gerstel, "Flexible use of spectrum and photonic grooming", *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics and Photonics and Switching Conference*, Proceedings pp. PMD3, USA, 2010.
- [53] M. Jinno, Y. Sone, H. Takara, A. Hirano, K. Yonenaga, S. Kawai, "IP traffic offloading to elastic optical layer using multi-flow optical transponder", *37<sup>th</sup> European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Proceedings, pp. 1-3, Geneva, 2011.
- [54] G. Zhang, M. De Leenheer, B. Mukherjee, "Optical traffic grooming in OFDM-based elastic optical networks [Invited]", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 4, no. 11, pp. B17-B25, 2012.
- [55] L. Zhang, Z. Zhu, "Spectrum-efficient anycast in elastic optical inter-datacenter networks", *Optical Switching and Networking*, vol. 14, no. 3, pp. 250-259, 2014.
- [56] P. D. Choudhury, N. Agarwal, T. De, "Spectrum and splitter utilization efficient traffic grooming routing and spectrum assignment in elastic optical networks", *IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems*, Proceedings, pp. 1-6, India, 2017.
- [57] P. D. Choudhury, T. De, "Incorporating multicast traffic grooming routing and spectrum assignment in flex-grid optical network using sub-light tree sharing approach", *Journal of Information and Optimization Sciences*, vol. 39, no. 1, pp. 157-168, 2018.
- [58] Z. Fan, Y. Qiu, C-K. Chan, "Dynamic multipath routing with traffic grooming in OFDM-based elastic optical path networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 275-281, 2015.
- [59] W. Lu, X. Zhou, L. Gong, M. Zhang, Z. Zhu, "Dynamic multi-path service provisioning under differential delay constraint in elastic optical networks", *IEEE Communication Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 158-161, 2013.

- [60] P. Majumdar, A. Pal, T. De, "Extending light-trail into elastic optical networks for dynamic traffic grooming", *Optical Switching and Networking*, vol. 20, pp. 1-15, 2016.
- [61] D. Amar, E. Le Rouzic, N. Brochier, J-L. Auge, C. Lepers, N. Perrot, "Spectrum fragmentation issue in flexible optical networks: analysis and good practices", *Photonic Network Communications*, vol. 29, no. 3, pp. 230-243, 2015.
- [62] Y. Yin, H. Zhang, M. Zhang, M. Xia, Z. Zhu, S. Dahlfort, S. J. B. Yoo, "Spectral and spatial 2D fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks (invited)", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 10, pp. A100–A106, 2013.
- [63] R. Wang, B. Mukherjee, "Provisioning in elastic optical networks with non-disruptive defragmentation", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 15, pp. 2491-2500, 2013.
- [64] M. Zhang, C. You, H. Jiang, Z. Zhu, "Dynamic and adaptive bandwidth defragmentation in spectrum-sliced elastic optical networks with time-varying traffic", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 5, pp. 1014-1023, 2014.
- [65] R. Wang, B. Mukherjee, "Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks", *Optical Switching and Networking*, vol. 11, part A, pp. 83-91, 2014.
- [66] M. Zhang, C. You, Z. Zhu, "On the parallelization of spectrum defragmentation reconfigurations in elastic optical networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 24, no. 5, pp. 2819-2833, 2016.
- [67] Z. Ye, A.N. Patel, P.N. Ji, C. Qiao, "Distance-adaptive and fragmentation-aware optical traffic grooming in flexible grid optical networks", *IEEE OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference*, Proceedings, pp. 355-356, Australia, 2014.
- [68] X. Yu, Y. Zhao, J. Zhang, J. Wang, G. Zhang, X. Chen, J. Zhang, "Dynamic traffic grooming with spectrum engineering (TG-SE) in flexible grid optical networks", *Optical Fiber Technology*, vol. 26, part B, pp. 150-156, 2015.
- [69] ITU-T, "NGNs and energy efficiency", International Telecommunication Union, Technology Watch Report, Aug. 2008.
- [70] J.L. Vizcaino, Y. Ye, I.T. Monroy, "Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical networks", *Computer Networks*, vol. 56, no. 10, pp. 2400-2419, 2012.
- [71] J.L. Vizcaino, Y. Ye, V. Lopez, F. Jimenez, F. Musumeci, M. Tornatore, A. Pattavina, P.M. Krummrich, "Protection in optical transport networks with fixed and flexible grid: Cost and energy efficiency evaluation", *Optical Switching and Networking*, vol. 11, part A, pp. 55-71, 2014.
- [72] H. Khodakarami, B.S.G. Pillai, B. Sedighi, W. Shieh, "Flexible optical networks: an energy efficiency perspective", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 21, pp. 3958-3969, 2014.
- [73] A. Fallahpour, H. Beyranvand, S.A. Nezamalhoseini, J.A. Salehi, "Energy efficient routing and spectrum assignment with regenerator placement in elastic optical networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 10, pp. 2019-2027, 2014.
- [74] Y. Wu, W. Hou, L. Guo, Y. Liu, Z. Sun, "Green grooming in elastic optical networks", *Optical Fiber Communication Conference*, Proceedings, pp. W3A-3, USA, 2014.
- [75] C. Yu, W. Hou, Y. Wu, J. Wu, Z. Sun, "Adaptive multilevel modulation for grooming in elastic cloud optical networks", *Photonic Network Communications*, vol. 31, no. 3, pp. 524-531, 2016.

