



EGE ÜNİVERSİTESİ

DOKTORA TEZİ

**YÜKSEK YARARLANIRLIK İÇİN OPTİK
AĞLARDA KALIMLILIK SAĞLANMASI**

Gül BOZTOK ALGIN

Tez Danışmanı : Prof. Dr. E. Turhan TUNALI

Uluslararası Bilgisayar Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 01.12.2017

Bornova-İZMİR

2017

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**YÜKSEK YARARLANIRLIK İÇİN OPTİK
AĞLARDA KALIMLILIK SAĞLANMASI**

Gül BOZTOK ALGIN

Tez Danışmanı : Prof. Dr. E. Turhan TUNALI

Uluslararası Bilgisayar Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 01.12.2017

Bornova-İZMİR

2017

Gül BOZTOK ALGIN tarafından Doktora tezi olarak sunulan “Yüksek Yararlanırlık İçin Optik Ağlarda Kalımlılık Sağlanması” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 01.12.2017 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/~~oyçokluğu~~ ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı

: E. Turhan Tunalı 

Raportör Üye

: Bahar Karaoğlu 

Üye

: Mehmet Ufuk Coşkun 

Üye

: Cevre Evrendilek 

Üye

: Orhan Dağdeviren 



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Yüksek Yararlanırlık İçin Optik Ağlarda Kalımlılık Sağlanması” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

01 / 12 / 2017

Gül BOZTOK ALGIN

ÖZET**YÜKSEK YARARLANIRLIK İÇİN OPTİK AĞLARDA
KALIMLILIK SAĞLANMASI**

BOZTOK ALGIN, Gül

Doktora Tezi, Uluslararası Bilgisayar Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. E. Turhan TUNALI

Aralık 2017, 130 sayfa

Bu tezde, karma hat hızı özelliğine sahip dalgaboyu bölüşümlü çoğullama yapılan optik iletim ağlarında kalımlı yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama (SRRWA) problemine çözümler önerilmiştir. Önerilen çözümlerde, kaynak kullanım etkinliğinin arttırılarak ağı iletim maliyetinin azaltılması hedeflenirken, servis sağlanacak trafik miktarının arttırılması için geliştirimler yapılmıştır.

Tez kapsamında yapılanlar üç çalışma altında toparlanabilmektedir. Bu çalışmalardan ilkinde, SRRWA probleminin kaynak seçimi kısmını hedefleyen, çok hedefli eniyileme için çok seviyeli programlama yöntemi olan optimal kaynak atama (OPT) yöntemi geliştirilmiştir. Yapılan ikinci çalışmada, iletim ağlarındaki gün içinde değişen trafik yoğunluklarını göz önünde bulundurarak, ışıkyollarına bu yoğunluğa göre hat hızı ataması yapan dinamik hat hızı atama (DYN) yöntemi geliştirilmiştir. Tez kapsamında yapılan üçüncü çalışmada, oluşan trafik isteklerine göre dinamik olarak hat hızı ataması yaparak daha esnek bir çözüm sunmayı amaçlayan SecondPass (SP) yöntemi ve öğrenme kullanan SPL ve SP+L versiyonları geliştirilerek ve kaynak kullanımını etkinleştirmek amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalarda, trafik isteklerine kaynak ataması yapılırken, hem o anki trafiğin ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılamak hem de daha sonra gelecek trafik istekleri için ağ kaynaklarının kullanımını en iyileştirmek hedeflenmiştir. Tekil hat hatalarına karşı, paylaşılan ve adanmış yol koruma yöntemleri ile kalımlılığın sağlandığı anılan çalışmaların performansları, farklı ağlar üzerinde çeşitli senaryolar kurularak değerlendirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama, karma hat hızlı ağlar, paylaşılan yol koruma, adanmış yol koruma.



ABSTRACT

SURVIVABILITY OF OPTICAL NETWORKS

FOR HIGH AVAILABILITY

BOZTOK ALGIN, Gül

Phd in International Computer Department

Supervisor: Prof. Dr. E. Turhan TUNALI

December 2017, 130 pages

In this thesis, solutions are proposed for the survivable routing, line rate and wavelength assignment problem in mixed line rate wavelength division multiplexed optical networks. The focus of the solutions is to reduce the communication cost and the traffic blocking by increasing the effectiveness of resource allocation.

The work in this thesis is divided into three parts. The first of these is optimal resource allocation (OPT) method which is a multi objective optimization method using multi level programming, focusing on the resource selection part of the SRRWA. The second one is dynamic line rate assignment (DYN) method which considers the daily fluctuations of aggregated traffic on backbone networks. In the third part of the work, SecondPass (SP) method and its learning based variations SPL and SP+L, which dynamically assign line rates to lightpaths considering individual requirements of each traffic request, are proposed. The aim of the work is to propose solutions which allocates optimal resources for the traffic in consideration by also increasing resource utilization for the benefit of future traffic requests. By considering single link failures, survivability is ensured using shared and dedicated path protection techniques. The performance analysis of the proposed methods is performed on various network topologies under different scenarios.

Keywords: Routing, rate and wavelength assignment, mixed line rate networks, shared backup protection, dedicated backup protection.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimimin ilk gününden sonuna değin, engin deneyimi ve bilgi birikimi ile yol haritamın oluşmasını sağlayan, fikirleri ve yol göstericiliği ile doktora çalışmamın gelişmesine imkan tanıyan tez danışmanım sayın Prof. Dr. E. Turhan TUNALI'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmamın başlangıcında yardımını esirgemeyen, verdiği önerilerle bana bir giriş noktası sağlayan sayın Dr. Hakkı Candan ÇANKAYA'ya teşekkürlerimi sunuyorum. Çalışmam süresince, aktardığı değerli bilgileri, fikirleri ve önerileriyle çalışmamın doğru yolda kalmasını sağlayan tez izleme komitem üyesi sayın Doç. Dr. Ayşegül GENÇATA YAYIMLI'ya şükranlarımı sunuyorum. Çalışmam süresince, değerli fikir ve önerilerini esirgemeyen tez izleme komitem üyesi sayın Prof. Dr. Mehmet Emin DALKILIÇ'a teşekkürlerimi sunuyorum. Bu süreçte desteklerini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Bahar KARAOĞLAN'a şükranlarımı sunuyorum.

Fikirleri, dirayeti ve aydınlığıyla bana ilham veren, vatanımı, huzurumu ve umudumu borçlu olduğum Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'e ve yol arkadaşlarına sonsuz şükranlarımı sunuyorum. Tüm dünyada bilgiye ulaşmaya ve varoluşu anlamlandırmaya çalışan araştırmacıların emeklerini takdir ediyor, sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

İhtiyaç duyduğumda değerli zamanlarını ayırarak, fikirlerim ve yöntemlerim üzerinde tartışma fırsatı yaratan Dr. Cihat ÇETİNKAYA'ya, Yrd. Doç. Dr. Kaya OĞUZ'a ve İlker KORKMAZ'a teşekkürlerimi sunuyorum. Lisansüstü eğitim hayatım boyunca destek ve güler yüzlerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarıma, değerli hocalarıma ve UBE çalışanlarına, hep birlikte oluşturduğumuz samimiyet, hoşgörü ve iyi niyet ortamı için teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tez çalışmamı;

Uzun süren uğraşlarda daima desteğini hissettiğim, deniz aşırı mesafelerden bile bana ulaşabilen sevgili eşime (*iyi ki varsın*); ve sevgili Algin aileme;

Hayatımın her alanında beni iyiliklere yönlendiren, desteklerini daima yanı başımda hissettiğim sevgili anneme ve sevgili babama; ve kalbimde yaşayan canım anneanneme (*sizi çok seviyorum*);

Varlığıyla hayatımı mutlandıran, umutlandıran, beni yepyeni keyifler ve sorumluluklarla tanıştıran, bakış açımı sadeleştiren, beni olgunlaştıran ve şu anki ben oluşumu sağlayan, uğraşlarımın en yakın tanığı, can oğlum (*hep böyle müthiş kal*) Deniz'ime adıyorum.

Siz olmasaydınız eksik kalırdım ..



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxi
SİMGELER DİZİNİ	xxiii
KISALTMALAR DİZİNİ	xxiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Katkısı	3
1.2 Tezin Yapısı	4
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1 Fiber Optik Teknolojisi	6
2.2 Neden Fiber Optik?	9
3. ÇALIŞILAN PROBLEMLER VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	11
3.1 Sanal Topoloji İlişkilendirmesi (<i>Virtual Topology Mapping</i>)	11
3.2 Yönlendirme ve Dalgaboyu Atama (<i>Routing and Wavelength Assignment</i>) ..	15
3.3 Optik Ağ İletim Mimarileri (<i>Optical Network Transport Architectures</i>)	18

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.4 Hat Hızı Atama (<i>Line Rate Assignment</i>).....	20
3.5 Kalımlılık (<i>Survivability</i>)	22
3.6 Sinyal Erişim Mesafesi (<i>Signal Reach</i>)	33
3.7 Trafik Tımarlama (<i>Traffic Grooming</i>)	35
4. KALIMLI YÖNLENDİRME, DALGABOYU VE HAT HIZI ATAMA (SRRWA) PROBLEMİ.....	39
4.1 Semboller ve Terminoloji	39
4.2 Çözüm Ortamının Desteklemesi Gereken Özellikler.....	41
4.3 Kısıtlar.....	43
4.4 Hedefler.....	43
4.5 Özellikler ve Varsayımlar	44
4.6 Performans Ölçütleri	45
4.7 Kullanılan Alt Algoritmalar	47
4.7.1. $K \geq 2$ Hat Ayırık Yollar	47
4.7.2. Tüm Yalın Yollar	50
4.7.3. Etkin Hat Hızı Atama.....	52
4.7.4. Trafik Üreteci	54

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.7.5. Zaman Boyutu	55
4.7.6. Parametreler	57
5. SRRWA PROBLEMİNE OPTİMAL KAYNAK ATAMA (OPT) ÇÖZÜMÜ	58
5.1 SRRWA Algoritması Ve Optimal Kaynak Atama (OPT) Yöntemi	58
5.2 Yol Seçme Sezgisel Yaklaşımları	62
5.3 Yol Kurma Yöntemleri	63
5.4 Yol Kurma Ve Yol Seçme Yöntemlerinin Yönlendirme Performansına Etkileri	65
5.5 Paylaşım Kapasitesi Esnekliği Sezgisel Yaklaşımları	78
5.6 Paylaşım Kapasitesi Esnekliği Sezgisel Yaklaşımlarının Yönlendirme Performansına Etkileri	81
6. SRRWA PROBLEMİNE DİNAMİK HAT HIZI ATAMA (DYN) ÇÖZÜMÜ	89
6.1 Dinamik Hat Hızı Atama Yöntemi	89
6.2 Deneysel Bulgular	91
7. SRRWA PROBLEMİNE SECONDPASS HAT HIZI ATAMA (SP) ÇÖZÜMÜ	95
7.1 SecondPass Yöntemleri	95

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
7.2 Deneysel Bulgular.....	98
7.3 Sonuçlar	102
8. YORUMLAR, SONUÇ VE ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR DİZİNİ	107
ÖZGEÇMİŞ	119
EKLER.....	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Coğrafi mesafelere göre iletim ağlarının hiyerarşisi (Simmons 2008)	2
2.1 TDM ve WDM çoğullama yöntemlerinin yıllara göre kapasite karşılaştırması (Tkach 2010).....	7
3.1 (a) Fiziksel optik ağ topolojisi üzerinde c1 ve c2 bağlantı istekleri için seçilen yollar; (b) Dalgaboyu λ_1 ve λ_2 'de iletim yapan ışıkyollarının oluşturduğu sanal topoloji.....	11
3.2 Sanal topoloji ilişkilendirmesi ve kalımlılığının sağlanması (Ghani et al. 2000)	12
3.3 Optik iletim mimarilerinin genel çizimleri (Weichenberg et al. 2007)	21
3.4 MLR ağlarda yönlendirme (routing) problemi	22
3.5 İletim ağlarındaki hata tipleri (Mukherjee 2006).....	23
3.6 Tekil hat hatalarından kurtarma için değişik yöntemler (Ramamurthy & Mukherjee 1999a)	26
3.7 MLR-p ve MLR-l yöntemleri görsel karşılaştırması (Liu et al. 2011b)	31
3.8 MLR-l ve MLR-g yöntemleri görsel karşılaştırması (Liu et al. 2011b)	31
3.9 Elektrik alanda tımarlama ve sinyal yenileme yapan altyapı örneği. Optik sinyallerin elektriğe çevrilerek IP katmanında işlenmesi gerekmektedir (Musumeci et al. 2012)	37
3.10 Yenileyici kullanarak sinyal yenileme yapan altyapı örneği. Yenileme yapılması için optik sinyallerin elektriğe çevrilmesi gerekmektedir. Bu işlem için IP yönlendiricileri kullanılmamaktadır. Tımarlama işlemi şekil.3.9'deki gibidir (Musumeci et al. 2012).....	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.11 Elektrik alanda tımarlama yapan MHTG örneği. Bağlantı C1 için L1 ve L2 ışık yollarını kullanan iki zıplamalı tırmalama yapılmıştır (Yao et al. 2009).....	38
4.1 6 düğümlü örnek iletim ağı (Liu et al. 2011b)	49
4.2 Hat ayrık en kısa yollar algoritmasının dezavantajını görmek için kullanılan örnek ağ	50
4.3 6 düğümlü örnek ağda tüm yalın yollar algoritması kullanılarak s=1 için oluşturulan ağaç.....	51
5.1 12 düğümlü NSF ağı (Liu et al. 2011a).....	66
5.2 700 Erlang yük ile farklı yol kurma senaryolarına ait iletim maliyeti değerleri.....	67
5.3 700 Erlang yük ile farklı yol kurma senaryolarına ait BBR değerleri	68
5.4 700 Erlang yük ile farklı yol kurma senaryolarına ait LUR değerleri	68
5.5 NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının iletim maliyeti değerleri	70
5.6 NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının BBR değerleri.....	70
5.7 NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının LUR değerleri.....	71
5.8 NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının SGR değerleri.....	73

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.9 16 düğümlü EON ağı (Morea et al. 2013)	74
5.10 EON ağındaki LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının iletim maliyeti değerleri.....	75
5.11 EON ağındaki LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının BBR değerleri	75
5.12. EON ağındaki LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının LUR değerleri	77
5.13 EON ağındaki LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının SGR değerleri	77
5.14 NSF ağındaki LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının iletim maliyeti değerleri.....	82
5.15 NSF ağındaki LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının BBR değerleri	83
5.16 NSF ağındaki LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının LUR değerleri	83
5.17 NSF ağındaki LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının SGR değerleri.....	84
5.18 EON ağındaki LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının iletim maliyeti değerleri.....	86
5.19 EON ağındaki LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının BBR değerleri	86

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.20 EON ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının LUR değerleri.....	87
5.21 EON ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının SGR değerleri	88
6.1 Harvard ağı 24 saatlik trafik izlemi (Morris & Dong Lin 2000).....	90
6.2 Harvard ağı trafik izlemine göre oluşturulan günlük saat bazında trafik yoğunluk dilimleri.....	90
6.3 NSF ağında farklı hat hızı senaryolarının iletim maliyeti değerleri.....	93
6.4 NSF ağında farklı hat hızı senaryolarının LUR değerleri	93
7.1 6 düğümlü örnek iletim ağında hat hızı atama yöntemlerine ait iletim maliyetleri.....	99
7.2 6 düğümlü örnek iletim ağında hat hızı atama yöntemlerine ait BBR değerleri.....	99
7.3 NSF ağında hat hızı atama yöntemlerine ait iletim maliyetleri.....	101
7.4 NSF ağında hat hızı atama yöntemlerine ait BBR değerleri	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Tez kapsamında hazırlanan yayınlar	5
3.1 Almaç-göndermeç ve yenileyicilere ait maliyet karşılaştırması (Nag and Tornatore 2008)	22
3.2 Hata Oranları ve Tamir Süreleri (Mukherjee 2006)	24
4.1 6 düğümlü örnek ağda hat-ayrık en kısa yollar ve etkin hat hızlar listelerinden bir kesit	50
4.2 6 düğümlü örnek ağda tüm yalın yollar ve etkin hat hızları listelerinden bir kesit.....	52
5.1 Yol kurma yöntemi seçimlerinin yönlendirme performansına etkileri için kurulan senaryoların detayları	67
5.2 Yol kurma yöntemlerinin zayıf ve güçlü yönleri.....	69
5.3 NSF ağı için bulguların özeti.....	73
5.4 EON ağı için bulguların özeti	78
5.5 Paylaşım kapasitesi esnekliği sezgisel yaklaşımlarının zayıf ve güçlü yönleri.....	81
5.6 NSF ağı için bulguların özeti.....	84
5.7. EON ağı için bulguların özeti	88
6.1 NSF ağı için trafik istekleri matrisi (toplam 1 Tbps) (Nag & Tornatore 2008)	92
6.2 NSF ağı trafik istekleri için oluşturulan hat tutma (h_t) süreleri matrisi	92

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)ÇizelgeSayfa

6.3. NSF ağı için farklı hat hızı senaryolarının bulgu özeti 94

7.1 6 düğümlü örnek iletim ağı için trafik istekleri matrisi (toplam 300 Gbps) .. 99



SİMGELER DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
W	Bir hattaki dalgaboyu sayısı
$T = [T_{sd}]$	Trafik istekleri matrisi
$R = \{10, 40, 100\}$	Kullanılan hat hızları (Gbps)
$D = \{1, 2.5, 3.75\}$	Almaç-göndermeç maliyet katsayıları
$L_{ij,k}$	(i, j) düğümleri arasındaki k no.lu ışık yolu
$L_{ij,k}^l$	(i, j) düğümleri arasında kurulmuş r_l hat hızında iletim yapan k no.lu ışık yolu bilgisi
$W_{ij,k}^l = 1$	(i, j) düğümleri arasında kurulmuş r_l hat hızında iletim yapan k no.lu esas ışık yolunun varlığı
$B_{ij,k}^l = 1$	(i, j) düğümleri arasında kurulmuş r_l hat hızında iletim yapan k no.lu yedek ışık yolunun varlığı
$BER_{ij,k}^l$	$L_{ij,k}$ ışık yolunun r_l hat hızında kurulması sonucu yaşayacağı BER değeri
$\alpha_{ij,k}^l$	$L_{ij,k}$ ışık yolunun r_l hat hızında etkin olup olmadığı
$r_{ij,max}$	$\alpha_{ij,k}^l = 1$ uygunluk koşulunu sağlayan en yüksek hat hızı.
$f_{ij,k}^{sd}$	(s, d) kaynak hedef düğümleri arasında servis alırken (i, j) düğümleri arasında kurulmuş k no.lu ışık yolunu kullanan bir bağlantının trafik bilgisi
$P(m, n)$	m ve n düğümleri arasındaki hattan (l_{mn}) geçen ışık yolları kümesi

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ADM	Eklemeli-çıkarmalı çoğullayıcı (<i>Add-drop multiplexer</i>)
ATM	Eşzamansız Aktarım Modu (<i>Asynchronous Transfer Mode</i>)
BBR	Engellenen bant genişliği oranı (<i>bandwidth blocking ratio</i>)
BER	Bit hata oranında (<i>bit error rate</i>)
BFS	Sığ öncelikli arama (<i>breath-first search</i>)
CDM	Kod bölüşümlü çoğullama (<i>code division multiplexing</i>)
CGS	İri hassasiyetli değişken paylaşım kapasitesi
CPL	Kullanıcı protokol katmanı
DB	Adanmış yedek yol (<i>dedicated backup</i>)
DPSK	<i>differential phase-shift keying</i>
DP-QPSK	<i>dual-polarization quadrature phase-shift keying</i>
DQPSK	<i>differential quadrature phase-shift keying</i>
DYN	Dinamik hat hızı atama
EDFA	<i>Erbium-doped fiber amplifier</i>
EMI	<i>Electromagnetic interference</i>
EON	<i>European Optical Network</i>
EPS	Elektronik paket anahtarlama (<i>electronic packet switching</i>)

KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
FDM	Frekans bölüşümlü çoğullama (<i>frequency division multiplexing</i>)
FF	İlk uygun dalga boyu atama (<i>first fit wavelength assignment</i>)
FGS	İnce hassasiyetli değişken paylaşım kapasitesi
GMPLS	<i>Generalized Multi-Protocol Label Switching</i>
IGP	<i>Interior Gateway Protocol</i>
IMUX	Tersiner çoğullama (<i>inverse multiplexing</i>)
ILP	Tamsayı doğrusal programlama (<i>integer linear programming</i>)
IP	<i>Internet Protocol</i>
LC	En düşük maliyetli yolu seç (<i>least cost path first</i>)
LSP	<i>Label-switched path</i>
LU	En az kullanılan yolu seç (<i>least used path first</i>)
LUR	Işıkyolu kullanım oranını (<i>lightpath utilization ratio</i>)
MAN	Kentsel Alan Ağları (<i>Metropolitan Area Network</i>)
MG	Mümkün en yüksek (<i>maximize grooming</i>) hat hızı atama
MHnew	Çok zıplamalı yeni yol kurulumu
MHSB	Çok zıplamalı paylaşılan yedek yol (<i>multi hop shared backup</i>)

KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
MHTG	Çok zıplamalı trafik tımarlama (<i>multi-hop traffic grooming</i>)
MLR	Karma hat hızlı (<i>mixed line rate</i>)
MPLS	<i>Multi Protocol Label Switching</i>
NP-tam	Belirsiz çokterimli tam (<i>NP-complete, nondeterministic polynomial complete</i>)
NSF	<i>National Science Foundation Network</i>
OBS	Optik çoğuşma anahtarlama (<i>optical burst switching</i>)
OC-N	Optical Carrier Level-N
O-E-O	Opto elektronik optik çevirim
OFS	Optik akım anahtarlama (<i>optical flow switching</i>)
OIF	<i>Optical Interconnecting Forum</i>
OLS	Optik etiket anahtarlama (<i>optical label switching</i>)
OOK	<i>on-off keying</i>
OPL	Optik protokol katmanı
OPS	Optik paket anahtarlama (<i>Optical Packet Switching</i>)
OPT	Optimal kaynak atama
OSNR	Optik sinyal - gürültü oranı (<i>optical signal to noise ratio</i>)
OSPF	<i>Open Shortest Path First</i>

KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
OXC	Optik anahtarlama donanımı (<i>optical cross-connect</i>)
PAC	Bağlantı bazında koruma (<i>protection-at-connection</i>)
PAL	Işıkyolu bazında koruma (<i>protection-at-lightpath</i>)
RM	Uygun en düşük (<i>Rate Matching</i>) hat hızı atama
RWA	Yönlendirme ve dalgaboyu atama (<i>routing and wavelength assignment</i>)
SB	Paylaşılan yedek yol (<i>shared backup</i>)
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SDM	Uzam bölüşümlü çoğullama (<i>space division multiplexing</i>)
SGR	Paylaşım kapasite kazanımı (<i>sharing capacity gain ratio</i>)
SHnew	Tek zıplamalı yeni yol kurulumu
SHSB	Tek zıplamalı paylaşılan yedek yol (<i>single hop shared backup</i>)
SHTG	Tek zıplamalı trafik tımarlama (<i>single hop traffic grooming</i>)
SLR	Tekil hat hızlı (<i>single line rate</i>)
SONET	<i>Synchronous Optical Network</i>
SP, SPL, SP+L	SecondPass Yöntemleri
SRG	Ortak risk grubu (<i>shared risk group</i>)

KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
SRRWA	Kalımlı yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama (<i>survivable routing, rate and wavelength assignment</i>)
TDM	Zaman bölüşümlü çoğullama (<i>time division multiplexing</i>)
TR	İletim mesafesi (<i>transmission range</i>)
UNI	Kullanıcı-ağ arayüzü (<i>user-to-network interface</i>)
WAN	Geniş Alan Ağlarda (<i>Wide Area Network</i>)
WDM	Dalgaboyu Bölüşümlü Çoğullama (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)

1. GİRİŞ

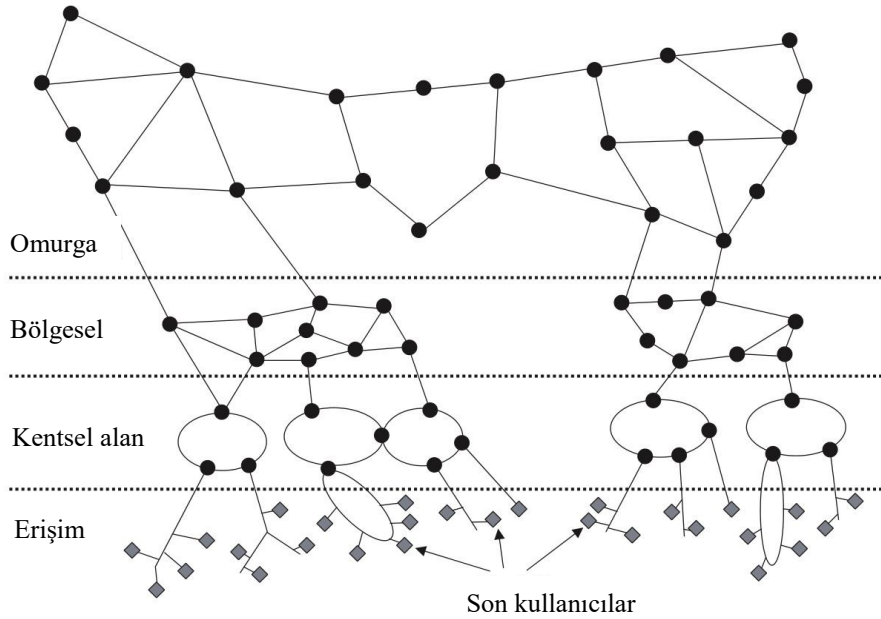
İnternet kullanımının sürekli artması ve veri iletimi odaklı uygulamaların gittikçe yaygınlaşması, iletim ağlarında hız ve yüksek bant genişliği ihtiyacını doğurmaktadır. Ortalama 50 Tbps potansiyel iletim kapasitesine sahip olan optik ağlar bu özellikleri sayesinde muadilleri olan elektrik ağların yakalayamayacağı bir kapasite sunmaktadırlar. Yüksek iletim ihtiyacını karşılayabilecek kapasiteye sahip olan optik iletim ağları, dalgaboyu bölüşümlü çoğullama (*wavelength division multiplexing-WDM*), vb. yöntemler kullanabilmektedirler. Bu sayede, büyük miktarlardaki farklı kaynaklara ait verilerin, eş zamanlı olarak, aynı alt yapıyı kullanarak iletilmeleri mümkün olmaktadır. WDM, tek bir optik fiber (lif) üzerinde eş zamanlı olarak birden çok girişimsiz veri kanalı kodlama işlemidir (Mukherjee 2006). Geniş alan ağlarda (*wide area network-WAN*) sıklıkla kullanılan bu teknik birden çok kablo çekmenin maliyetini ortadan kaldırarak var olan lif kapasitesinin etkin kullanımını sağlamaktadır.

Tipik bir omurga optik iletim ağı (*backbone*) alt yapısında, her biri yüzlerce birbirinden bağımsız dalgaboyu kanalı taşıyan onlarca (bazen yüzlerce) fiber bulunmaktadır. WDM kanallarının standartlaştırılmış iletim kapasiteleri oldukça yüksektir (OC-192 (~10 Gbps), OC-768 (~40 Gbps))¹ ve gelişen teknoloji ile daha da yükselmektedirler (100/400 Gbps, 1 Tbps) (Liu, Tornatore, and Mukherjee 2011b; Simmons 2008; Varvarigos, Christodoulopoulos, and Manousakis 2011). Bu yüksek iletim hızlarını karşılayabilmek ve etkin kullanabilmek adına değişik yöntemler geliştirilmiş ve halen geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu şekilde tasarlanmış bir yapının, teknolojinin ilerlemesi ve maliyetlerin düşmesiyle birlikte omurga hatlarının yanı sıra bölgesel (*regional*), kentsel alan ağları (*metropolitan area network-MAN*) ve erişim (*access*) ağlarında bile son kullanıcıya kadar ilerlemesi beklenen bir gerçektir (Ghani, Dixit, and Ti-Shiang Wang 2000). Nitekim günümüzde WDM fiber optik ağlar, katmanlar arasında farklılaşabilmekle² birlikte, şehir içinde son kullanıcıların evlerine kadar tüm çaplardaki iletim ağlarında fiziksel katman olarak kullanılmaktadırlar. Şekil 1.1’de coğrafi mesafelere göre iletim ağlarının hiyerarşisi görülebilmektedir.

¹ OC- n yaklaşık $n \times 51.84$ Mbps hat hızına sahip bir optik kanalı temsil etmektedir (Gencata 2003).

² WDM teknolojisi uyarınca bir fiberde kurulabilen dalgaboyu sayısı genellikle, omurga ağlarda 80–160 dalgaboyu, bölgesel ağlarda 40–80 dalgaboyu, kentsel alan WDM ağlarda 8–40 dalgaboyu, ve erişim ağlarında 8 dalgaboyu civarındadır (Simmons 2008).

Tekil hat hızlı (*single line rate-SLR*) ağlarda, tasarım aşamasında, etkin iletim mesafesi ve kapasite ikilemi göz önünde tutularak genel bir hat hızı seçimi yapılmalıdır. Buna karşılık, karma hat hızlı (*mixed line rate-MLR*) iletim ağlarında, gelen trafik ihtiyaçlarına göre kullanılacak dalgaboyu sayısı ve hat hızı seçimlerini dinamik olarak düzenlemek mümkündür. Her iki ağ yapısında da atıl kapasite miktarını azaltmak adına, küçük bant genişliği ihtiyacına sahip trafik isteklerini geniş kapasiteli hatlarda trafik tımarlama (*traffic grooming*) yaparak etkin çözümler elde etmek mümkündür (Liu, Tornatore, and Mukherjee 2011a). Yine her iki ağda, trafik isteklerinin dalgaboyunun karşılayabildiği hat hızından daha yüksek olduğu durumlarda tersiner çoğullama (*inverse multiplexing-IMUX*) yapılarak trafik sinyalinin birden çok dalgaboyu üzerinden iletilmesi sağlanabilmektedir. Yapılan çalışmalar, MLR ağların kullanımının yönlendirme ve dalgaboyu atama problemlerindeki klasik kısıtlara esneklik sağladığını, etkin maliyetli ve kalımlı tasarımlar yapılmasını kolaylaştırdığını göstermektedir (Liu et al. 2011a, 2011b; Nag and Tornatore 2008).



Şekil 1.1. Coğrafi mesafelere göre iletim ağlarının hiyerarşisi (Simmons 2008).

Yönlendirme ve dalgaboyu atama (*routing and wavelength assignment-RWA*) problemi, ağda ortaya çıkan iletişim ihtiyaçları doğrultusunda trafikler için yönlendirme yaparak ve uygun dalgaboylarını atayarak ışık yolları (*lightpaths*) kurma problemidir (Zang, Jue, and Mukherjee 2000). Kurulan ışık yolları ile trafiğin kaynak ve hedef düğümleri, fiziksel olarak komşu olmasalar bile, aralarında kurulan iletişim yolları ile sanal komşu haline gelmekte ve iletişimin devamı için herhangi başka bir yönlendirme kontrolüne ihtiyaç duyulmamaktadır. Problem

çözümü sonucunda, kullanılan ağ kaynaklarını en aza indirmek, ağ maliyetini düşürmek ve/veya servis verilecek trafik miktarını arttırmak amaçlanmaktadır (Varvarigos et al. 2011). MLR ağlarda trafik yönlendirme çalışılırken, klasik RWA problemine ek olarak uygun hat hızı atama problemi de eklenmektedir.

İletim kanallarının kapasitelerinin yükselmesi ile hata anında yaşanacak kayıp miktarı da yükselmektedir. Veri kayıplarını önleyebilmek ve servis devamlılığını sağlamak için hata önleme (*protection*) ya da onarma (*restoration*) yöntemlerinin dikkatle ele alınması gerekmektedir. Bu şekilde sağlanabilecek kalımlılık (*survivability*), bir iletişim ağının doğal afetler, nükleer patlamalar, düşman saldırıları gibi bir ya da birden çok noktada oluşabilecek hasarlar karşısında belirli bir düzeye kadar işlevini sürdürebilmesidir (Akademi 2011). Kalımlılık özelliği ile birlikte RWA problemi, karma hat hızlı ağlarda kalımlı yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama (*survivable routing, rate and wavelength assignment-SRRWA*) problemi olarak adlandırılmaktadır.

1.1 Tezin Katkısı

Bu doktora tezinde, kalımlı yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama (SRRWA) problemi üzerinde çalışılmıştır. Problemin çözümüne katkı sağlamak için, MLR özellikli WDM optik ağlar üzerinde bir dizi yöntem geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, kalımlılık sağlamak için, bağlantı bazında (*protection-at-connection-PAC*) ve ışık yolu bazında (*protection-at-lightpath-PAL*) adanmış (*dedicated-DB*) ve paylaşılan (*shared-SB*) yol koruma yöntemleri uygulanmıştır. Yönlendirme için alternatifli sabit yönlendirme (*fixed alternate routing*) ve uyarlamalı yönlendirme (*adaptive routing*) yöntemleri ve dalgaboyu atama için ilk uygun dalga boyu atama (*first fit wavelength assignment-FF*) sezgisel yaklaşımı kullanılmıştır.

Çalışmalarda, dinamik, dinamik artımlı ve statik trafik modelleri ele alınmıştır. Hat hızı atama problemi için etkin iletim mesafesi kısıtı ve hat uzunluğuna bağlı sezgisel bir yaklaşım kullanılmıştır. Performans ölçütleri olarak ağın iletim maliyeti, servis sağlanan trafik miktarı, yedek yol paylaşım oranı ve ışık yolu kullanım oranı göz önünde tutulmuştur.

Tez kapsamında trafik istekleri oluşturulurken; geliş aralıkları *Poisson* dağılıma, hat tutma sürelerinin üstel (*exponential*) dağılıma, bant genişliği istekleri ise üniform (*uniform*) dağılıma uygun olarak modellenmiştir. Bu modellerin

kullanılması ile bir senaryonun farklı ağlarda, farklı trafik istekleri ile aynı konfigürasyonda birden çok test edilmesi mümkün olmuştur. Böylece bir senaryonun performansı değerlendirilirken birden çok testin sonuçları ele alınmış ve sonuçlarda veriye görelilikten uzaklaşmıştır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda SRRWA probleminin farklı kısımlarına öneriler getirilmiştir. Yapılan ilk çalışmada SRRWA probleminin kaynak seçimi aşamasına çözüm olacak, çok hedefli (*multi objective*) eniyileme için çok seviyeli programlama (*multi level programming*) yöntemi olan *optimal kaynak atama* (OPT) yöntemi geliştirilmiştir (Algin and Tunalı 2017a). OPT yönteminin geliştirilmesindeki amaç, bir trafik isteğine kaynak ataması yapılırken, hem o trafiğin ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılamak hem de daha sonra gelecek trafik istekleri için ağ kaynaklarının kullanımını en iyileştirmektir.

Tez kapsamında yapılan ikinci çalışmada, iletim ağlarındaki gün içinde değişen trafik yoğunluklarını göz önünde tutarak, ıııkyollarına bu yoğunluğa göre hat hızı ataması yapan *dinamik hat hızı atama* (DYN) yöntemi geliştirilmiştir (Algin and Tunalı 2017b). Omurga ağlarda, kullanıcılar arasındaki trafik desenlerinin günlük bazda tekrarlanması ve bazı zaman dilimlerinde yoğun trafik istekleri oluşurken bazı zamanlarda ağın daha sakin olması, trafik yoğunluğu dilimlerinin oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Kurulacak ıııkyollarında kullanılacak hat hızına karar verirken, oluşturulan bu yoğunluk dilimlerini dikkate almak kaynak kullanımını etkinleştirmektedir.

Yapılan üçüncü çalışmada, ıııkyolu kurulumu aşamasında kullanılan hat hızı atama politikaları incelenmiştir. Kullanılacak hat hızı atama yöntemine ağın tasarımı sırasında karar verilmesi keskin bir kısıttır. Oluşan trafik isteklerine göre dinamik olarak hat hızı ataması yapılması daha esnek bir çözüm sunmakta ve kaynak kullanımını etkinleştirmektedir. Bu amaçla, SecondPass (SP) yöntemi ve öğrenme kullanan SPL ve SP+L versiyonları geliştirilmiş, uygun en düşük (*rate matching*-RM) ve mümkün en yüksek (*maximize grooming*-MG) yöntemleri ile karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir (Algin and Tunalı 2015). Tez çalışması kapsamında Çizelge 1.1’de görülen yayınlar hazırlanmıştır.

1.2 Tezin Yapısı

Tezin ilerleyen kısımlarında, ikinci bölümde optik ağlarlar ilgili genel bilgilere yer verilmektedir. Üçüncü bölümde, SRRWA problemini oluşturan alt

problemlere değinilmekte ve literatürde görülen geçmiş çalışmalardan öne çıkanlar özetlenmektedir. Dördüncü bölümde, SRRWA problemi için geliştirilen algoritmanın desteklediği özellikler, varsayımlar, hedefler ve performans ölçütlerine yer verilmektedir. Kullanılan alt algoritmalar yine bu bölümde ele alınmaktadır.

Çizelge 1.1. Tez kapsamında hazırlanan yayınlar.