- [76] L. Guo, Y. Wu, W. Hou, J. Wu, Y. Zong, Z. Sun, "Green grooming in spectrum-sliced elastic optical path networks", *Photonic Network Communications*, vol. 32, no. 1, pp. 115-125, 2016.
- [77] J. Zhang, Y. Zhao, X. Yu, J. Zhang, M. Song, Y. Li, B. Mukherjee, "Energy-efficient traffic grooming in sliceable-transponder-equipped IP-over-elastic optical networks [invited]", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 1, pp. A142-A152, 2015.
- [78] Y. Tan, R. Gu, Y. Ji, "Energy efficient routing, modulation and spectrum allocation in elastic optical networks", *Optical Fiber Technology*, vol. 36, pp. 297-305, 2017.
- [79] M. Hadi, M. R. Pakravan, "Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in OFDM-based elastic optical networks", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 2, pp. 90-103, 2018.
- [80] L. Ruan, N. Xiao, "Survivable multipath routing and spectrum allocation in OFDM-based flexible optical networks", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 3, pp. 172-182, 2013.
- [81] J. Wu, Y. Liu, C. Yu, Y. Wu, "Survivable routing and spectrum allocation algorithm based on p-cycle protection in elastic optical networks", *Optik*, vol. 125, no. 16, pp. 4446-4451, 2014.
- [82] K. Walkowiak, M. Klinkowski, B. Rabiega, R. Goscienski, "Routing and spectrum allocation algorithms for elastic optical networks with dedicated path protection", *Optical Switching and Networking*, vol. 13, pp. 63-75, 2014.
- [83] L. Ruan, Y. Zheng, "Dynamic survivable multipath routing and spectrum allocation in OFDM-based flexible optical networks", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, no. 1, pp. 77-85, 2014.
- [84] X. Chen, F. Ji, Z. Zhu, "Service availability oriented p-cycle protection design in elastic optical networks", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, no. 10, pp. 901-910, 2014.
- [85] X. Chen, S. Zhu, L. Jiang, Z. Zhu, "On spectrum efficient failure-independent path protection p-cycle design in elastic optical networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 17, pp. 3719-3729, 2015.
- [86] G. Shen, H. Guo, S.K. Bose, "Survivable elastic optical networks: survey and perspective (invited)", *Photonic Network Communications*, vol. 31, no. 1, pp. 71-87, 2015.
- [87] M. Liu, M. Tornatore, B. Mukherjee, "Survivable traffic grooming in elastic optical networks-shared protection", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 6, pp. 903-909, 2013.
- [88] J. Wu, Y. Liu, C. Yu, Y. Wu, "Survivable routing and spectrum allocation algorithm based on p-cycle protection in elastic optical networks", *Optik*, vol. 125, no. 16, pp. 4446-4451, 2014.
- [89] Wu, J. Zhang, J. Du, "Cost-efficient grooming based on p-cycle protection in elastic optical networks", *Journal of Network Computing and Applications*, vol. 1, pp. 21-25, 2016.
- [90] J. Wu, Z. Ning, L. Guo, "Energy-efficient survivable grooming in software-defined elastic optical networks", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 6454-6463, 2017.
- [91] S. Miladić-Tešić, G. Marković, V. Radojičić, "Traffic grooming technique for elastic optical networks: A survey", *International Journal for Light and Electron Optics- Optik*, vol. 176, pp. 464-475, 2019.