No.	Yayının İsmi	Yayın Yeri ve Yılı	Durumu
1	Karma Hat Hızlı WDM Optik İletim Ağlarında Adanmış Yol Koruma	21.nci Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU), 2013	Basıldı
2	A Cost Efficient Line Rate Assignment Strategy for MLR WDM Optical Networks	19 th Int. Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2015	Basıldı
3	A Dynamic Line Rate Assignment Strategy for MLR WDM Optical Networks	IEEE 5 th Int. Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 2017	Sunuldu
4	A Study on Line Rate Neighboring for MLR WDM Optical Networks	2 nd Int. Conference on Engineering Technology and Innovation (ICETI), 2018	Kabul edildi

Beşinci bölümde, SRRWA probleminin kaynak atama kısmı için geliştirilen optimal kaynak atama (OPT) çalışmasına yer verilmektedir. Altıncı bölümde, trafik yoğunluk değişimlerini göz önünde bulunduran dinamik hat hızı atama (DYN) çalışması ele alınmaktadır. Yedinci bölümde, SRRWA probleminin hat hızı atama kısmı için geliştirilen SecondPass (SP) çalışmalarına yer verilmektedir. Sonuç bölümünde ise tez kapsamında yapılanlar gözden geçirilerek elde edilen sonuçlar kısaca yorumlanmakta ve rapor sonlandırılmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Fiber Optik Teknolojisi

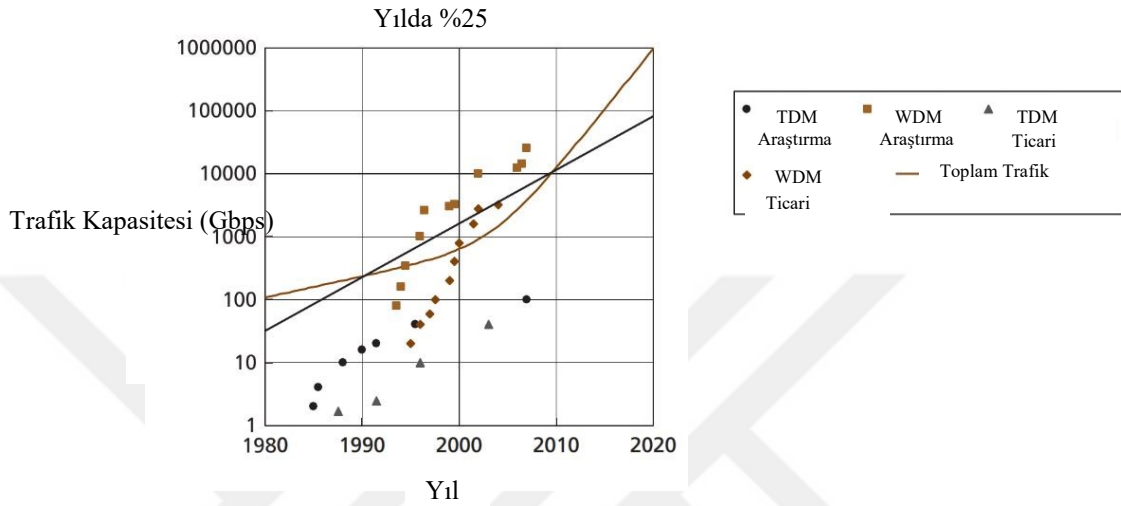
Optik ağlar iletim ortamı olarak optik fiberleri (lif), iletim sinyali olarak da ışığı kullanırlar. Optik fiber, yaklaşık insan saçı kalınlığında, çok ince camdan (*silica*) üretilmiş esnek ve geçirgen bir liftir. Tek bir fiber yaklaşık 50 Tbps iletim kapasitesine sahiptir (Mukherjee 2006). Bu kapasite çeşitli çoğullama yöntemleriyle bölünerek eş zamanlı olarak birden fazla bağımsız iletim için kullanılabilir. Bu çoğullama yöntemleri arasında zaman bölüşümlü çoğullama (TDM), uzam bölüşümlü çoğullama (SDM), frekans bölüşümlü çoğullama (FDM), kod bölüşümlü çoğullama (CDM) sayılabilmektedir. Ancak optik ağlar söz konusu olduğunda öne çıkan eğilim, bir FDM tekniği olan dalgaboyu bölüşümlü çoğullama (WDM) teknolojisidir. Bu seçimin temel sebebi, fiberlerin destekleyebildiği veri hızının çok yüksek olması sebebiyle, elektronik sistem öğelerinin bu hızı karşılayamamasıdır. Elektronik sistem öğeleri ancak fiber kapasitesinin bölünmesiyle oluşacak dalgaboylarının veri hızları seviyesinde işlem yapabilmektedirler. Bu kısıt sebebiyle, optik fiberlerde TDM ve CDM günümüz teknolojileri ile gerçekleştirilmemektedir (Mukherjee 2006). Ancak WDM ile çoğullanmış dalgaboylarının TDM vb. yöntemlerle tekrar çoğullanması sıklıkla görülen bir yaklaşımdır. Şekil 2.1’de TDM ve WDM çoğullama yöntemlerinin yıllar bazında kapasite karşılaştırmaları görülebilmektedir. Bir fiberdeki dalgaboyu sayısı o fiberin bant genişliği ve kanallar arasında mesafe (*channel spacing*) ile ilişkilidir (Stern, Ellinas, and Bala 2009). İlk WDM sistemlerde fiber başına 10 dalgaboyu kullanılabilirken bu sayı günümüzde 100 dalgaboyunun üzerindedir³ (Simmons 2008).

Optik fiberler, genellikle geçirgen bir gövdenin, daha düşük kırılma indeksine sahip başka bir geçirgen materyal ile mantolanmasından oluşmaktadır. Böylece ışık, içsel yansıma prensibi uyarınca gövdenin içinde korunmakta ve lif bir dalga yönlendiricisi olarak vazife görmektedir (Gencata 2003).

Fiber optik teknolojisi, 1840’ların başında kırılma prensibine dayanarak ışığın yönlendirilmesi fikri üzerine başlamıştır. 1870’lerde içsel yansıma prensibinin (*total internal reflection*) keşfedilmesi üzerine diş hekimliği ve medikal çalışmalarda tüplerden görüntü transferi vb. uygulamalar için kullanılan bu

³ Literatürde görülen çalışmalarda genellikle 80-160 dalgaboyu kullanılabildiği varsayılmaktadır.

teknoloji, 1880’de A. Graham Bell’in icat ettiği photophone cihazında ışık hüzmesi üzerinde ses aktarımı için kullanılmıştır. 1952’lerde fizik alanında yürütülen ileri testler bugünkü fiber optik teknolojisini mümkün kılmıştır. Günümüzde kullanıldığı şekliyle, cam lifin geçirgen bir mantolama materyali ile kaplanarak yansıtma yeteneğinin artırıldığı modern yapının geliştirilmesi 1960’ların başına denk gelmektedir (Wikipedia 2011a).



Şekil 2.1. TDM ve WDM çoğullama yöntemlerinin yıllara göre kapasite karşılaştırması (Tkach 2010).

1975 yılında ilk fiber optik iletişim sistemi 45 Mbps veri hızı ve 10 km’lik tekrarlayıcı (*repeater*) aralığı ile ticari olarak piyasaya sürülmüştür. 0.8 μm dalgaboyu ve GaAs yarıiletken lazerler kullanılmıştır. 1980’lerde ikinci nesil optik iletişim 1.3 μm dalgaboyu ve GaAsP yarıiletken lazerler kullanılarak geliştirilmiştir. Çoğul-mod fiber yerine tekil-mod fiber kullanımı ile 1987’lerde 1.7 Gbps veri hızı ve 50 km’lik tekrarlayıcı aralığı değerlerine ulaşılmıştır. Üçüncü nesil fiber optik sistemlerde 1.55 μm dalgaboyu ve 0.2 db/km kayıp oranı elde edilmiştir. Bu değerlere InGaAsP yarıiletken lazerlerin kullanımı ile ulaşılmıştır. Bu gelişmeler üçüncü nesil sistemlerde 2.5 Gbps veri hızı ve 100 km’den fazla tekrarlayıcı aralığı değerlerine ulaşılmasını sağlamıştır (Paschotta 2017; Wikipedia 2011a).

Optik yükseltici (*amplifier*) kullanarak tekrarlayıcı aralığının artırılması ve dalgaboyu bölüşümlü çoğullama ile veri kapasitesinin artırılması sonucu fiber optik iletişim sistemlerinde dördüncü nesile geçilmiştir. Bu iki ilerleme ile 1992 yılından başlamak üzere her 6 ayda elde edilen kapasite ikiye katlanmış ve 2001 yılında 10 Tbps veri hızı elde edilmiştir (Stern et al. 2009). 2006 yılında ulaşılan performans, optik yükselticiler kullanarak 160 km’lik kesintisiz kablolamada 14

Tbps veri hızıdır (Wikipedia 2011a). WDM sistemlerin maliyetinin düşürülmesinde önemli rol oynayan *erbium-doped fiber amplifier* (EDFA) yükselticilerin geliştirilmesinden önce her dalgaboyu tek tek yaklaşık 40 km'de bir sinyal yenilenmesine ihtiyaç duymaktaydı. EDFA teknolojisi ile bir fiber üzerindeki tüm dalgaboylarının optik olarak yenilenmesi sağlanmış ve yenileme mesafesi uzamıştır (Simmons 2008). İlk EDFA sistemler yenilemesiz 500 km optik sinyal iletimine olanak sağlarken, günümüze yakın zamanlardaki geliştirmelerle bu mesafe 1500-2500 km'lere uzamıştır (Simmons 2008).

Beşinci nesil optik fiber araştırmaları, WDM sisteminin üzerinde çalışabileceği dalgaboyu aralığını genişletmek üzerine odaklanmıştır. Bu bağlamda, klasik dalgaboyu çerçevesi (C Band) 1.55-1.57 μm , dry fiber teknolojisi ise düşük bir kayıp oranı ile 1.30-1.65 μm dalgaboyu aralığı değerlerine ulaşmışlardır. Diğer geliştirmeler arasında, optik solitonlar (*optical solitons*) konsepti üzerine yoğunlaşanlar görülmektedir (Paschotta 2017; Wikipedia 2011a).

Dalgaboyu teknolojilerinin geliştirilmesiyle 1990'ların başında 2.5 Gbps olan hat hızı günümüzde 10, 40, 100 Gbps hızları destekleyebilmektedir. Araştırma ortamlarında kullanılan 400 Gbps ve 1 Tbps hat hızlarının ise önümüzdeki yıllarda ticari kullanıma geçmesi beklenmektedir.

Optik ağlar ilk kullanıma sunulduklarında, omurga ağlarında klasik bakır kablo iletişim ortamlarının yerine geçecek geniş bant aralıklı bir alternatif olarak, elektronik ağ bileşenlerine uyumlu olacak şekilde tasarlanmışlardır. Optik yükseltme sistemlerinin ticari olarak yaygınlaşmasıyla birçok servis sağlayıcı tarafından telefon, internet ve televizyon sinyallerinin taşınması için fiber optik ağlar tercih edilmiştir. Bakır kablolarla karşılaştırıldığında, düşük sönümlenme ve girişim değerlerine sahip olması avantajıyla uzun mesafeli, geniş bant aralığı ihtiyacına sahip uygulamaların hedefi olan optik ağlar, kurulumunda ve yönetimindeki fiziksel zorluklar ve yüksek maliyet sebebiyle kısa mesafeli kablolarlarda tercih edilmemişlerdir. Ancak 2000'li yıllarda optik donanımların maliyetlerinin düşmesiyle günümüzde son kullanıcılara optik kablo çekmek bakır kablaj yapmaktan daha ucuz hale gelmiştir (Wikipedia 2011a).

Sahip oldukları yüksek iletim kapasitelerine rağmen ağdaki elektrik kontrol donanımlarının oluşturduğu dar boğaz, uçtan uca optik iletimin (*optical bypass technology*) sağlanabilmesiyle ortadan kaldırılabilir. Günümüzde optik ağlar, elektronik ağ bileşenleri yönetiminde sadece iletim ortamı olmaktan ziyade

yönlendirme, sinyal yükseltme, çoğullama, vb. özellikler de göstermektedirler. Bu özelliklerin etkin kullanımıyla, internette karşılaşılan geniş bant aralığı ihtiyacı kolayca karşılanabilmektedir. Bu gelişmeler ışığında optik iletişim ağlarının tasarımlarının yeniden ele alınması ve akılcı yöntemlerle optik teknolojilerin ağ üzerinde kullanımlarının artırılması gündemi oluşturmaktadır.

2.2 Neden Fiber Optik?

Bir sistemin tasarımında kullanılmak üzere elektrik iletim yolu ile fiber optik iletim arasında yapılacak seçim bir dizi ödünleşimler sonucu gerçekleştirilmelidir.

Fiber optik genellikle yüksek bant genişliği ihtiyacı duyan ya da uzun mesafelere yayılan sistemlerde tercih edilmektedir. Ancak bu özelliklere sahip olmayan istisnai durumlarda da avantaj sağladığı sistemler mevcuttur. Optik ağların başlıca avantajları (Shepherd and Vetta 2004; Wikipedia 2011a, 2011b) sıralanacak olursa:

1. İletim ortamının yapısı gereği daha az sinyal zayıflaması yaşamaları,
2. Düşük kayıp oranı sebebiyle daha uzun mesafelere yükseltici/tekrarlayıcı ihtiyacı duymadan iletim yapabilmeleri,
3. Elektrik iletkenlerin uzun mesafe iletimlerinde karşılaştığı toprak akımı, güç gereksinimi, çevre gürültülerinden ve parazit sinyallerden etkilenme gibi sorunlara karşı bağışık olmaları,
4. Doğası gereği sahip oldukları yüksek taşıma kapasitesi (ör. kanal başına 40-100 Gbps aralığında, her fiberde ortalama 80 birbirinden bağımsız iletim yapabilen kanal ile toplamda yaklaşık 50 Tbps iletim kapasitesi),
5. Elektrik kablolarına göre eşit miktarda bant genişliği için daha az kablolama gerektirmeleri,
6. Uzun mesafeler söz konusu olduğunda bile yan yana giden aynı modülasyon formatlı kablolamalarda çapraz girişim yaşanmaması,
7. Güç hatları, demiryolları vb. yakını ve ayrıca yıldırımlı bölgeler gibi yüksek elektromanyetik girişim (EMI) olan bölgelerde bile ortamdan etkilenmeden işlevlerini sürdürebilmeleri,
8. Optik hat üzerinde elektrik enerjisi taşınması için optik iletişim ekipmanlarının, voltaj değişiklikleri, şimşek vb. akım değişikliklerinden doğabilecek zararlara karşı bağışık olmaları,

9. Taşınan sinyal hasara uğratılmadan hattın gizlice dinlenmesinin (*wiretapping, fiber-tapping*) elektrik hatlara göre daha zor olması, anılabilmektedir.

Bu avantajlara karşılık kısa mesafelerde ve düşük bant genişliği ihtiyaçlarında elektrik iletim yolu tercih edilmektedir. Bu seçimin başlıca sebepleri arasında (Wikipedia 2011a);

1. Elektrik iletim ve yönlendirme materyallerinin edinim masrafının düşük miktarlar için az olması,
2. Elektrik ortam göndermeç ve almaçlarının düşük maliyete sahip olması,
3. Bazı özelleşmiş kablolarda veri sinyalinin yanı sıra elektrik enerjisi taşınmasının da mümkün olması,
4. Elektrik ortamda dönüştürücü kullanmanın kolay ve maliyetsiz olması,
5. Optik fiberlerin kablo kaynağının yapılması ve sonlandırılmalarının elektrik bakır kablolarla göre daha zor olması, sayılabilmektedir.

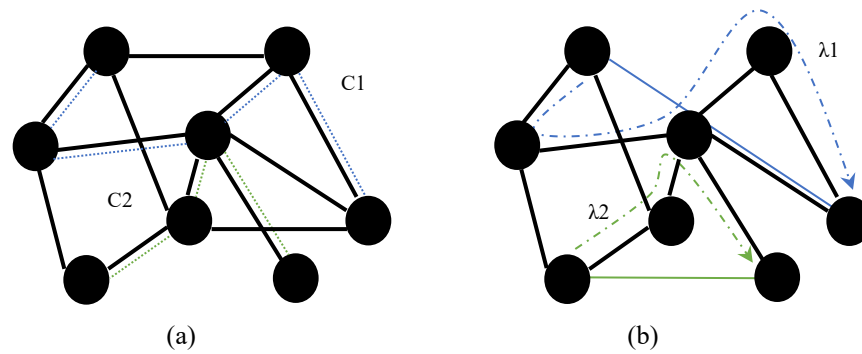
Bunların yanı sıra, fiber optik kablolar yüksek enerjiye karşı duyarlıdır ve fiber erimesine maruz kalabilirler. Bu durum fiber göbeğinin yok olmasına ve tüm iletim elemanlarının geri dönüşümsüz olarak hasar görmesine sebep olabilir.

Anılan avantajlar sebebiyle elektrik iletim, kısa mesafeli kutudan-kutuya, anakart içi, yongadan yongaya, vb. uygulamalarda fiber optiğe nazaran tercih edilmektedir. Yaygın kullanımda olmamasına rağmen laboratuvar ortamlarında, bu senaryolar için optik iletim kullanımı gerçekleştirilmiştir. Sahip oldukları avantajlı özellikler sebebiyle optik ağların kısa mesafeli ve düşük bant genişliği ihtiyacına sahip uygulamalar için kullanıldığı da görülebilmektedir.

3. ÇALIŞILAN PROBLEMLER VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

3.1 Sanal Topoloji İlişkilendirmesi (*Virtual Topology Mapping*)

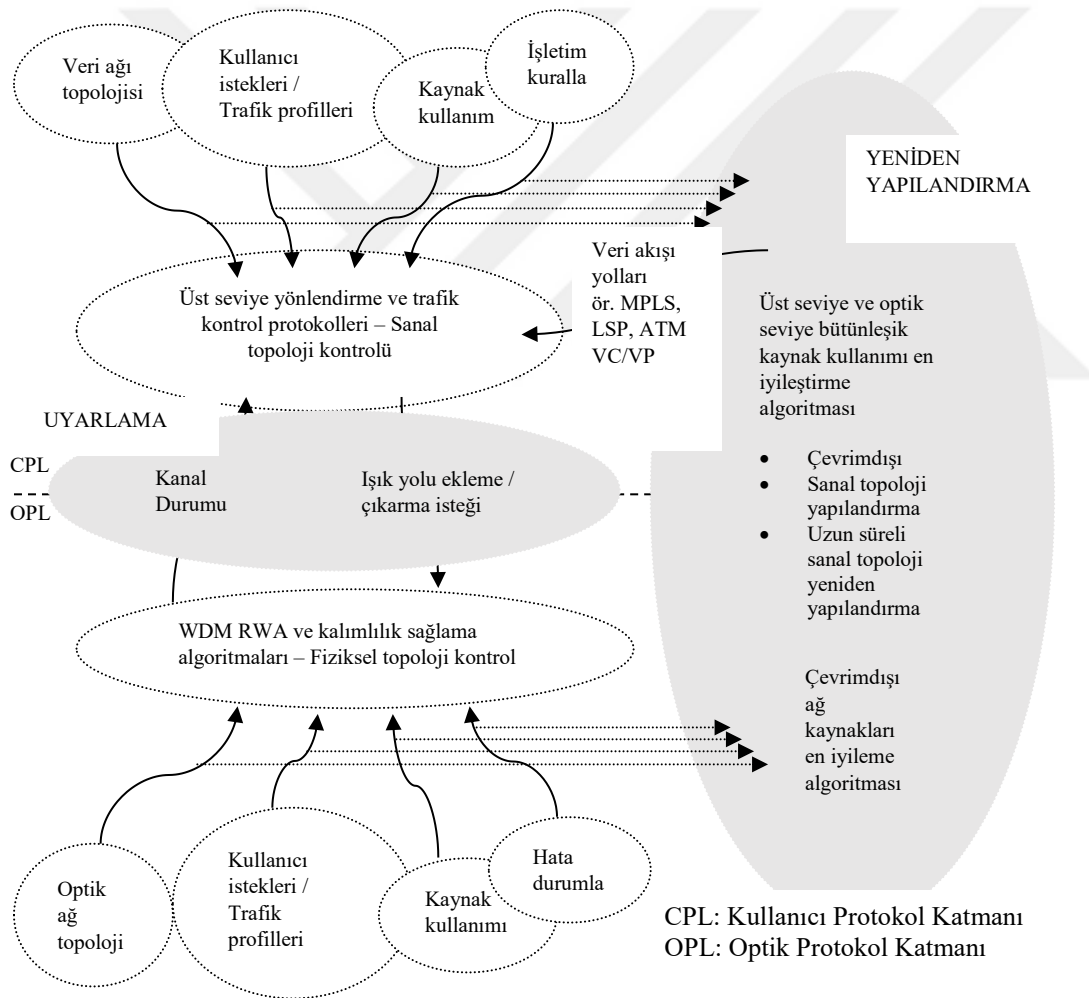
Optik ağların kullanımıyla, iletişim ağlarındaki fiziksel alt yapı kapasite dar boğazı olmaktan çıkmış, kısıtlamalar IP yönlendiriciler ya da ATM anahtarlayıcılar gibi elektronik cihazlardan kaynaklanır hale gelmiştir. Optik işlemci kapasitelerinin düşük olması sebebiyle sıklıkla opto-elektronik-optik (O-E-O) çevirime ihtiyaç duyulması, elde edilen veri hızı avantajını ortadan kaldırmaktadır. Bu duruma sunulan alternatif çözüm, WDM sistemlerin dalgaboyları arasında anahtarlama yapmak yöntemiyle, komşu olmayan düğümler arasında ışıkyolları (*lightpaths*) kurulması ve ara protokol katmanlarının devre dışı bırakılmasıdır. Böylece gerçek fiziksel optik topoloji üzerine, ışıkyollarının, sanal bağlantıları oluşturduğu sanal bir üst katman protokol topolojisi oluşturulmaktadır. Bu yöntemle sanal topoloji ilişkilendirmesi (*virtual topology mapping*) adı verilmektedir. Şekil 3.1’de bir örnek ağ üzerinde fiziksel ve sanal optik topoloji yapıları görselleştirilmiştir. Şekil 3.1.b’de renkli düz çizgiler ışıkyollarını gösterirken, noktalı çizgiler ışıkyollarının geçtiği fiziksel yolları izlemektedir. Işıkyolu yönlendirme, ağ katmanına ait elektronik düğümler arasındaki bağılılığı artırırken, iletilen birim veri başına işlem maliyetini de düşürmektedir. Bu yöntemin trafik yönlendirme ve yük dengeleme uygulamalarını desteklemesi kaynak kullanımını etkinleştirmekte ve yeni kalımlılık paradigmaları yaratılmasına katkı sağlamaktadır (Ghani et al. 2000).