- [92] E. A. Varvarigos, K. Christodoulopoulos, "Algorithmic aspects in planning fixed and flexible optical networks with emphasis on linear optimization and heuristic techniques", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 681-693, 2014.
- [93] L. Gong, X. Zhou, W. Lou, Z. Zhu, "A two-population based evolutionary approach for optimizing routing, modulation and spectrum assignment (RMSA) in O-OFDM networks", *IEEE Communication Letters*, vol. 16, no. 9, pp. 1520-1523, 2012.
- [94] Y. Wang, J. Zhang, Y. Zhao, J. Wang, W. Gu, "ACO-based routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks", *Photonic Network Communications*, vol. 25, no. 3, pp. 135-143, 2013.
- [95] R. Goscién, M. Klinkowski, K. Walkowiak, "A tabu search algorithm for routing and spectrum allocation in elastic optical networks", *International Conference on Transparent Optical Networks*, Proceedings, pp. 1-4, Austria, 2014.
- [96] P. Lechowich, K. Walkowiak, "Genetic algorithm for routing and spectrum allocation in elastic optical networks", *Third European Network Intelligence Conference*, Proceedings, pp. 273-280, Poland, 2016.
- [97] F. Lezama, G. Castañón, A. M. Sarmiento, I. B. Martins, "Differential evolution optimization applied to the routing and spectrum allocation problem in flexgrid optical networks", *Photonic Network Communications*, vol. 31, no. 1, pp. 129-146, 2016.
- [98] R. L. Haupt, S. E. Haupt, *Practical genetic algorithms*, John Wiley&Sons, 2004.
- [99] T. J. Kruger, *Development, implementation and theoretical analysis of the bee colony optimization meta-heuristic method*, Ph.D thesis, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, 2017.
- [100] P. Lučić, D. Teodorović, "Computing with bees: Attacking complex transportation engineering problems", *International Journal of Artificial Intelligence Tools*, vol. 12, no. 3, pp. 375-394, 2003.
- [101] T. Davidović, D. Teodorović, M. Šelmić, "Bee colony optimization part I: The algorithm overview", *Yugoslav Journal of Operations Research*, vol. 25, no. 1, pp. 33-56, 2015.
- [102] D. Teodorović, M. Šelmić, T. Davidović, "Bee colony optimization part II: The application survey", *Yugoslav Journal of Operations Research*, vol. 25, no. 2, pp. 185-219, 2015.
- [103] G. Marković, D. Teodorović, V. Aćimović-Raspopović, "Routing and wavelength assignment in all optical networks based on the bee colony optimization", *All Communications*, vol. 20, no. 4, pp. 273-285, 2007.
- [104] G. Marković, "Wavelength converter placement in optical networks using bee colony optimization", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 3-10, 2016.
- [105] G. Marković, "Routing and spectrum allocation in elastic optical networks using bee colony optimization", *Photonic Network Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 356-374, 2017.
- [106] D. Teodorović, J. Popović, K. Vukadinović, G. Marković, "Dinamičko rutiranje i dodela talasnih dužina u optičkim mrežama zasnovano na učenju iz primera", *XXIV Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju*, Zbornik radova, str. 270-275, Beograd, 2006.
- [107] D. Teodorović, *Transportne mreže*, Saobraćajni fakultet, Beograd, 2007.

- [108] Y. Wang, X. Cao, Y. Pan, "A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks", *Proceedings of IEEE INFOCOM 2011*, pp. 1503-1511, China, 2011.
- [109] M. Klinkowski, K. Walkowiak, "Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical networks", *IEEE Communication Letters*, vol. 15, no. 8, pp. 884-886, 2011.
- [110] M. Klinkowski, D. Careglio, "A routing and spectrum assignment problem in optical OFDM networks", *First European Teletraffic Seminar*, Barcelona, 2011.
- [111] L. Velasco, M. Klinkowski, M. Ruiz, J. Comellas, "Modelling the routing and spectrum allocation problem for flexgrid optical networks", *Photonic Network Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 177-186, 2012.
- [112] Z. Zhu, W. Lu, L. Zhang, N. Ansari, "Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single-/multi-path routing", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 1, pp. 15-22, 2013.
- [113] X. Liu, L. Gong, Z. Zhu, "Design integrated RSA for multicast in elastic optical networks with a layered approach", *IEEE Global Communications Conference*, Proceedings, pp. 2346-2351, USA, 2014.
- [114] F. S. Abkenar, A. G. Rahbar, "Study and analysis of routing and spectrum allocation (RSA) and routing, modulation and spectrum allocation (RMSA) algorithms in elastic optical networks (EONs)", *Optical Switching and Networking*, vol. 23, part 1, pp. 5-39, 2017.
- [115] S. Miladić-Tešić, D. Miljanović, "Analiza RSA algoritama u elastičnim optičkim mrežama", *XXXV Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju*, Zbornik radova, str. 264-272, Beograd, 2017.
- [116] E-G. Talbi, *Metaheuristics: from design to implementation*, vol. 74, John Wiley&Sons, 2009.
- [117] L. Velasco, A. Castro, M. Ruiz, G. Junyent, "Solving routing and spectrum allocation related optimization problems: from off-line to in-operation flexgrid network planning", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 16, pp. 2780-2795, 2014.
- [118] M. Zhang, W. Shi, L. Gong, W. Lu, Z. Zhu, "Bandwidth defragmentation in dynamic elastic optical networks with minimum traffic disruptions", *IEEE International Conference on Communications*, Proceedings, pp. 3894-3898, Hungary, 2013.
- [119] G. Thouenon, C. Betoule, E. Le Rouzic, E. Pincemin, P. S. Khodashenas, J. M. Rivas-Moscoso, D. Klonidis, "Electrical v/s optical aggregation in multi-layer optical transport networks", *International Conference on Photonics in Switching*, Proceedings, pp. 28-30, Italy, 2015.
- [120] S. Talebi, F. Alam, I. Katib, M. Khamis, R. Salama, G.N. Rouskas, "Spectrum management techniques for elastic optical networks: a survey", *Optical Switching and Networking*, vol. 13, pp. 34-48, 2014.
- [121] N. J. Philip, N. P. Ankitkumar, Q. Dayou, P. J. Jason, H. Junqiang, A. Yoshiaki, T. Wang "Optical layer traffic grooming in flexible optical WDM (FWDM) networks", *European Conference and Exposition on Optical Communications*, *Optical Society of America*, pp. We.10.P1.102, Switzerland, 2011.
- [122] M. Jinno, H. Takara, Y. Sone, K. Yonenaga, A. Hirano, "Multiflow optical transponder for efficient multilayer optical networking", *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 5, pp. 56-65, 2012.