Şekil 3.1. (a) Fiziksel optik ağ topolojisi üzerinde c1 ve c2 bağlantı istekleri için seçilen yollar; (b) Dalgaboyu λ_1 ve λ_2 'de iletim yapan ışıkyollarının oluşturduğu sanal topoloji.

Gerçek fiziksel topoloji üzerinde ışıkyolları kurularak elde edilecek sanal topoloji ilişkilendirilmesinde kanal özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu özellikler arasında kanalların bant genişliği, kalitesi, trafiğin kural ve öncelikleri, ve hattın kalımlılığı sayılabilmektedir. Trafik öncelikleri ve belirli kapasite ihtiyaçları göz önüne alınarak hazırlanan ilkel sanal topoloji, ilerleyen zamanlarda ihtiyaç

değişikliklerine göre yeniden yapılandırılabilir. Gerçek iletim ağlarında yapılan gözlemlerde trafik desenlerinin saatler bazında bile değişiklik gösterebildiği görülmüştür (Gencata 2003). Bu durumlarda gerçekleşen ilkel sanal topolojiler yetersiz kalabilmekte ve yapılandırılmaya ihtiyaç duyabilmektedir. Yapılandırma kapsamında topolojiye yeni ışık yolları eklenebilmekte ya da çıkarılabilmektedir. Bu yapılandırma kararı, trafik yönetim merkezi tarafından ya da işletim kuralları uyarınca merkezi ya da dağıtık olarak verilebilmektedir. Değişim uygulaması tasarıma bağlı kalarak, ağın tamamını etkileyecek şekilde çevrimdışı olarak (yeniden yapılandırma) gerçekleştirilebileceği gibi küçük uyarlamalar (uyarlama) yoluyla ağ kullanımdayken de yapılabilir. Şekil 3.2’de, sanal topoloji ilişkilendirmesi, ışık yolu kurulumu, yeniden yapılandırma (*reconfiguration*) ve uyarlama (*adaptation*) süreçleri canlandırılmaktadır.



Şekil 3.2. Sanal topoloji ilişkilendirmesi ve kalımlılığının sağlanması (Ghani et al. 2000).

Optik WDM ağların fiziksel katmanda sunduğu bu geniş bant aralığı avantajından faydalanılarak bu yapının üzerine başlıca iletişim protokolü olarak anılan İnternet Protokolü'nü (IP) entegre etmek (IP-over-WDM) sıklıkla tercih

edilen bir iletişim tasarımıdır (Ghani et al. 2000). Bu entegrasyonun öne çıkan öğeleri olarak ışıkyolu yönlendirme, kaynak yönetimi, yeniden yapılandırma, uyarlama, kalımlılık, vb. konular akılcı kontrol sistemi tasarımları aracılığıyla ele alınmalıdır.

Optik ağlarda WDM çoğullamanın avantajlarını kullanarak sanal topoloji tasarlanması ve kurulan bu topoloji üzerinde yönlendirme yapılması literatürde sıklıkla ele alınmış bir yöntemdir (Gencata 2003; Kocak et al. 2004; Ramaswami and Sivarajan 1996). Bu alanda yapılmış çoğu çalışma, iletim sırasında hissedilen gecikme sürelerini göz ardı etmektedir. Bu varsayım ile etkin sanal topolojiler elde edilebilse de iletim sırasında düğümlerin yaşayacakları gecikme süreleri yüksek olmaktadır. Trafik sıkışıklığı ile birlikte gecikme değerini de hesaba katan çalışmalara literatürde rastlanmaktadır. Bu çalışmalarda da genellikle kuyrukta bekleme süresi, iletimdeki gecikme süresinin gölgesinde kalmakta ve yok sayılmaktadır. Bu çalışmalara örnek olabilecek bir geliştirim (Ramaswami and Sivarajan 1996)'da görülmektedir. (Ramaswami and Sivarajan 1996)'da gönderici ve alıcı düğümler arasında yaşanan ortalama gecikme değerini ve ağdaki sıkışıklığı minimize etmeyi hedefleyerek sanal bir topoloji oluşturan ve bu topolojide trafik yönlendirmesi yapan bir çalışmaya yer verilmektedir. Sonuçlar arasında, gecikme değerinin göz önünde bulundurulmadığı durumlarda geliştirilen topolojilerin yapay olduğu, fiziksel olarak birbirine yakın düğümlerin iletişim için çok daha uzun ve karmaşık yollar kullandıkları iddia edilmektedir. Ancak üzerinde çalışılan problemin yüksek karmaşıklığı sebebiyle, literatürde gecikme değerlerinin yok sayıldığı çalışmalar görülmüştür (Liu et al. 2011b; Nag and Tornatore 2009).

Sanal topoloji tasarımı ve güncel tutulması problemine literatürde sıklıkla görülen yaklaşım, sanal topolojilerin değişen trafik ihtiyacına göre yeniden yapılandırılması yöntemidir (Bala et al. 1996; Banerjee and Mukherjee 2000; Labourdette, Hart, and Acampora 1994; Ramamurthy and Ramakrishnan 2000). Ancak yeniden yapılandırma işlemi, hali hazırda süren iletişimi sekteye uğrattığı için iletişim kalitesini etkilemektedir. Bu negatif özelliği ortadan kaldıran bir yaklaşım (Gencata 2003)'de görülebilmektedir. Yapılan çalışma optik WDM ağların güncel trafiğe göre dinamik ve sürekli olarak uyarlanmasını hedeflemektedir. Böylece güncelleme için gerekli olan öngörülemez trafik tahminlemesi, kritik karar tetikleme ve maliyetli yeniden yapılandırma mekanizmalarının yerine hızlı ve güvenilir olduğu savunulan gözlemleme ve uyarlama mekanizmaları devreye sokulmuştur. Algoritma dahilinde, periyodik olarak sürdürülen gözlem aşamasında, ışıkyollarına ait ortalama yük hakkında bilgi

edinilmekte ve bu ortalama değere göre yükü çok düşük olan ışık yolları iptal edilirken, tehlike yaratacak derecede yüksek yüke sahip olan ışık yollarının yükünü hafifletmek için yeni ışık yolları topolojiye eklenmektedir. Benzer bir çalışma (Kocak et al. 2004)'te görülmektedir. Önceki çalışmadan farklı olarak, (Kocak et al. 2004)'te geliştirilen algoritma, ağdaki trafiği dengeleyebilmek için sezgisel bir yaklaşım kullanarak en fazla yüklü hattın yükünü dağıtmaya odaklanmaktadır. Bu amaçla, etkin olarak kullanılamayan en hafif yüklü ışık yollarının iptal edilmesi ve bunların yerine en ağır yüke sahip ışık yolunun yükünü hafifletebilecek yeni ışık yollarının kurulması esas alınmaktadır.

(Sahasrabuddhe, Ramamurthy, and Mukherjee 2002)'de yapılan çalışmada IP-over-WDM ağlar için garanti edilebilecek en yüksek ağ kapasitesini hesaplamak üzere bir formül geliştirilmiştir. Bunun yanı sıra, IP-over-WDM ağlar için, WDM paylaşılan yedek yol koruma yöntemi ve IP onarma yöntemleri matematiksel olarak (ILP ile kullanılmak üzere) formülleştirilmiştir; sonuçta optimal bir sanal topoloji elde edilmiş ve ağ kapasitesini en yüksek değere ulaştıran bir trafik akış yönlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Sanal topoloji oluşturma ve trafik akışını dengeleme işlemlerinin basitleştirilebilmesi için sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. ILP ile çözüm üreten bir başka çalışma olarak (Modiano and Narula-Tam 2002)'de, fiziksel WDM ağ altyapısı üzerine korunan sanal topoloji kurmak için ILP formülleri oluşturulmuştur. Çalışmada kalımlı bir sanal topoloji tasarlanması için gerekli ve yeterli koşullar listelenmiş ve bu koşullar formüllerin geliştirilmesi için kullanılmıştır. Kesi kümesi (*cut set*) kısıtı üzerinde geliştirimlerin yapıldığı çalışmanın özellikle yoğun bağlantılı ağlarda kalımlı yönlendirmeler sağladığı öne sürülmektedir. Bir başka çalışmada, evrimsel algoritmalar ve karınca kolonisi en iyileme yöntemleri kullanılarak, hatalara karşı çabuk toparlanan bir sanal ağ eşleştirmesi yapılmıştır (Corut Ergin et al. 2010). Yazarlar, evrimsel algoritmaları NP-tam problemlerde başarılı uygulamaları olmasından dolayı, karınca kolonisi en iyileme algoritmalarını ise kısıtlı kombinyon (combinatorial) en iyileme problemlerindeki başarılı performanslarından dolayı seçtiklerini öne sürmektedirler. Kullanılan dalgaboyu sayısını minimize etme kısıtıyla tasarlanan algoritmaların, kalımlı sanal topoloji eşleştirme problemine ILP yöntemine oranla daha kısa sürede ve daha az işlemci gücüyle tam başarılı sonuç ürettiği öne sürülmektedir.

3.2 Yönlendirme ve Dalgaboyu Atama (*Routing and Wavelength Assignment*)

Yönlendirme ve dalgaboyu atama (*routing and wavelength assignment-RWA*) problemi, ağda ortaya çıkan iletişim ihtiyacı doğrultusunda bağlantılar için yönlendirme yaparak ve uygun dalgaboyları bulup atayarak ışıkyolları kurma problemidir (Zang et al. 2000). RWA problemine çözüm sağlayan algoritmalar, ışıkyollarının üzerinden geçeceği uygun dalgaboyuna sahip fiziksel hat ve düğümlerin tespitini yaparak trafik isteklerine kaynak ataması yapmaktadırlar. Işıkyolları kullanımı ile fiziksel olarak birbirine komşu olmayan, aralarında direk bağlantı hattı bulunmayan düğümler, kurulan devre aracılığıyla sanal komşu hale gelmekte, aralarındaki iletişim için ağda devre kurulumu haricinde herhangi bir yönlendirme yapılmamaktadır. RWA probleminin NP-tam olduğu bilinmektedir (Chlamtac, Ganz, and Karmi 1992). Bu tür problemler çokterimli (*polynomial*) zamanda çözülemediği ve hesaplama zamanı limitsiz arttığı için günümüz hesaplama yöntemleri ile sayısal olarak kontrol edilememektedir (*computationally intractable*). En iyi sonucu bulan algoritmalar en kötü durum senaryosunda üstel işlem zamanına ihtiyaç duymaktadır (Ramesh, Konda, and Vaya 2012). Bu tür problemlerin çözümünde çokterimli zamanda çözülebilen karar verme algoritmalarından yararlanılabilmektedir.

RWA tipik olarak üç tip trafik isteğini karşılamak üzere kategorize edilmektedir: statik, dinamik artımlı ve dinamik. Statik trafik tipinde, tüm bağlantı ihtiyaçları ve iletişim desenleri önceden bilinmektedir ve bu ihtiyaçlar doğrultusunda gerekli ışıkyolları çevrimdışı olarak tüm ağı kapsayacak şekilde kurulmaktadır. Hedef, tüm bağlantı isteklerine cevap verirken dalgaboyu sayısı vb. ağ kaynaklarını minimum düzeyde kullanan bir yapı oluşturmaktır. Problem bu haliyle statik ışıkyolu kurulumu (*static lightpath establishment-SLE*) problemi adını almaktadır.

Trafik desenlerinin önceden belli olmadığı, kalıcı iletişim ihtiyaçlarından doğan bağlantı isteklerinin ardışık olarak ağa talepte bulunduğu durumlar dinamik artımlı trafik tipi olarak adlandırılmaktadır (Zang et al. 2000). Bu durumda, her bağlantı isteği geldiğinde ağda bu ihtiyaca karşılık uygun bir ışıkyolu kurulumu gerçekleştirilmektedir. Benzer şekilde, belirli bir sonlanma zamanları olan bağlantı isteklerinin belirli bir desene bağlı olmaksızın ağa talepte bulunduğu durumlar dinamik trafik tipi olarak tanımlanmakta ve yine istek geldiği anda uygun bir ışıkyolu ataması gerçekleştirilmektedir (Zang et al. 2000). Dinamik ve dinamik

artımlı trafik tiplerine cevap olarak geliştirilen mekanizmalar arasındaki başlıca fark, dinamik trafik tipinde kurulan ışıkyollarının, onları kullanan bağlantıların hat tutma süreleri sonunda sonlandırılması, buna karşılık artımlı trafik tipindeki bağlantılar sonlanmadığı için ışıkyollarının da sonlandırılmamasıdır. Her iki trafik tipi için geliştirilen çözümlerde hedef, bağlantı engelleme yüzdesi olabildiğince az tutulurken ağ kaynaklarının da en uygun şekilde kullanılmasını sağlamaktır. Problem bu haliyle dinamik ışıkyolu kurulumu (*dynamic lightpath establishment-DLE*) problemi olarak adlandırılmaktadır.

NP-tam olduğu bilinen RWA problemini basitleştirmek amacıyla, çözüm önerileri iki alt problem için ayrı ayrı ele alınabilmektedir. Yönlendirme alt problemi için kullanılabilecek basit öneriler arasında, sabit yönlendirme (*fixed routing*), alternatifli sabit yönlendirme (*fixed-alternate routing*) ve uyarlamalı (dinamik) yönlendirme (*adaptive routing*) yöntemleri sayılabilmektedir. En basit çözümü sunan sabit yönlendirme, iletişim için, verilen gönderici–alıcı ikilileri arasında hep aynı yolun seçilmesini önermektedir. Alternatifli sabit yönlendirme, bir önceki yöntemin sabit yol mantığını uygularken, seçili yolun ihtiyaç durumunda kullanımda olması ihtimaline karşı alternatif yolları belirlemekte ve uygunluk sırasına göre bir listede tutmaktadır. Alternatif yollar birbirlerinden hat bağımsız olmak zorundadırlar. Uyarlamalı yönlendirme ise, dinamik olarak gelen iletişim isteklerine ağı o anki kullanım durumuna göre uygun bir yol taraması ve ataması yapmaktadır. Kalımlılık açısından bakıldığında alternatifli sabit yönlendirme yöntemi tablolarda tutulan hazır alternatif yolların kolayca tespit edilebilmesi avantajından dolayı güçlü görünmektedir. Uyarlamalı yönlendirme yöntemi ise ağı anlık yoğunluğuna göre tarama yaptığı için daha etkin kaynak kullanımı ve daha düşük engelleme oranı sunmaktadır. Uyarlamalı yönlendirme üzerinde yapılabilecek küçük değişikliklerle koruma ya da onarma sağlayabilecek hale getirilebilmektedir (Zang et al. 2000).

İkinci alt problem olan dalgaboyu atama problemindeki kısıt bir hattan geçen iki ışıkyolunun farklı dalgaboylarını kullanması gerekliliğidir. Bu yöntemde kullanılabilecek bazı sezgisel yaklaşımlar: i. Rasgele, ii. ilk uygun (*first-fit*), iii. en az kullanılan (*least-used*), iv. en çok kullanılan (*most-used*), v. en düşük çarpım (min-product), vi. en az yüklü (*least-loaded*), vii. en büyük toplam (*max-sum*), viii. bağıl kapasite kaybı (*relative capacity loss*), ix. dalgaboyu ayırma (*wavelength reservation*), x. eşik değer koruma (*protecting threshold*) sezgisel yaklaşımları sayılabilmektedir. Bu yaklaşımlar hakkında daha detaylı bilgi için (Zang et al. 2000) ve kullandığı kaynaklarının okunması önerilir.

Statik trafik tipinde ışıkıyolları oluşturulması probleminde, kullanılacak dalgaboylarının sayısını en küçükte tutarak tüm trafik isteklerine servis sağlamak amaçlanmaktadır. Problemin bu haliyle, dalgaboyu atması yapmak için çizge boyama algoritmalarından (*graph-coloring algorithms*) faydalanan çalışmalar görülmektedir (Banerjee and Mukherjee 1996; Biswanath Mukherjee 1997). Aynı fiziksel hattı paylaşan ışıkıyollarına dalgaboyu ataması yapılırken her iki ışıkıyolunun birbirinden farklı dalgaboylarını kullanmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Problem bu doğası ile çizge boyama problemine benzerlik göstermektedir. Böylece kurulacak ışıkıyollarında kullanılacak dalgaboyu sayısını minimize etmeyi hedefleyen bir yaklaşım elde edilmiş olmaktadır.

ışıkıyollarının dinamik olarak oluşturulduğu senaryolarda, kullanılacak dalgaboyu sayısını minimize etme amacı yerine dalgaboyu sayısının sabit olduğu dşnlerek engellenecek iletişim istekleri sayısını minimize etmek hedeflenmektedir (Zang et al. 2000). Literatürde sabit yönlendirme (*fixed routing*), alternatifli sabit yönlendirme (*fixed-alternate routing*) ve uyarlamalı (dinamik) yönlendirme (*adaptive routing*) yöntemlerini kullanarak tasarlanmış algoritmalara da rastlanmaktadır (Harai, Murata, and Miyahara 1997; Kit-Man Chan and Yum n.d.; Li and Somani 1999; Ramamurthy 1998; Ramamurthy and Mukherjee 1998). Dalgaboyu seçimi için, ilk uygun, en az kullanılan, en çok kullanılan, en az yüklü, bağlı kapasite kaybı, vb. sezgisel yaklaşımları kullanan çalışmalar görülmektedir (Mukherjee 2006). Kaynak atama için yeni bir sezgisel yaklaşım olarak önerilen dağıtık bağlı kapasite kaybı (*distributed relative capacity loss-DRCL*) yönteminde, ağdaki düğümlerin her birinde Bellman-Ford algoritmasındaki yönlendirme tabloları benzeri birer bağlı kapasite kaybı (*relative capacity loss-RCL*) tablosu tutulduğu ve bu tabloların periyodik olarak komşu düğümlerle paylaşılması sonucu her düğümün kendi tablosunu güncellediği düşünülmektedir (Zang et al. 2000). Bu yaklaşımda, her iletişim isteği geldiğinde ağın o anki durumunu gözlemek yerine, düğümlerdeki bu RCL tablolarına danışılıp yönlendirme kararı verilmektedir.