- [123] V. López, B. de la Cruz, Ô. Gonzáles de Dios, O. Gerstel, N. Amaya, G. Zervas, D. Simeonidou, J. P. Fernandez-Palacios, "Finding the target cost for sliceable bandwidth variable transponders", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, no. 5, pp. 476-485, 2014.
- [124] N. Sambo, D. Antonio, C. Porzi, V. Vercesi, M. Imran, F. Cugini, A. Bogoni, L. Poti, P. Castoldi, "Sliceable transponder architecture including multiwavelength source", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, no. 7, pp. 590-600, 2014.
- [125] J. Zhang, Y. Ji, M. Song, Y. Zhao, X. Yu, J. Zhang, B. Mukherjee, "Dynamic traffic grooming in sliceable bandwidth-variable transponder-enabled elastic optical networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 183-191, 2015.
- [126] S. Miladić-Tešić, G. Marković, „Traffic grooming on designing elastic optical networks“, *International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies*, Proceedings, vol. 1, pp. 35-38, North Macedonia, 2019.
- [127] S. Miladić-Tešić, G. Marković, N. Nonković, V. Radojičić, „A metaheuristic approach for source traffic grooming in elastic optical networks“, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2020, online, DOI:10.1002/ett.4097.
- [128] L. Berger, *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions*, IETF RFC 3473, 2003.
- [129] M. Stojanović, V. Aćimović- Raspopović, *Savremene IP mreže: arhitekture, tehnologije i protokoli*, Akademska misao, Beograd, 2012.
- [130] ITU, *Recommendation G.8080/Y.1304: Architecture for the automatically switched optical network*, International Telecommunication Union, 2012.
- [131] A. Farrel, I. Bryskin, *GMPLS architecture and applications*, Morgan Kaufmann Series in Networking, Elsevier, 2006.
- [132] T. D. Nadeau, H. Rakotoranto, "GMPLS operations and management: today's challenges and solutions for tomorrow", *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 7, pp. 68-74, 2005.
- [133] M. Stojanović, S. Miladić, G. Marković, „A hybrid method for signalling transport in GMPLS control plane“, *Elektronika Ir Elektrotehnika*, vol. 22, no. 3, pp. 24-28, 2016.
- [134] M. Veeraraghavan, T. Li, "Signaling transport options in GMPLS Networks: in-band or out-of-band", *International Conference on Computer Communications and Networks*, Proceedings, pp. 503-509, 2007.
- [135] L. Y. Ong, E. Roch, S. Shew, A. Smith, "New technologies and directions for the optical control plane", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 537-546, 2012.
- [136] J. Perelló, L. Velasco, F. Agraz, S. Spadaro, G. Junyent, J. Comellas, "A comparison of in-fiber and out-of-fiber GMPLS-based control plane configurations: Benefits, drawbacks and solutions", *International Conference on Transparent Optical Networks*, Proceedings, pp. 101-104, Greece, 2008.
- [137] M. Ruiz, J. Perelló, L. Velasco, S. Spadaro, J. Comellas, G. Junyent, "GMPLS control plane network design with resilience guarantees", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 37-47, 2011.
- [138] G. Shen, Q. Yang, "From coarse grid to mini-grid to gridless: how much can gridless help contentionless?", *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Proceedings*, pp. 1-3, IEEE, 2011.

- [139] I. Hussain, A. Dhillon, M. Sosa, „Super-channel optical parameters GMPLS signaling extensions“, IETF draft, Oct. 2013.
- [140] I. Hussain, A. Dhillon, M. Sosa, „Super-channel optical parameters GMPLS routing extensions“, IETF draft, Oct. 2013.
- [141] D. Ilić, B. Pavlović, M. Jevtović, „Analiza karakteristika GMPLS protokola“, *Telekomunikacioni Forum Telfor*, pp. 1-5, Beograd, 2005. <http://www.telfor.rs/telfor2005/index.html>
- [142] W. Li, Y. Wang, Y. He, R. Casellas, „Link Management Protocol extensions for grid property negotiation“, Technology Report, IETF, February, 2014.
- [143] I. Turus, J. Kleist, A. M. Fagertun, L. Dittman, „Evaluation of strategies for dynamic routing algorithms in support of flex-grid based GMPLS elastic optical networks“, *European Conference and Exhibition on Optical Communication, Proceedings*, pp. 1–3, 2013.
- [144] A. Dhillon, I. Hussain, R. Rao, „OSPF-TE extension to support GMPLS for flex grid“, Technology Report, IETF, October 2013.
- [145] L. Liu, R.M. noz, R. Casellas, T. Tsuritani, R. Martínez, I. Morita, „OpenSlice: an OpenFlow-based control plane for spectrum sliced elastic optical path networks“, *European Conference and Exhibition on Optical Communication, Proceedings*, p. Mo.2.D.3, 2012.
- [146] F. Paolucci, F. Cugini, A. Giorgetti, N. Sambo, P. Castoldi, „A survey on the path computation element (PCE) architecture“, *IEEE Communication Survey and Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1819-1841, 2013.
- [147] M. Dallaglio, A. Giorgetti, N. Sambo, F. Cugini, P. Castoldi, „Provisioning and restoration with sliceability in GMPLS-based elastic optical networks [Invited]“, *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 2, pp. A309-A317, 2015.
- [148] Y. Zhao, X. Cao, T. Peng, J. Zhang, X. Yu, X. Fu, D. Wang, „PCEP protocol extension for spectrum utilization optimization in flexi-grid networks“, Technology Report, IETF, April 2012.
- [149] R. Ghimire, S. Mohan, M. Leary, T. Tidwell, „A concurrent two-layer restoration scheme for GMPLS WDM networks“, *Optical Switching and Networking*, vol. 6, no. 4, pp. 268-275, 2009.

Optimizacija performansi optičkih WDM mreža agregacijom saobraćaja i konverzijom talasnih dužina

---

**BIOGRAFIJA AUTORA**

---

## BIOGRAFIJA AUTORA

Suzana Miladić-Tešić rođena je 09.11.1987. godine u Tesliću, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina. Osnovno i srednje obrazovanje stekla je u Tesliću. Saobraćajni fakultet Univerziteta u Istočnom Sarajevu upisala je 2006. godine a diplomirala 2010. godine sa prosečnom ocenom 9.44 i Plaketom Univerziteta za izuzetan uspeh u toku studija na Saobraćajnom fakultetu.

Master akademske studije upisala je 2010. godine na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Departman za saobraćaj, smer: Poštanski saobraćaj i telekomunikacije. Master akademske studije završila je 2011. godine sa prosečnom ocenom 9.75 i stekla akademski naziv- master inženjer saobraćaja.

Doktorske akademske studije upisala je 2013. godine na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu, studijski program Saobraćaj, gde je položila sve ispite sa prosečnom ocenom 10 i ispunila sve obaveze predviđene nastavnim planom i programom doktorskih akademskih studija. Tokom sva tri ciklusa studija bila je dobitnik brojnih stipendija, od kojih se ističe stipendija fonda „Dr Milan Jelić“ Republike Srpske.

Od oktobra 2012. godine do danas zaposlena je na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu. 2016. godine dobija Plaketu Univerziteta kao najbolji mladi istraživač Univerziteta.

Kao autor ili koautor učestvovala je u izradi 27 naučnih i stručnih radova, od kojih su tri objavljena u međunarodnim časopisima sa SCI liste u kategoriji M20, dva rada u vodećem časopisu nacionalnog značaja u kategoriji M51, dvanaest radova saopštenih na skupovima međunarodnog značaja u kategoriji M33 i deset radova saopštenih na skupovima nacionalnog značaja u kategoriji M63.

Učestvovala je kao član tima u nekoliko nacionalnih projekata finansiranih od strane Ministarstva za naučnotehnološki razvoj, visoko obrazovanje i informaciono društvo Republike Srpske kao i u nekoliko međunarodnih radionica iz oblasti saobraćaja i komunikacija. Angažovana je kao recenzent za časopise *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, *Artificial Intelligence Review* i *Optical Fiber Technology*. Posедуje aktivno znanje engleskog jezika i osnovno znanje nemačkog jezika.

Optimizacija performansi optičkih WDM mreža agregacijom saobraćaja i konverzijom talasnih dužina

---

**IZJAVE**

---

## Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora: Suzana Miladić- Tešić

Broj indeksa: DS13D008

### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

**OPTIMIZACIJA PERFORMANSI OPTIČKIH WDM MREŽA AGREGACIJOM  
SAOBRAĆAJA I KONVERZIJOM TALASNIH DUŽINA**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu, \_\_\_\_\_

**Potpis autora**

\_\_\_\_\_



## Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora:	<u>Suzana Miladić- Tešić</u>
Broj indeksa:	<u>DS13D008</u>
Studijski program:	<u>Saobraćaj</u>
Naslov rada:	<u>OPTIMIZACIJA PERFORMANSI OPTIČKIH WDM MREŽA AGREGACIJOM SAOBRAĆAJA I KONVERZIJOM TALASNIH DUŽINA</u>
Mentor:	<u>Prof. dr Goran Marković</u>

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la radi pohranjena u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, \_\_\_\_\_

**Potpis autora**

\_\_\_\_\_

## Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

**OPTIMIZACIJA PERFORMANSI OPTIČKIH WDM MREŽA AGREGACIJOM  
SAOBRAĆAJA I KONVERZIJOM TALASNIH DUŽINA**

---

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)**
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.  
Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

U Beogradu, \_\_\_\_\_

**Potpis autora**

\_\_\_\_\_

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.