Kaynak atama yöntemleri programlanmışlık açısından incelendiğinde, zamanlanmış (*scheduled*) ve zamanlanmamış (*unscheduled*) olarak iki kategoride ele alınabilmektedir. Her iki kategori de statik ve dinamik trafik tiplerine uygun olarak tasarlanabilmektedir. Zamanlanmış yöntem kendi içinde sabit zamanlamalı (*fixed scheduled*) (Kuri et al. 2003) ve esnek zamanlamalı (*sliding scheduled*) (Li and Wang 2006) olarak iki şekilde ele alınmıştır (Cavdar et al. 2010). Genellikle literatürde yer alan çalışmalar iletim isteklerinin zaman kısıtlarını göz önünde bulundurmayan, zamanlanmamış yöntemler sunmaktadır. Bu durumda iletim

istekleri ağı geldikleri zaman, ağı o anki durumuna göre kaynak atamasına tabi tutulmaktadırlar. Buna karşılık zamanlanmış yöntemlerde gelen isteğin zaman kısıtları göz önünde bulundurularak etkin kaynak kullanımı sağlayacak şekilde kaynak atamaları yapılmaktadır (Cavdar et al. 2010). Statik trafik modelinde esnek zamanlamalı kaynak atama yöntemlerine (Andrei et al. 2008; Jaekel and Chen 2007; Li and Wang 2006; Tanwir et al. 2008), dinamik trafik modelinde esnek zamanlamalı kaynak atama yöntemlerine (Andrei et al. 2008; He, Wang, and Leigh 2006; Shen et al. 2007; Tanwir et al. 2008) referanslarındaki çalışmalarda rastlanmaktadır. Dinamik trafik için esnek zamanlamalı iletişim kaynak atama yöntemlerinden bir tanesi (Cavdar et al. 2010)'da görülebilmektedir. Sunulan çalışma, dinamik iletişim isteklerinin gecikmeye karşı duyarlılığını göz önüne alan bir ağ iletim programlaması yöntemidir. Çalışmada kalımlılık, paylaşılan yedek yol koruma yöntemi kullanılarak sağlanmaktadır. Bu yöntemle etkin kaynak kullanımından ödün verilmeksizin istek engelleme oranının düşürüldüğü öne sürülmektedir. Bu konuda daha fazla bilgi ve örnek çalışmalar için (Cavdar et al. 2010) ve referansları önerilmektedir.

Optik WDM ağların, sanal topoloji tasarımı ve yönlendirme ve dalgaboyu atama problemleri için getirdiği kazanımları fiziksel ağ katmanında sanal özel ağ (*virtual private network*-VPN) tasarımı problemine uyarlayan çalışmalar (Yayimli 2009) ve (Cavdar, Yayimli, and Mukherjee 2008)'de görülmektedir.

3.3 Optik Ağ İletim Mimarileri (*Optical Network Transport Architectures*)

Optik ağ iletim mekanizmaları, dalgaboyu yönlendirmeli, paket anahtarlama, devre anahtarlama ve etiket anahtarlama olmak üzere alt başlıklarda ele alınabilmektedir (Mukherjee 2006). Bu çalışmalar merkezi ve dağıtık karar mekanizmalı, tampon bellek kullanımlı ve tamponsuz, zaman programlamalı, kayıplı, vb. alt başlıklarla birbirlerinden farklılaşmaktadır.

Daha önceki bölümlerde bahsedilen dalgaboyu yönlendirme kullanan iletim mimarileri WDM optik ağlarda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Literatürde başlıca paket anahtarlama mimari olarak OPS (*optical packet switching*) görülmektedir. Verilerin paket bazında el alındığı ve ara düğümlerde bireysel olarak yönlendirilmeye tabi tutulduğu OPS mimarisinde yönlendirme paket başlık bilgilerine bakılarak yapılmaktadır (Stern et al. 2009). Paket anahtarlama iletim yöntemi, cihazların yüksek maliyetleri sebebiyle optik alan için çok fazla geliştirilmemektedir. İletim programlamasının dağıtık olarak yapıldığı paket

anahtarlama yapıda, omurgadaki ara düğüm yönlendiricilerde veri depolaması yapılmaktadır. İletimin optik fiberler kullanılarak yapıldığı bu yöntemde, anahtarlama/yönlendirme fonksiyonları tasarıma göre optik veya elektronik alanlarda gerçekleştirilebilmektedir (Weichenberg, Chan, and Medard 2007).

Paket anahtarlama yapıya benzeyen OLS (*optical label switching*) mimarisi ise optik seviye etiketleme kullanarak ara düğümlerde yönlendirme yapmaktadır (Stern et al. 2009). MPLS/GMPLS protokollerindekine benzer şekilde, paketlere düğümler bazında yerel olarak anlam taşıyan etiketlemeler yapılmaktadır. Her düğümde değiştirilen bu etiketler sayesinde paket hedefine doğru yönlendirilmektedir.

Devre anahtarlama yapılarında, veriler parçalanmayan bütünler halinde ele alınmaktadırlar. Bu şekilde tasarım yapılmasının sebebi, yüksek bant genişliğine sahip alt yapılarda veri iletiminden ziyade devre kurulum ve iletim planlama aşamalarının daha uzun süreler kapsamasıdır. Devre anahtarlama yapılarında, ara düğümlerde depolama mekanizmaları kullanılmamakta, paket anahtarlama mimarilerdeki gibi ara düğümlerde yol hesaplaması ve iletim kararı mekanizmaları bulunmamaktadır. Devre anahtarlama tasarımlarda birçok uyarlamaya rastlansa da öne çıkan tasarım OBS (*optical burst switching*) mimarisidir (Mukherjee 2006). OBS, planlama yapılmadan veri iletiminin yürütüldüğü bir yapıdır. Devre kurulumu için, veri iletiminde kullanılan optik alandan zaman ve uzamsal olarak bağımsız olan elektronik kontrol alanı kullanılmaktadır. Ara düğümlerde depolama yeteneği olmayan OXC (*optical cross-connect*) anahtarlama elemanları yerleştirilmektedir. Veri depolaması, erişim düğümlerinde konumlanmış sınırsız kuyruklarda, hedef düğüm ve servis kalitesi isteklerine göre gruplandırılarak gerçekleştirilmektedir (Weichenberg et al. 2007). Bu gruplamalar sayesinde küçük boyutlara sahip olan paketler biraraya getirilerek görece büyük boyutlu çoğuşmalar (*burst*) oluşturulmakta ve veri birimi olarak bu çoğuşmalar ele alınmaktadır. Bir çoğuşma iletimi başlatılmadan önce, kontrol alanından bir kontrol paketi gönderilmektedir. Bu kontrol paketi, ara düğümlerde elektronik olarak ele alınmakta ve uçtan uca tamamen optik bir iletim yolu oluşturulmasını sağlamaktadır. Kontrol paketinin ardından, uçtan uca yol kurulumunu beklemeksizin belirli bir süre sonunda çoğuşma optik alanda iletim hattına gönderilmektedir. Yol kurulumuna dair onay beklemeden iletim başladığı için ara düğümlerde yaşanabilecek kaynak yetersizliği bazen çoğuşma iletime başladıktan sonra fark edilebilmekte ve bu durumunda OBS o hattaki çoğuşmaları iptal edebilmektedir (Simmons 2008). Dolayısıyla OBS kayıplı bir iletim tasarımıdır (Weichenberg et al. 2007).

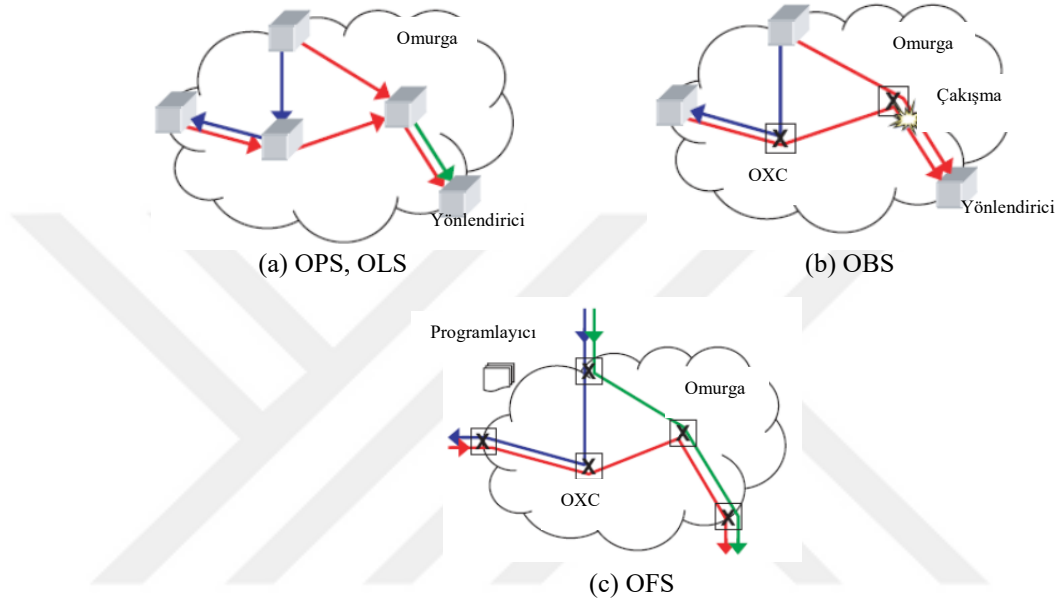
Devre anahtarlama bir uyarlama olarak OFS (*optical flow switching*) tasarımı literatürde görülmektedir (Weichenberg et al. 2007). OFS yöntemi kabaca, OBS yönteminin iletim planlaması yapılan şeklidir. Veri iletimi son kullanıcı düğümleri arasında elektronik alanda yapılan bir koordinasyon ile planlanmaktadır. Düğümler arasında kurulan iletim ortamı kısa süreler için aktif kalmaktadır. Veri devreleri genellikle omurgadaki uç yönlendiriciler arasında kurulurken, OFS yönteminde son kullanıcı düğümler arasında iletim hattı kurulmaktadır (Weichenberg et al. 2007). OBS'ye benzer şekilde tüm veri depolamaları son kullanıcılardaki kuyruklarda yapılmakta, omurga düğümlerini OXC'ler teşkil etmektedir. OFS yönteminin yüksek bant genişliğine sahip işlemler için uygun olduğu, daha düşük bant genişliğine ihtiyaç duyan işlemler için OPS/EPS ya da GMPLS'e göre daha maliyetli ve karmaşık olduğu raporlanmaktadır (Chan, Weichenberg, and Medard 2006; Weichenberg, Chan, and Medard 2009).

Omurga ağlarda WDM optik iletim için tasarlanan bu mimarilerin birbirlerine göre farklı üstünlükleri bulunmaktadır. Programlama ve merkezi karar mekanizmasına sahip olması sebebiyle OFS diğer iki mimariden daha etkin yönlendirmeler yapmaktadır. Ancak, programlama süreci sebebiyle düğümlerin iletimde gecikme yaşamasına sebep olmaktadır. OBS, en hızlı ve kaynak kullanımı etkin bir yöntem olarak görülmekte ancak; ara düğümlerdeki kaynak yetersizlikleri yaşandığı durumlarda karşılaşılan çakışmalar sonucu veri kayıpları oluşabilmektedir. OPS, omurga düğümlerinde veri depolama yapabildiği için dağıtık ve daha esnek anahtarlama seçeneği sunmakta ancak; cihaz maliyetleri sebebiyle etkin olarak kullanılamamaktadır. Daha detaylı bilgi için (Mukherjee 2006; Stern et al. 2009; Weichenberg et al. 2007) kaynaklarının okunması önerilir. Karşılaştırmaları yapılan mimarilerin görsel çizimleri Şekil 3.3'te görülebilmektedir.

3.4 Hat Hızı Atama (*Line Rate Assignment*)

İletim desenlerinin hızla değişmesi ve iletilecek veri miktarının sürekli artış göstermesi, optik ağların değişik ihtiyaçları karşılayabilecek şekilde geliştirilmesini gerektirmektedir. Günümüzde, bu değişimleri ve artışları karşılayabilmek adına anılabilecek bir yaklaşım karma hat hızlı (*mixed line rate-MLR*) iletim ağları kavramıdır. MLR ağlar, bir optik fiber üzerindeki farklı dalga boylarında farklı hat hızlarında (ör. 10, 40, 100 Gbps) iletim yapılabilmesini mümkün kılan teknolojiye sahip ağlardır. Her düğümün, ilgili hat hızını işleyebilecek almaç-göndermeçlere sahip olması gerekmektedir. Klasik anlamda tekil hat hızında (*single line rate-SLR*)

çalışan optik ağların 10 Gbps iletim hızına sahip olması alışılmış olan alt yapıdır. Bu hızın arttırıldığı ancak yine tüm ağın tek bir hat hızına sahip olduğu çalışmalar literatürde görülmektedir. Bu çalışmalarda raporlanan sorun, yüksek iletim hızlarına sahip hatların, yenilemesiz iletim mesafelerinin çok düşük olması; bu sebeple ağ boyunca yenileyici kullanımının getirdiği maliyetlerin ağ maliyetini yükseltmesidir (Liu et al. 2011a; Varvarigos et al. 2011). Bu sebeple, SLR ağlarda iletim mesafesi ve kapasite ikilemi göz önünde tutularak genel bir seçim yapılmalıdır.



Şekil 3.3. Optik iletim mimarilerinin genel çizimleri (Weichenberg et al. 2007).

Karşılaşılan kapasite ve iletim mesafesi ödünleşimi sebebiyle, MLR ağlar kullanılarak birden çok hat hızının birarada kullanılabilir olması, trafik ihtiyaçlarına göre bu hızlardan uygun olanının dinamik olarak trafiğe atanması düşünülmüştür. 10 Gbps ve 40 Gbps hat hızları günümüzde standartlaşmış durumdadır. 100 Gbps hat hızı ticari olarak kullanıma girmekte iken 400 Gbps ve 1 Tbps hat hızları araştırma ortamlarında kullanılabilmekte ve yakın gelecekte ticari kullanıma girecekleri düşünülmektedir (Simmons 2008; Varvarigos et al. 2011).

Çizelge 3.1’de farklı hat hızlarına ait örnek almaç-göndermeç (*transponder*) ve yenileyici (*regenerator*) maliyetleri listelenmektedir. Buradan da görülebildiği gibi, yüksek hızlara ait almaç-göndermeç maliyetleri taşıdıkları kapasite ile doğru orantılı olarak artmamaktadır. 100 Gbps hat hızında iletim yapan bir almaç-göndermeç, 10 Gbps almaç-göndermeçin 10 katı iletim kapasitesine sahip olmakla birlikte maliyeti sadece 3.75 katıdır. Bu maliyet indirimi (*volume discount*) sayesinde, yüksek bant genişliği ihtiyacındaki trafik isteklerinin, birden çok düşük hızlı hattan iletilmesinden ziyade, yüksek hızlı hatların kullanılması ekonomik

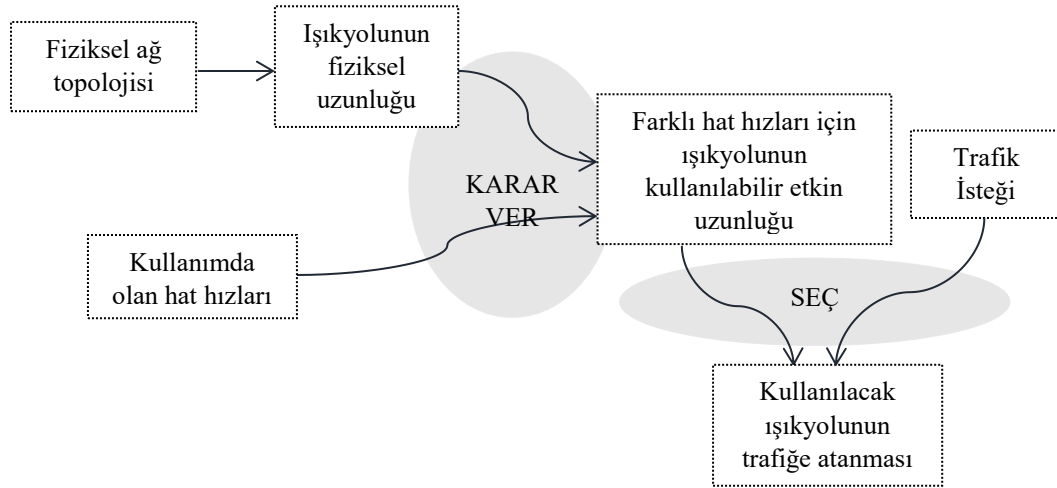
çözüm sağlamaktadır. Yine benzer şekilde, küçük bant genişliği ihtiyacına sahip trafik isteklerini geniş kapasiteli hatlarda trafik tımarlama (*traffic grooming*) yaparak maliyet indiriminden faydalanan etkin çözümler elde etmek mümkündür (Liu et al. 2011a).

Çizelge 3.1. Almaç-göndermeç ve yenileycilere ait maliyet karşılaştırması (Nag and Tornatore 2008).

Cihaz	Maliyet
10Gb/s Almaç-göndermeç (T_{10})	1X
40Gb/s Almaç-göndermeç (T_{40})	2.5X
100Gb/s Almaç-göndermeç (T_{100})	3.75X
Yenileyici (R_r)	1.4 X (T_r) X

r: hat hızı (10, 40, 100Gbps)

Bu tartışmalar ışığında bakılacak olursa, farklı dalgaboyları üzerinde karma hat hızı kullanımı optik ağlarda önemli bir araştırma konusu haline gelmektedir. Yapılan çalışmalar, MLR ağların kullanımının yönlendirme ve dalgaboyu atama problemlerindeki klasik kısıtlara esneklik sağladığını, etkin maliyetli ve kalımlı tasarımlar yapılmasını kolaylaştırdığını göstermektedir (Liu et al. 2011a, 2011b; Nag and Tornatore 2008). Şekil 3.4'te MLR ağlarda yönlendirme probleminin ele alınışı görselleştirilmiştir.



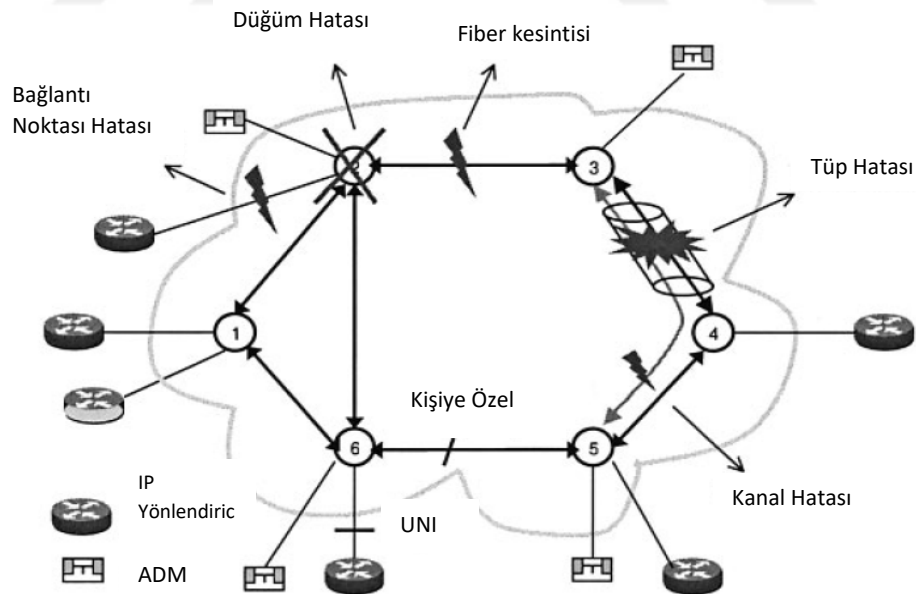
Şekil 3.4. MLR ağlarda yönlendirme (*routing*) problemi.

3.5 Kalımlılık (*Survivability*)

Kalımlılık, sözlük anlamı olarak, bir iletişim ağının doğal afetler, nükleer patlamalar, düşman saldırıları gibi bir ya da birden çok noktada gerçekleşen çeşitli zarar verici etkenlerin altında belirli bir düzeye kadar işlevini sürdürebilmesidir

(Akademi 2011). Farklı bir tanım ile kalımlılık, fiber kesintisi ve düğüm hasarı gibi durumlarda ağı ne kadar çok hasar aldığına bakılmaksızın servis devamlılığının sağlanabilmesi yeteneğidir (Bhandari 1999). Örnek üzerinden bakılırsa, tek bir fiberin, her biri 10 Gbps hızda çalışan 80 dalgaboyu kanalı taşıdığı varsayılırsa, karşılaşılabilecek bir fiber kopmasında 0.8 Tbps veri kaybı yaşanacaktır. Fiber kabloların özellikle uzun mesafeler için genellikle gruplar halinde döşendiği düşünülürse, fiber kopmasının getireceği veri kaybı katlanarak artacaktır. Kaybedilecek veri miktarının bu kadar büyük olduğu bu durumda, tasarlanan ağı kalımlılığının düşünülmesi hayati bir konudur.

Bir WDM optik ağı işleyişi sırasında karşılaşılabileceği donanım kusurları Şekil 3.5'te, bu kusurların görülme sıklıkları ve onarım sürelerine ait istatistikler ise Çizelge 3.2'de görülmektedir. Ağ tasarımlarında hat ve düğümlerde karşılaşılabilecek arızalara karşı önlemler alınmalıdır. En bilinen yöntem olarak, yerel kanal kesintilerinde trafiği müsait olan başka bir kanala atamak; müsait bir başka kanal yok ise hat arızası gibi ele alarak yeni bir hat arayışına gitmek önerilebilmektedir. Üst katmanlardan kaynaklanan bağlantı noktası bozulması, vb. arızalar da ağdaki iletişimi etkilemektedirler; ancak bu arızalar ait oldukları katmana ait yönetim politikaları tarafından ele alınmalıdır.



ADM: Eklemeli-Çıkarmalı Çoğullayıcı (*Add-drop multiplexer*)
UNI: Kullanıcı-Ağ Arayüzü (*User-to-Network Interface*)

Şekil 3.5. İletim ağlarındaki hata tipleri (Mukherjee 2006).

Çizelge 3.2. Hata Oranları ve Tamir Süreleri (Mukherjee 2006).

Ölçüt	Bellcore İstatistikleri
Ekipman OTS	2 saat
Kablo kesintisi OTS	12 saat
Kablo kesintisi oranı	1-5 kesinti / yıl / 1000km
Vx hata oranı	10867 ZOHS
Ax hata oranı	4311 ZOHS

OTS: Ortalama Tamir Süresi (MTTR: *Mean Time to Repair*)

ZOHS: 10^9 birim zamanda oluşan hata sayısı (FIT: *Failure-in-Time*)

Vx: Optik verici sistemleri (Tx: *Optical transmitter systems*)

Ax: Optik alıcı sistemleri (Rx: *Optical receiver systems*)

WDM ağlarda kalımlılık üzerine yapılan çalışmaların çoğunun odak noktası tek hat ya da düğüm arızalarıdır. Düğüm arızaları nispeten seyrek görüldüğü ve anahtarlayıcılardaki kontrol üniteleri gibi düğümler de yedekli olarak çalıştırılabildiği için iletim ağlarındaki baskın arıza tipi hat kesintisi olarak ele alınmaktadır. Ayrıca, düğümlerdeki bağlantı noktalarının arızalanmaları da hat arızası gibi ele alınabileceğinden çalışmaların odağına hat arızalarının yerleştirilmesi genel eğilimdir. Bu senaryo literatürde tekil hat arızası (*single-link failure*) varsayımı olarak bilinmektedir. Senaryoda, ard arda oluşacak arızaların biri tamir edilmeden diğerinin oluşmadığı varsayılmaktadır. Bu varsayıma karşın, gerçek ağlarda çoklu ya da yaklaşık-eşzamanlı arıza durumlarıyla karşılaşıldığı durumlar da mevcuttur ve uygun toparlanma yöntemleri tasarlanarak ele alınabilmektedirler (Zhang and Mukherjee 2004).

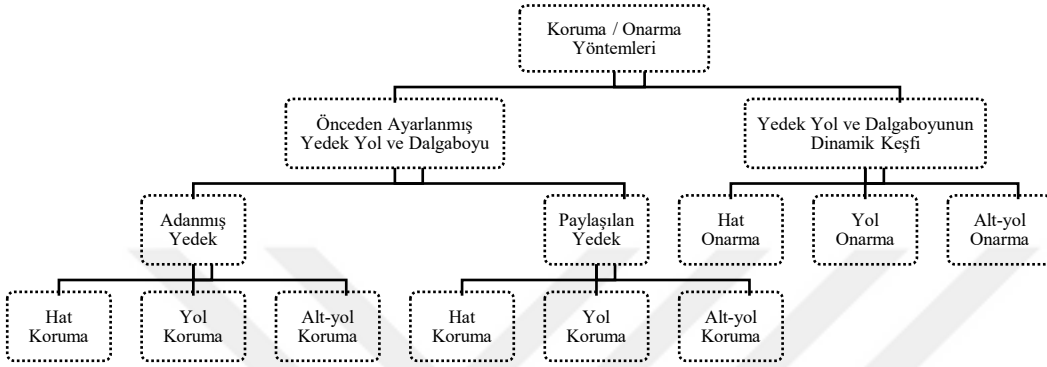
Kaynak atama algoritmalarının gerçekleştirmesi gereken görevlerden biri ortak risk grubu (*shared risk group*-SRG) haritalarını oluşturmaktır. SRG haritaları bir tekil arıza durumunda bundan etkilenecek optik kaynakların ilişkilerini tanımlamaktadır (Simmons 2008). Bir SRG, tek bir fiber üzerindeki tüm optik kanalları, ya da bir kabloda beraber sarılmış tüm fiberlerden geçen bütün optik kanalları, ya da aynı devreden geçen tüm optik kanalları kapsayabilmektedir (Mukherjee 2006). Tek bir fiberin birden çok devreden geçebilmesi sebebiyle bir optik kanal birden fazla SRG içine dahil olabilmektedir. Kaynak atama algoritmaları SRG haritalarını kullanarak SRG-bağımsız yollar oluşturmaya çalışmaktadırlar. Bu sayede herhangi bir devre kesintisinde en az bir rota sağ kalmaktadır (Mukherjee 2006). Bu kısıta SRG kısıtı (*shared risk group constraint*) adı verilmektedir. Geniş alanı etkileyebilecek felaket senaryolarında çözüm olarak

SRG'lere yakın mesafelere yedek düğümlerin ve hatların eklenmesiyle tüm iletişim öğelerinin zarar görmesinin engellenmesi düşünülmektedir.

İletim ağlarında kalımlılık ATM, IP, SONET/SDH vb. birçok katmanda sağlanabilmektedir. Her katmanın hata yönetimi politikaları farklı özellikler ve yeteneklere sahiptir. Örneğin IP ağlarında, internet birden çok otonom sistemin birleşimi olarak ele alınabilmektedir. Merkezi yönetim altındaki yönlendiricilerden oluşan otonom sistemlerin kapsamındaki yönlendiriciler, OSPF (*Open Shortest Path First*) benzeri IGP (*Interior Gateway Protocol*) protokolleri çalıştırarak birbirleriyle yönlendirme bilgilerini paylaşmaktadırlar (Mukherjee 2006). Bu şekilde, hat arızalarından kaynaklanan kayıpları belirleyip önleyebilmektedirler. Ancak bu şekilde, hat kaybını belirlemek onlarca saniye sürebilirken, kaybı fark ettikten sonra yönlendirme bilgilerinin güncellenip alternatif yolların hizmete konması da ek birkaç saniye sürebilmektedir. Optik ağlarda ise sinyal kaybı ya da bit hata oranında (*bit error rate-BER*) yükselme olması durumunda hat uçbirimlerinin kaybı algılaması milisaniyeler bazında ölçülmektedir (Mukherjee 2006). Ayrıca optik katman bazı hataları diğer üst katmanlara göre daha kolay ele almaktadır. Bir fiberdeki hata sonucu bütün trafiğin kaybedileceği açık bir gerçektir. Bu kayıp üst katmanlarda telafi edilmek istenirse ağ yönetimi için birçok mesajlaşma ve kontrol yapılması gerekecektir. Oysa optik katmanda bu telafi az sayıda ögenin yeniden yönlendirilmesiyle çözülebilmektedir (Mukherjee 2006). Dolayısıyla iletim ağının kalımlılığını sağlamak için geliştirilecek yöntemler için optik ağ katmanı uygun bir hedef teşkil etmektedir.

Hata yönetimi mekanizmaları iki başlık altında incelenebilmektedir: koruma (*protection*) ve onarma (*restoration*) mekanizmaları. Her iki yöntemin alt başlıkları Şekil 3.6'da görselleştirilmiştir. Koruma yoluyla kalımlılık sağlamak düşünülürse, iletim yollarının tasarlanması aşamasında bazı yollar yedek olarak atanmakta, bu yedekler esas iletim yolları olarak kullanılmamaktadır. Yedek yollar her iletim yolu için ayrı ayrı (*dedicated*) atanabileceği gibi, birden çok hata senaryosu için SRG-bağımsız farklı esas iletim yolları tarafından ortak paylaşılan (*shared*) yedek yol ataması da yapılabilmektedir. Onarma yöntemi seçildiğinde ise, hata oluşması durumunda müsait olan boş yollar dinamik olarak keşfedilmekte, yedek yol olarak seçilmekte ve zarar gören yolların yerine hizmete sokulmaktadır. Genellikle, onarım yoluna gidilmesi daha etkin kaynak kullanımı gösterip, farklı hata tiplerine karşı esneklik sağlasa da atanmış yedek yollarla koruma yöntemi hatalara karşı daha hızlı ve garantili cevap vermektedir (Ramamurthy and Mukherjee 1999a, 1999b). Her iki yöntemde de hat, yol ve alt-yol yedeklemesi seçenekleri görülmektedir. Hat

yedeklemesi, hata durumunda sadece hatadan zarar gören hattın yedeklenmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. Yol yedeklemesi durumunda ise, bir iletim hattında hata oluştuğunda tüm hattın kullanımı iptal edilerek iki uç arasında esas iletim yolu ile hat-bağımsız yeni bir yedek yolun kullanıma sokulması söz konusudur. Yol yedeklemesi yedek kaynakları daha etkin kullanıp, uçtan uca gecikmeyi en aza indirirken hat yedekleme daha hızlı onarım sunmaktadır (Mukherjee 2006).



Şekil 3.6. Tekil hat hatalarından kurtarma için değişik yöntemler (Ramamurthy and Mukherjee 1999a).

Alt-yol koruması (*sub-path protection*) literatüre sonradan eklenen bir kavramdır. Izgara ağlarda iletim yollarını bölümler halinde ele alıp, her bölümün dahilindeki alt-yolları ayrı ayrı yedeklemek önerilmektedir. Benzer şekilde bütün ağ alanlara bölünerek her alan kendi içinde koruma / onarma işleminden sorumlu da tutulabilmektedir (Anand, Chauhan, and Qiao 2002; Ou et al. 2004; Pin-Han Ho and Mouftah 2002). Yol yedeklemesiyle karşılaştırıldığında bu yöntem daha esnek ve kısa onarım süreleri sunmaktadır ancak kaynakların etkin kullanımından ödün vermektedir (Mukherjee 2006). Hat yedekleme yönteminden ise daha etkin kaynak kullandığı görülmektedir.

Yedek iletime ayrılan kapasitenin paylaşılabiliirliği açısından bakıldığında, hat yedekleme yönteminde, ayrılan kapasitenin farklı esas iletim yolları tarafından ortak olarak kullanılma ihtimali artmaktadır. Ancak her hat ayrı bir ışık yolu olduğunda kullanılan ekipman maliyeti çok yükselmektedir. Diğer taraftan yol yedekleme yöntemiyle uçtan uca kurulan ışık yollarını paylaşacak trafik isteklerinin oluşma ihtimali düşük olduğundan bu yedek yolların paylaşılma ihtimali azalmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, alt-yol yedekleme yönteminin paylaşılabiliirlik ve maliyet arasında dengeyi kuracak şekilde tasarlanması uygun olacaktır.

İletim ağı sisteminde hem esas iletim yolundan hem de adanmış yedek yoldan eş zamanlı olarak veri iletiminin yapıldığı, hata oluşması durumunda ise alıcının sadece yedek yolu dinlemeye devam etmesinin yeterli olduğu yöntem “1+1 koruma sistemi” olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntem ile en hızlı toparlanma süresini sağlanmakta, iki uç düğüm arasında ek haberleşmeye ihtiyaç duyulmamaktadır. Verinin sadece esas iletim yolundan gönderildiği, hata durumunda karşılıklı haberleşme yoluyla gönderici ve alıcının atanmış yedek yolu kullanmaya başladığı yöntem “1:1 koruma sistemi” olarak adlandırılmaktadır. 1:1 yöntemi ile yedek yolun daha düşük öneme sahip, ihtiyaç durumunda kesilebilecek iletişim için kullanılması mümkün olmaktadır. Esas ve yedek iletim yolları sayısının birbirinden farklı olduğu durumlarda yedek yol koruması m:n şeklinde sembolize edilmektedir; m adet esas iletim yolu n adet yedek yol ile korunmaktadır. Paylaşılan yedek yol yöntemi de bu duruma örnek teşkil etmektedir ve bu yöntem kaynakların en etkin kullanıldığı, en az maliyetli olduğu raporlanan yöntemdir (Mukherjee 2006).

Yedek yol kullanımı tasarımı geri dönmeli (*reverting*) ya da geri dönmesiz (*non-reverting*) olarak planlanabilmektedir (Mukherjee 2006; Simmons 2008). Geri dönmeli olarak tasarlanan sistemlerde, hata oluşuktan sonra kullanıma sunulan yedek yol, hatanın giderilmesi sonrası tekrar görevi esas iletim yoluna aktarmaktadır. Bu yöntemin avantajı paylaşımlı yedek yol koruması sistemlerinde görülebilmektedir. Zira birden çok iletim yolu için yedek teşkil eden bir yolun, hata durumu sona erdikten sonra boşa çıkarılması, olası bir başka hata durumunda bu yolun tekrar devreye sokulmasına izin vermektedir (Mukherjee 2006).

Alt yapılarda sıklıkla kullanılan SONET/SDH ağlarının tercih ettiği halka (*ring*) topolojisi kolay tasarım, yönetim ve hatalardan hızlı toparlanma çözümleri sunsa da, günümüz omurga ağlarında, ızgara (*mesh*) ağlarının sunduğu daha geniş bant genişliğine, düğümler arası daha yoğun bağlantılara ve dağıtık trafiği akılcı şekilde ele alabilecek avantajlara ihtiyaç duyulmaktadır. Izgara ağların halka topolojiye sahip ağlara göre %20-%60 daha etkin oldukları raporlanmıştır (Ou et al. 2004).

Önerilen kalımlılık sağlama ve koruma/onarma yöntemleri arasında öne çıkan çalışmalara bakılacak olursa, iletim ağı kalımlılığının üst protokol katmanları yerine optik seviyede gerçekleştirildiği iki örnek çalışma (Bonenfant n.d.) ve (Gerstel and Ramaswami 2000b)’de görülebilmektedir. (Gerstel and Ramaswami 2000a) ve (Subramaniam and Dongyun Zhou 2000)’de 1+1 koruma yöntemi ve optik koruma sağlayan diğer WDM ağ mimarileri incelenmiştir. İnceleme sırasında,

hızlı sinyalleşme, farklı hata tiplerine karşı tepkiler, eş zamanlı birden çok hataya verilen tepkiler ve düşük öncelikli trafiğin yönetimi kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Aynı zamanda ızgara ve halka ağ tipleri arasında karşılaştırma yapılmış ve ızgara ağların daha dayanıklı hale getirilmeleri için öneriler sunulmuştur (Gerstel and Ramaswami 2000a). SONET ağlar için tasarlanmış koruma yöntemlerinin küçük değişikliklerle WDM optik ağlara uyarlanabilir hale geleceği tartışılmış, farklı hata tipleri optik ağların doğası uyarınca irdelenmiştir (Subramaniam and Dongyun Zhou 2000). (Crochat, Le Boudec, and Gerstel 2000) farklı protokol katmanları arasındaki hata yayılımını önlemek üzerine önermeler getirmekte ve 1+1 koruma sistemini temel alan bir yol onarma yöntemi önermektedir. (Gerstel, Ramaswami, and Sasaki 1998) WDM çoğullamalı, dalgaboyu dönüşümü kısıtlı (*wavelength conversion constraint*), uçtan uca halka optik ağlarda, düğüm, hat ve kanal hata tiplerine yönelik değişik yönelimleri ele almaktadır. Çalışmada kanal hatalarında 1:W ya da 2:W korumayı temel alan bir yöntem; hat hatalarına karşı, 1:1 koruma sağlayan ve çoklu eşzamanlı hataları onarabilen bir yöntem; düğüm hatalarında ise, hem hat hatalarındaki yöntemle benzer basit bir yöntem hem de düğümler arası eşgüdüm gerektiren daha karmaşık özelleştirilmiş bir iletişim deseni yöntemi önerilmektedir. Bir diğer çalışma, optik ızgara ağlarda, hat ve düğüm hatalarına karşı, Menger teoreminden yola çıkarak tasarlanmış yedekli ağaç yapısını temel alan, merkezi karar mekanizmalı, önceden planlanmış yeni yol ataması yapan bir koruma yöntemi önermektedir (Medard et al. 1999).

(Limal, Danielsen, and Stubkjaer 1998) tekil hat hatalarına karşı bağışık optik ağlarda kapasite kullanımını tahminleyen analitik bir yöntem önermektedir. Kapasite kullanımı, üzerinde ışıkyolu kurulmuş dalgaboyu kanalları sayısının tüm dalgaboyu sayısına oranı olarak tanımlanmak ve hesaplanması için değişik ağ koşullarını karşılayabilecek şekilde farklı formüller önerilmektedir. (Karasan and Goldstein 1998)'de WDM ağlarda onarma işlemi için önerilen klasik dalgaboyu yeniden yönlendirmesi yerine fiberdeki tüm çoğullanmış dalgaboylarına yeni yol ataması yapılması önerilmektedir. Geniş ağlarda bu yöntemin, klasik olarak kullanılan tek dalgaboyuna yeniden yol ataması yaklaşımına göre daha avantajlı olduğu öne sürülmektedir. (Valcarengi and Fumagalli 2000)'de, IP katmanı ve WDM optik katmanı için geliştirilmiş onarma ve koruma teknikleri irdelenmiş, bu tekniklerin IP-over-WDM için uyarlamaları önerilmiştir. Optik ağlarda, kurulan ışık yollarının hem esas iletim yolu hem de başka iletimlere ait yedek yollar için kullanılarak etkin bir kaynak kullanımı sağlanmasını hedefleyen yönlendirme algoritması (Mohan, Siva Ram Murthy, and Somani 2001)'de sunulmaktadır. Bu

yöntem ile onarım garantisinde makul bir düşüşü göze alarak, yedek yolların atıl olarak beklemesinin önüne geçildiği öne sürülmektedir. (Zang and Mukherjee 2001)'de ise uçtan-uca WDM optik ızgara ağlarda yol koruma mekanizması için iletişim yönetim algoritmaları geliştirilmiştir. Hat durumu yönlendirme protokolünün (*link-state routing protocol*) uyarlandığı çalışmada 1+1, 1:1 ve M:N yol koruma yöntemlerinin karşılaştırmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, adanmış yedek yol koruma yönteminin bağlantı onarma hızı performansının yüksek olduğu ancak paylaşılan yedek yol koruma yöntemine göre daha yüksek reddetme oranına ve daha düşük kaynak kullanım etkinliğine sahip olduğu raporlanmıştır (Zang and Mukherjee 2001).

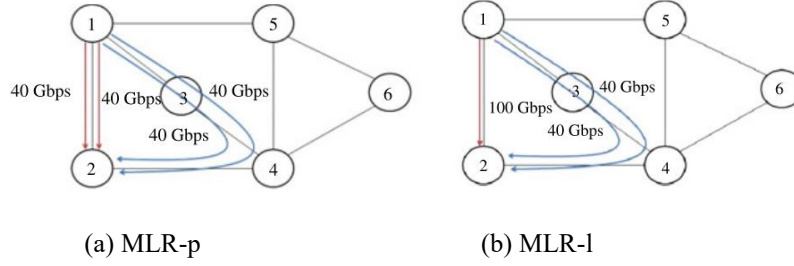
Literatürde kalımlılık sağlamak için yapılan çalışmalar arasında, bir esas iletim yolu için birden çok yedek yolun N ($N \geq 1$) atanmasının önerildiği bir çalışma görülmektedir (Lei Song and Mukherjee 2008). İletim yolunda karşılaşılabilecek hatalarda, o yola atanmış birden çok yedek yol bulunmasının yararlanırlığı arttıracığı, hata durumunda toparlanma süresini kısaltacağı öne sürülmektedir. Bu şekilde tasarlanmış ağlarda, esas iletim yolu ile yedek yolların tamamen hat bağımsız olmasına gerek duyulmamaktadır. İletim yolu ile yedek yolun bazı hatları (k -hat ($k \geq 1$)) paylaşması, yedekleme sistemi için atıl tutulan kaynakların da azalmasını dolayısıyla da etkinliğin artmasını sağlamaktadır. (Lei Song and Mukherjee 2008)'de k -hat ($k \geq 1$) paylaşımlı N -yedek ($N \geq 1$) yol koruma modelinin matematiksel analizlerine yer verilmiş, çoklu-hat paylaşımlı kaynak atama (*multiple-link sharing provisioning-MLSP*) adı verilen dinamik kaynak atama algoritması geliştirilmiştir. MLSP'nin trafik reddetme oranı ve kaynak kullanımı olarak klasik 1+1 adanmış yol koruma sistemine göre daha iyi sonuç verdiği raporlanmaktadır.

SLR ağlarda çoklu hat kullanımını öneren bir çalışmada, iletilecek veriyi uygun olan alternatif yollara dağıtarak kaynak düğümde verinin birleştirilmesinin sağlanacağı çoklu yol kaynak atanması (*differential-delay-constrained survivable multipath provisioning-DDCSMP*) önerilmektedir (Huang, Martel, and Mukherjee 2011). Gecikme farkları kısıtını (*differential delay constraint*) göz önüne alarak K hat bağımsız yol bulan bir algoritmanın (*differential-delay-constrained k disjoint paths-DDCKDP*) da geliştirildiği çalışmada, bir isteğe ait kaynak ve hedef düğümler arasında birbirinden hat bağımsız K adet alternatif yolun tespiti yapılmakta ve veri uygun olanlar arasında dağıtılmaktadır. Esas iletim yollarının seçim aşamasında uyulması gereken kısıt, farklı yolların yaşattığı gecikme miktarları farkının (*differential delay*) belirli bir eşik değeri aşmamasıdır. Bu

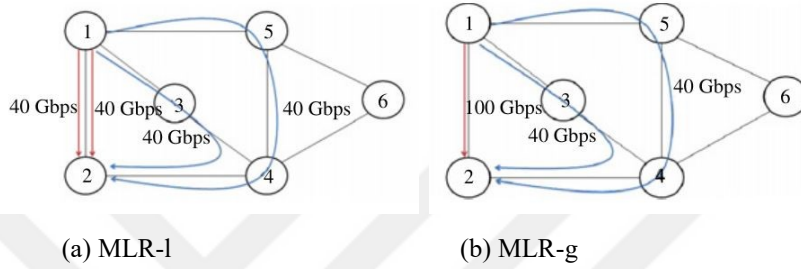
şekilde iletilen trafiğe atanacak yedek iletim yolunun, esas iletim yolları ile hat-ayrık olması; ve iletim kapasitesinin de, esas iletim yolları arasında en yüksek kapasiteye sahip olanı ile aynı ya da daha yüksek olması beklenmektedir. Yedek iletim yolu için ayrılacak kapasitenin olabildiğinde düşük tutulması amaçlandığı için, esas iletim yolları sayısının mümkün en yükseğe çıkarılmasına çalışılmaktadır. Çalışma kapsamında esas iletimde kat edilen en uzun yolu koruyacak ortak koruma yöntemi algoritması (SPLIT) geliştirilmiştir. Hat bağımsız yolların, iletimden önce belirlenmesinin hızı arttıracığı öne sürülmektedir. Bir isteğe atanan birden çok iletim yolu tarafından ortak olarak kullanılabilecek bir yedek yol kalımlılık sağlamak için ayırılmaktadır.

Optik ağlarda sinyal sönümlenmesinden haberdar bir kalımlılık sağlama çalışması (Gao et al. 2011)'de görülmektedir. Çalışmada sinyal sönümlenmesinden kaynaklanan iletişim kesintilerinin önlenmesi için gereken yenileyici ve tımar cihazlarının ağ üzerinde doğru yerleştirilmesi ve kullanılan cihaz sayısının mümkün olan en aza indirilmesi için bir adanmış yol koruması yöntemi tasarlanmıştır. Çalışma sonunda, özellikle çok yüklü ağlarda iletim hızı yüksek olan ve daha uzun optik iletişime sahip ağların maliyetinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

MLR ağlarda yapılan çalışmalarda kalımlılık, çok eski olmayan bir kavramdır. Bu çalışmalara bir örnek, saydam MLR ağlarda ışıkyolu seviyesinde adanmış koruma sağlayan (Liu et al. 2011b) çalışmasıdır. Çalışmada koruma sağlamak için MLR-p, MLR-l, MLR-g adanmış yol koruma yöntemleri geliştirilmiştir. Yöntemlerin şekil üzerinde karşılaştırmaları Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de görülebilmektedir. Çalışmada yer verilen önemli bir gözlem, SLR ağlarda yüksek iletim hızı isteyen trafiklere etkin bir esas iletim yolu bulunabilse bile, iletim mesafesi kısıtı sebebiyle yedek iletim yolu bulunamayabileceğidir. MLR ağlarda ise, 100 Gbps hızında yedek iletim yolu bulunamaması halinde iki adet 40 Gbps ve iki adet 10 Gbps hızında dört farklı ışıkyolu kullanılarak koruma sağlamanın mümkün olacağına dikkat çekilmektedir. Bu şekilde yedek yol bulunabilmesi için çoklu yol atama çözümü önerilmiştir. Çalışmada geliştirilen yöntemlerden MLR-p, bir esas iletim yoluna, onunla aynı hat hızına sahip olmak koşulu ile bir yedek iletim yolu atamaktadır. Trafikğin ihtiyacına göre, tek bir ışıkyolu ile istenen iletim kapasitesine erişilemezse, yeter sayıda ışıkyolu kurularak istek karşılanmaktadır. Kurulan ışıkyolları fiziksel olarak aynı yolun farklı dalgaboylarını kullanmaktadırlar. Böylece, Şekil 3.7.a'da da görülebildiği gibi, kurulan esas iletim ışıkyolları sayısında ve aynı hat hızında yedek iletim ışıkyolları kurulmalıdır.



Şekil 3.7. MLR-p ve MLR-l yöntemleri görsel karşılaştırması (Liu et al. 2011b).



Şekil 3.8. MLR-l ve MLR-g yöntemleri görsel karşılaştırması (Liu et al. 2011b).

(Liu et al. 2011b) çalışmasında sunulan MLR-l yönteminde yedek ve esas iletim yollarının aynı hat hızlarına sahip olması zorunluluğu kaldırılmıştır. Bu doğrultuda, bir trafiğe farklı sayıda esas ve yedek iletim ışık yolları ataması yapılabilmektedir. Şekil 3.7.b'deki örnekte de görülebildiği gibi, 80 Gbps iletim ihtiyacına sahip bir trafiğe bir adet 100 Gbps hızında esas iletim ışık yolu (1-2), ve aynı fiziksel yolu kullanan iki adet 40 Gbps hızında yedek iletim ışık yolları (1-3-4-2) tahsis edilmiştir.

Yine (Liu et al. 2011b) çalışmasında sunulan MLR-g yönteminde ise, yedek iletim yolunda trafik tımarlaması yapılması önerilmektedir. Şekil 3.8.a ve Şekil 3.8.b'deki örnek karşılaştırma üzerinden anlatmak gerekirse, 80 Gbps iletim hızı ihtiyacına sahip bir trafik isteği için 1-3-4-2 ve 1-5-4-2 fiziksel yolları üzerinde 40 Gbps hızında iki esas iletim ışık yolu kurulduğu varsayalım. MLR-l yöntemi bu iki ayrı yolu kullanan ışık yolları için aynı fiziksel yolu (1-2) kullansa bile iki ayrı ışık yolu kurmayı zorunlu kılmaktadır. Buna karşılık, MLR-g yöntemi ile, bu iki esas iletim ışık yolu için trafik tımarlaması yöntemi kullanılarak 100 Gbps hızında ortak bir yedek iletim ışık yolu kurulabilmektedir.

(Liu et al. 2011b) çalışmasında statik trafik istekleri için geliştirilen sezgisel yaklaşıma göre, ele alınan trafik isteklerine kaynak atamak için öncelikle sanal

topolojideki atıl kapasiteler incelenmektedir. Bu incelemenin kolaylaştırılması amacıyla, ağda her ışık yolu kurulumu yapıldığında, G_1 adı verilen bir sanal çizge üzerine, yeni kurulan ışık yolunun kaynak-hedef düğüm bilgilerinin yanı sıra, ışık yolu üzerinde atıl kalan kapasite bilgisi de işlenmektedir. Böylece, ilerleyen zamanlarda gelecek trafiklerin öncelikle bu atıl kapasiteler üzerinde trafik tımarlamasına tabi tutulması planlanmaktadır. Uygun kapasitenin G_1 çizgesinde bulunamaması durumunda normal yönlendirme ve ışık yolu kurulumu aşamaları işletilmektedir. Çalışmada varsayılan statik trafik modelinde istekler için hat tutma süresi (h_t) kavramı olmadığından ışık yolu kaldırma işleminden bahsedilmemektedir.

MLR ağlarda kalımlılık sağlamak üzerine yapılan bir başka çalışmada, dalgaboyu devamlılığı kısıtı (*wavelength continuity constraint*) sebebiyle uçtan uca paylaşılan yedek iletim yolu bulmanın zorluğundan bahsedilmektedir (Liu et al. 2011a). Bu çalışmada sunulan çözüm, paylaşılan alt bağlantı koruma (*shared subconnection protection*) yöntemidir. Her trafik ihtiyacı için ışık yollarının kurulumu sırasında, alt-bağlantı parçalarına yedek yol ataması yapılarak, atanan bu yedek yolların başka bağlantılar için de kullanılabilmesini sağlamak amaçlanmaktadır. Alt-bağlantı parçalarının uzunluğu en az tek hat olacaktır. Alt parçaların kısalması o parçanın başka trafikler ile paylaşılması şansını arttırırken, ara düğümlerde birleştirme işlemi için O-E-O çevirim gerekliliğini de arttırmaktadır. Diğer taraftan, alt parçaların uzunlukları artarken iletim materyallerine ihtiyacın azalmasının yanı sıra, o parçanın paylaşılması ihtimali de azalacaktır.

Literatürde çoklu yol atama yöntemini kalımlı MLR ağlar için kullanan bir çalışma (Vadrevu et al. 2012)'de görülmektedir. Yapılan çalışmada kısmi koruma oranı (*partial-protection ratio*) kavramı ele alınmaktadır. Buna göre, bir trafiğe birden çok esas iletim yolu atanırken yedek iletim yolu ataması yapılmamaktadır. Ağda gerçekleşecek herhangi bir hata durumunda %100 kalımlılık sağlamak yerine, servis kalitesi indirgeme (*service degradation*) yaparak çözüm sunulmuştur. Bazı trafik istekleri için, düşük maliyet yakalamak adına indirgenmiş servis sağlanmasının yeterli olduğu ileri sürülmektedir. Bu yöntemle göre, ağın herhangi bir hataya uğraması durumunda, bir trafiğe atanan bant genişliğinin kullanıcının önceden belirlediği oranda azaltılması ile iletimin devam etmesi sağlanmaktadır. Böylece adanmış yedek yol koruması için ödenecek yüksek maliyet azalmaktadır. Çalışmada üç strateji ele alınmaktadır: adanmış kısmi koruma (*dedicated partial protection*), çoklu yol atama tabanlı kısmi koruma (*multipath-based partial*

protection), fazladan kaynak atama yapan çoklu yol atama tabanlı kısmi koruma (*multipath-based partial protection with bandwidth over-provisioning*). Stratejileri örnek üzerinde anlatacak olursak; 100 Gbps bant genişliği ihtiyacı olan bir trafiğin 0.7 kısmi koruma oranı ile korunması durumunda; i. adanmış kısmi koruma yöntemi 100 Gbps esas iletim hattı ve 70 Gbps hat bağımsız yedek yol ataması; ii. çoklu yol atama tabanlı kısmi koruma yöntemi bir 40 Gbps ve iki 30 Gbps hat bağımsız yol ataması; iii. fazladan kaynak atama yapan çoklu yol atama tabanlı kısmi koruma yöntemi ise iki 70 Gbps hat bağımsız yol ataması yapacaktır.

3.6 Sinyal Erişim Mesafesi (*Signal Reach*)

Sinyal erişim mesafesi, bir optik sinyalin, yenilemeye ihtiyaç duymaksızın (*without regenerator*) kalitesi ve bit hata oranı kabul edilemez seviyede düşmeden kat edebileceği en büyük fiziksel uzaklıktır (Varvarigos et al. 2011). Sinyal erişim mesafesini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler arasında, sinyalin atım kuvveti, dalgaboyları arasındaki mesafe, modülasyon formatı, bit hızı, yükseltme (*amplification*) tipi, dağılım (*dispersion*) haritası ve girişim sayılabilmektedir (Varvarigos et al. 2011).

Yüksek iletim hızları, büyük miktarlardaki veriyi daha hızlı gönderebilmeleri sayesinde tercih edilmektedirler. Ancak uzun mesafelerde, yüksek iletim hızlarının kullanılması, yüksek sinyal zayıflaması (*impairment*) sebebiyle kayıplar yaşatmakta ve sinyal yenileyicilerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu sebeple kanal hızının yükseltilmesi, erişim mesafesi ve kapasite arasında bir ikilem oluşturmaktadır. Bu ikilemin değerlendirilmesinde esas alınan ölçüt *optical signal to noise ratio* (OSNR) ve *bit error rate* (BER) gibi sinyal kalitesi ölçütlerinin bulunduğu eşik değerlerdir (Liu et al. 2011a).

MLR ağların kullanıma girmesi ile birlikte etkin iletim mesafesi kavramı da farklı ele alınması gereken bir kavram haline gelmiştir. Belirli bir modülasyon formatı seçildiğinde, yüksek hat hızları için en uzak iletim mesafesinin kısa, düşük hat hızları içinse en uzak iletim mesafesinin nispeten daha uzun olduğu görülmektedir. Bunun sebebi iletim sırasında sinyalin yaşadığı zayıflama miktarıdır. Sinyal modülasyon formatı, ışıkyolunda gönderici tarafında verinin kodlanması için ve alıcı tarafta sinyalin algılanması için kullanılan formattır (Simmons 2008). Aynı modülasyon formatı kullanılırken hat hızının yükseltilmesi çoğu durumda verimli fayda sağlamamaktadır. Bu sebeple çoğu çalışma, farklı hat hızlarını elde edebilmek için fiziksel seviyede farklı modülasyon tekniklerinin

kullanılmasına yönelmektedir (Batayneh et al. 2011; Simmons 2008; Varvarigos et al. 2011). Bu sayede kapasite ve iletim mesafesi arasındaki ödünleşim daha etkin sonuçlar üretmektedir.

Genel eğilim 10 Gbps ve altındaki bit hızlarında *on-off keying* (OOK) formatının kullanılmasıdır. 40 Gbps bit hızında *differential phase-shift keying* (DPSK) ve *differential quadrature phase-shift keying* (DQPSK) formatlarının kullanımı yaygındır. 100 Gbps bit hızı için *Optical Interconnecting Forum* (OIF) tarafından önerilen *dual-polarization quadrature phase-shift keying* (DP-QPSK) formatının kullanımı sahip olduğu avantajlar sebebiyle 40 Gbps bit hızlarında da yaygınlaşmaktadır (Simmons 2008).

MLR ağlarda çalışıldığında, komşu dalga boyları üzerinde, farklı hat hızlarını elde edebilmek için farklı modülasyon formatlarının kullanıldığı çalışmalarda karşılaşılan bir sorun, fiziksel seviyede üretilen sinyaller arasında girişim yaşanmasıdır (Varvarigos et al. 2011). Bu girişim sebebiyle, tekil hat hızlı ağlarda kullanılabilen, bir hat hızı için etkin en uzun erişim mesafesi, MLR ağlarda aynen elde edilememektedir. Aynı fiziksel hattı kullanan farklı hat hızlarındaki diğer sinyallerin modülasyon formatı, bir sinyale ait erişim mesafesini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu gerçek göz önünde tutularak, etkin erişim mesafesinin ağına anki durumu (komşularda kullanılan modülasyon formatları / hat hızları) dikkate alınarak hesaplandığı çalışmalar literatürde görülmektedir (Batayneh et al. 2011; Chowdhury et al. 2011; Rival, Villares, and Morea 2011; Sambo et al. 2011; Varvarigos et al. 2011).

Saydam (*transparent*) ağ tasarımı, uçtan uca trafik, tamamı optik ışık yolları üzerinde, elektronik yenileme (*electronic regeneration*) yapılmaksızın iletilmektedir (Nag and Tornatore 2008). Yarısaydam (*translucent*) ağlarda ise ara düğümlerde OXC elemanları kullanılarak yönlendirme, elektronik yenileme ve bazen dalga boyu dönüşümü yapılabilmektedir (Nag and Tornatore 2009). Yenileyici elemanların kullanım maliyeti, O-E-O çevirim sebebiyle, almaç-göndermeç ögelere göre daha fazla (1.4X) olduğundan, ağlarda kullanılmasından kaçınılmaktadır (Nag and Tornatore 2008). Ancak bazı durumlarda, yüksek bant genişliğine ihtiyaç duyan uzak iki düğüm arasındaki bir trafiğin, nispeten daha uzun erişim mesafesine sahip birden çok düşük hızlı hat üzerinden gönderilmesinden, kısa erişim mesafesine sahip tek bir yüksek hızlı hat üzerinden, yeri etkin bir şekilde seçilmiş yenileyici kullanılarak gönderilmesi daha düşük maliyetle sonuçlanmaktadır (Nag and Tornatore 2009). Maliyetteki bu düşüşü sağlayan sebepler olarak; yüksek hat hızlarına ait almaç-

göndermeçlerin daha etkin maliyete sahip olması -maliyet indirimi- ve yenileyici kullanımı ile yüksek hat hızlarının yaygın olarak atanabilmesi öne sürülmektedir. Böylece yenileyici maliyeti, alman-göndermeç maliyetleri arasındaki fark ile karşılanmakta ve daha ekonomik bir iletim tasarımı ortaya çıkmaktadır (Nag and Tornatore 2009). Ulaşılan bu ekonomik çözümler, ancak etkin yenileyici yerleştirme (*optimal regenerator placement*) probleminden elde edilen sonuçlar ile mümkün olmaktadır.

3.7 Trafik Tımarlama (*Traffic Grooming*)

Trafik tımarlama, altıız (*subrate traffic*) bant genişliği ihtiyacına sahip trafik isteklerinin, yüksek bant genişlikli tek bir optik iletim hattında çoğullanması (*multiplexed*) yoluyla, bir arada iletilmeleri çözümdür (Liu, Tornatore, and Mukherjee 2010). Tımarlama sayesinde yüksek hıza sahip hatların atıl kalan kapasiteleri, küçük bant genişliği ihtiyacı duyan başka trafikler tarafından kullanılmakta ve kaynak kullanımı etkinleşmektedir.

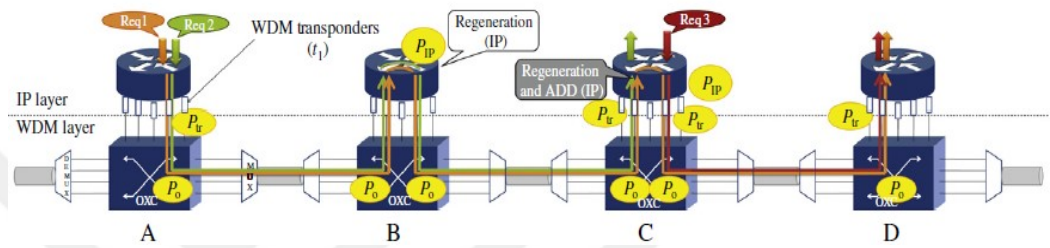
Trafik isteklerinin dalgaboyunun karşılayabildiği hat hızından daha yüksek (*overrate traffic*) olduğu durumlar da mevcut olabilmektedir. Bu durumlarda tersiner çoğullama (*inverse multiplexing-IMUX*) yapılarak trafik sinyalinin birden çok dalgaboyu üzerinden iletilmesi sağlanmaktadır. IMUX işlemi aynı fiziksel yolun farklı dalgaboylarında yapılabildiği gibi farklı fiziksel yollar üzerinden de gerçekleştirilebilmektedir. Farklı yolların kullanıldığı durumda çoklu yol atama (*multipath routing*) olarak adlandırılmaktadır (Simmons 2008). Her iki IMUX yönteminde de veri sinyali gönderici tarafında düşük hızlı sinyallere bölünmekte ve alıcı tarafta tekrar birleştirilerek işleme alınmaktadır. Bu yöntemi mümkün kılan alt yapı, veri trafiğini daha küçük nesne boylarına (*granularity*) bölerek hat kapasitesini daha etkin kullanan, sanal bitleştirme (*virtual concatenation-VCAT*) teknolojisidir (Mukherjee 2006). Çoklu yol atama yönteminin, tekil yol atamaya oranla daha etkin kaynak kullanımı, daha hızlı servis toparlanması ve daha yüksek esneklik sağladığını raporlayan çalışmalar mevcuttur (Huang et al. 2011). Bu yöntem ile karşımıza çıkan kısıtlardan önemli bir tanesi gecikmeler farkı (*differential delay*) kavramıdır. Farklı yollardan iletilen veri parçalarının hedef düğümde tekrar bitleştirilmesi aşamasında, hedef düğüm depo büyüklüğünün kısıt oluşturacağı gerçeğinden yola çıkılarak, alternatif yollarda yaşanan gecikme sürelerinin farkının belirli bir eşik değerin altında kalması istenmektedir. Bu kısıta, gecikmeler farkı kısıtı (*differential delay constraint-DDC*) adı verilmektedir (Huang et al. 2011).

Tımarlama işlemi, sadece uç düğümlerde tımarlama yapılmasına izin veren tek zıplamalı trafik tımarlama (*single hop traffic grooming-SHTG*) ve ara adımlarda tımarlama şansı sunan çok zıplamalı trafik tımarlama (*multi-hop traffic grooming-MHTG*) yöntemleri olarak iki tipte uygulanabilmektedir. SHTG yönteminde bir trafik sadece kendisi ile aynı kaynak-hedef düğümlere sahip trafiklerin ışıkyolları üzerinde tımarlanabilmektedir. Bir trafiğin tüm iletim yolu boyunca sadece bir ışıkyolu kullanmasına izin verilmektedir. Her iki yöntemde de trafik sinyali dijital alanda üretilmekte ve sonlandırılmaktadır. SHTG yönteminin avantajı, iletimin tamamen optik alanda yapılmasına izin vermesi, O-E-O dönüşüm gerektirmemesi ve düşük kontrol karmaşıklığına sahip olmasıdır. Buna karşılık, istenen kaynak-hedef düğüm çifti arasında uçtan uca tek bir ışıkyolunun olmadığı durumlarda, birden çok ardışık ışıkyolundan oluşan uygun bir iletim yolu alternatifinin varlığı incelenmemektedir. Bu sebeple olası bir atıl kapasite değerlendirilememektedir.

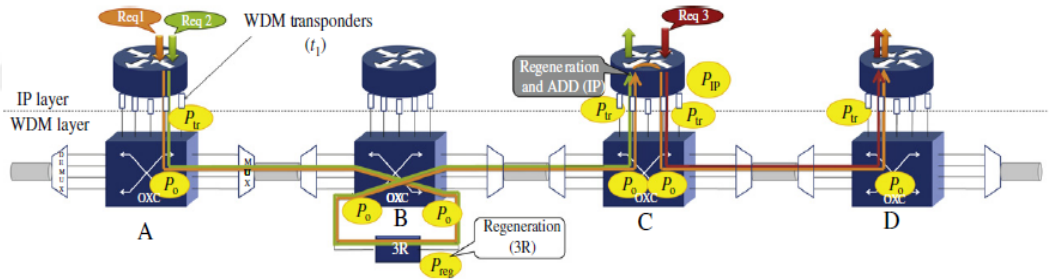
MHTG yönteminde, trafiğin kaynak-hedef düğümleri arasında iletim yolu oluşturacak birden çok ardışık ışıkyolunu kullanması mümkündür. Bir önceki ışıkyolunun son uç düğümü diğer ışıkyolunun ilk uç düğümü olacak şekilde var olan ışıkyollarının atıl kapasiteleri yeni trafik için kullanılmaktadır. Böylece bir ışıkyolu, kaynak-hedef düğümleri farklı olan birden çok trafik tarafından kullanılabilir. Bu yöntemin dezavantajı ise beraberinde tımarlama düğümü bulma problemini de getirmesidir. Aynı yarı saydam ağlardaki yenileyici yerleştirme problemine benzer şekilde, tımarlama düğümü seçimini akılcı yöntemlerle gerçekleştirmek iletim maliyetini düşürecektir. Bu özellikte bir iletim tasarımı yapan çalışma (Wang, Brandt-Pearce, and Subramaniam 2012)'de görülmektedir. Çalışmada, sinyal bozulmalarını temsil etmek için (Batayneh et al. 2011) çalışmasında elde edilen farklı hat hızlarına ait iletim mesafesi limitleri kullanılmaktadır. Yine (Batayneh et al. 2011)'deki yenileyici yerleştirme algoritmasının kullanıldığı çalışmada, yeni bir trafiğe kaynak atanırken öncelikle tımarlama ihtimalleri değerlendirilmekte, daha sonra yeni ışıkyolu kurma seçeneğine gidilmektedir. Uçtan uca tüm trafiğin tımarlanması mümkün olmadığına alt-yollarda tımarlama ihtimalleri araştırılmaktadır. Böylece atıl kapasite kullanımı artırılmakta, trafik reddetme oranı azaltılmaktadır (Wang et al. 2012).

Literatürde MHTG yönteminin uygulanışıyla ilgili farklı yorumlar bulunmaktadır. Bazı çalışmalarda, saydam ağda MHTG yapıldığı görülmektedir (Liu et al. 2011b). Yazarlar, iletişimde yenileyici kullanmadıkları için ağın saydam olduğunu varsaydıklarını öne sürmektedirler. Yine benzer şekilde, çok zıplamalı

tımarlama yapmak için ara düğümlerin IP seviyesine çıkıldığı, bu şekilde farklı trafiklerin tımarlamaya tabi tutulduğu da görülmektedir (Liu et al. 2011b). Şekil 3.9'da yenileyici kullanmadan IP seviyesinde trafik tımarlama yapan bir ağ görülmektedir. Şekil 3.10'da ise yenileyici kullanan sinyal yenileme görülmektedir. Her iki altyapıda da trafik tımarlama işlemi O-E-O dönüşüm sonrası IP katmanında yapılmaktadır (Musumeci, Tornatore, and Pattavina 2012). (Liu et al. 2011b) çalışmasında tımarlama işlemi için bir maliyetin olmadığı varsayılmış ve iletim maliyetinin hesaplanması için sadece almaç-göndermeç maliyetleri göz önünde tutulmuştur.



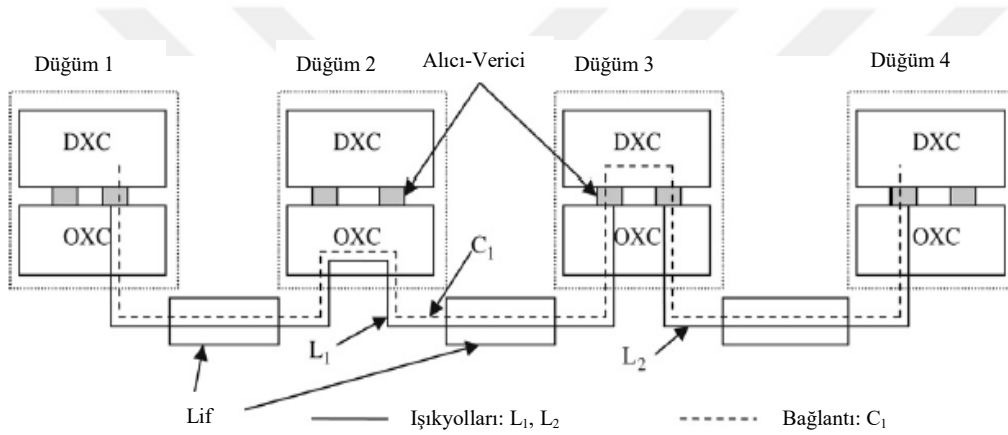
Şekil 3.9. Elektrik alanda tımarlama ve sinyal yenileme yapan altyapı örneği. Optik sinyallerin elektrığe çevrilerek IP katmanında işlenmesi gerekmektedir (Musumeci et al. 2012).



Şekil 3.10. Yenileyici kullanarak sinyal yenileme yapan altyapı örneği. Yenileme yapılması için optik sinyallerin elektrığe çevrilmesi gerekmektedir. Bu işlem için IP yönlendiricileri kullanılmamaktadır. Tımarlama işlemi Şekil 3.9'deki gibidir (Musumeci et al. 2012).

Literatürde sinyal yenileme işlemini elektrik alanda gerçekleştiren (Yao et al. 2009) çalışması yenilemenin yapıldığı düğümlerde trafik tımarlama işlemi de yapmaktadır. Tımarlama yöntemine ait görsel Şekil 3.11'de görülmektedir. Çalışmada, trafik tımarlama problemine, SHTG yöntemiyle ve 3 sabit sıralı çoklu zıplama (*fixed order multi-hop-FOMH*) MHTG yöntemiyle bulunmuş çözümler karşılaştırılmaktadır. Önerilen MHTG yöntemleri, kapsamlı sıralı tımarlama (*exhaustive sequential grooming policy-ES*), kısıtlı zıplamalı tımarlama (*limited-hop sequential-LHS*) ve yük paylaşım (load sharing-LS) tımarlama yöntemleridir. ES yönteminde, seçilen yol üzerindeki tüm tımarlama düğüm kombinasyonları değerlendirilmektedir. H adet düğüme sahip bir yolda 2^{H-1} alternatif görülecektir.

İncelenen kombinasyonlardan bir aday yol iletimi sağlayabilecek hale gelirse bu yol seçilmektedir. LHS yönteminde ES yöntemine benzer şekilde tüm alternatifler, önceden belirlenmiş olan zıplama sayısı kısıtına uygun olacak şekilde incelenmektedir. Örneğin, en fazla 2 zıplamaya izin verildiğinde $C_{H-1}^0 + C_{H-1}^1 = H - 1$ alternatif yol incelenecektir. LS yönteminde ise, trafik ihtiyacı tek bir uçtan uca ışıkyolu tarafından karşılanamıyorsa, alternatif çok zıplamalı yollar arasından bir tanesi rasgele şekilde seçilmektedir. Bu yöntemin dengeli bir yük dağılımı yaptığı düşünülmektedir. Çalışmanın yöntemleri denenirken en fazla zıplama sayısının 2 ve 3 olarak alındığı testler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek engellenen trafik miktarı LS yöntemi ile elde edilmiştir. ES yöntemi, küçük bir farkla LHS yönteminden daha iyi sonuç vermekle beraber, zıplama limiti arttıkça LHS yöntemi ES yönteminin engelleme değerine düşmektedir.



Şekil 3.11. Elektrik alanda tımarlama yapan MHTG örneği. Bağlantı C1 için L1 ve L2 ışıkyollarını kullanan iki zıplamalı tımarlama yapılmıştır (Yao et al. 2009).

(Ou et al. 2003) çalışmasında tımarlama kapı (*grooming port*) sayısı ve dalgaboyu sayısı kısıt olarak ele alınmaktadır. Çalışma, bu iki kısıtın birbirlerine göre ödünleşimlerini incelemek amacıyla yapılmıştır ve önerilen iki koruma yöntemi PAL ile PAC arasında karşılaştırma yapmaktadır. Karşılaştırma ölçütleri olarak engellenen bant genişliği, ışıkyolu kullanım ve dalgaboyu kullanım oranları dikkate alınmaktadır. Bu ölçütlerden engellenen bant genişliği oranı ile dalgaboyu kullanımı oranlarının düşük, ışıkyolu kullanım oranının ise yüksek olması tercih edilen sonuçtur. (Ou et al. 2003)'te PAC yönteminin, karmaşık sinyal kontrolü gerektirmesine rağmen, düşük bant genişliği ihtiyacına sahip trafiklerin sayıca üstün olduğu günümüz ağlarında, tımarlama kapılarının yeterli sayıda olduğu durumlarda, PAL yöntemine göre daha iyi sonuç verdiğini raporlamaktadır.

4. KALIMLI YÖNLENDİRME, DALGABOYU VE HAT HIZI ATAMA (SRRWA) PROBLEMİ

Bu tez çalışması kapsamında üzerinde çalışılan problem, trafik isteklerine optik iletişim ağının anlık durumunu göz önünde bulundurarak servis sağlama problemidir. Fiziksel ağda, yenileyici kullanmayan saydam (*transparent*); 10, 40 ve 100 Gbps hat hızlarını sağlayacak donanıma sahip karma hat hızlı (*mixed line rate-MLR*); dalgaboyu bölüşümlü çoğullamalı (*wavelength division multiplexed-WDM*); çift yönlü iletim (*bidirectional*) yapan fiberlerle ızgara (*mesh*) topolojisine sahip optik ağ benzetimi kullanılmaktadır. Gelen trafik isteğinin bant genişliği göz önünde tutularak, kaynak ve hedef düğümler arasındaki uygun yollar, esas iletim yolu/yolları ve yedek iletim yolu/yolları olarak atanmaktadır. Amaç; kaynak kullanımını en iyileştirerek iletim maliyetini düşürürken ağın kalımlılığını sağlayabilmektir. Problem bu haliyle, karma hat hızlı ağlarda kalımlı yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama (*survivable routing, rate and wavelength assignment-SRRWA*) problemi olarak adlandırılmaktadır.

Çalışmanın amacı geniş omurga ağları için etkin ve düşük maliyetli bir SRRWA yöntemi geliştirmektir. Problemin gerçekleşmesi amacıyla C programlama dili kullanılarak Unix tabanında bir optik ağ benzetim ortamı geliştirilmiştir.

4.1 Semboller ve Terminoloji

Fiziksel ağ topolojisi $G(V, E)$, düğümler (*node*) kümesi $V = \{1..V\}$ ve bu düğümlerin arasındaki kenarlar (*edge*) kümesi E 'den oluşmaktadır. Bir (i, j) kenarı E kümesinin içinde ise $((i, j) \in E)$, $i \in V$ ve $j \in V$ olmak üzere i ve j düğümleri arasında bir fiziksel yol bulunmaktadır.

Sanal topoloji $G'(V', E')$ olmak üzere $V' \subseteq V$ koşulu sağlanmaktadır. Bir (s, d) kenarı E' kümesinin içinde ise $((s, d) \in E')$, $s \in V'$ ve $d \in V'$ olmak üzere s ve d düğümleri arasında bir sanal yol bulunmaktadır.

W Bir hattaki dalgaboyu sayısı

$T = [T_{sd}]$ Trafik istekleri matrisi

$R = \{10, 40, 100\}$ Kullanılan hat hızları (Gbps)

$D = \{1, 2.5, 3.75\}$ Almaç-göndermeç maliyet katsayıları

$L_{ij,k}$ (i, j) düğümleri arasındaki k no.lu ışık yolu

$BER_threshold$ BER eşik değeri

$BER_{ij,k}^l$ $L_{ij,k}$ ışık yolunun r_l hat hızında kurulması sonucu yaşayacağı BER değeri

$\alpha_{ij,k}^l$ $L_{ij,k}$ ışık yolunun r_l hat hızında etkin olup olmadığı

$$\alpha_{ij,k}^l = \begin{cases} 1 & \text{if } BER_{ij,k}^l \leq BER_threshold \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{Liu et al. 2011b}) \quad (1)$$

(Batayneh et al. 2011) çalışmasındaki sonuçlar uygulanarak, bu adım sadece uzaklığa bağlı olarak hesaplanabilir hale getirilmiştir. Buna göre etkin hat hızı seçimi için iletim mesafesi (*transmission range-TR*) parametreleri kullanılmıştır.

$$\alpha_{ij,k}^l = \begin{cases} 1 & \text{if } distance_{ij,k} \leq TR_l \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$TR_{10} = \infty, TR_{40} = 2500 \text{ km}, TR_{100} = 2000 \text{ km}$$

$L_{ij,k}^l$ (i, j) düğümleri arasında kurulmuş r_l hat hızında iletim yapan k no.lu ışık yolu bilgisi

$W_{ij,k}^l = 1$ (i, j) düğümleri arasında kurulmuş r_l hat hızında iletim yapan k no.lu esas ışık yolunun varlığı

$B_{ij,k}^l = 1$ (i, j) düğümleri arasında kurulmuş r_l hat hızında iletim yapan k no.lu yedek ışık yolunun varlığı

$f_{ij,k}^{sd}$ (s, d) kaynak hedef düğümleri arasında servis alırken (i, j) düğümleri arasında kurulmuş k no.lu ışık yolunu kullanan bir bağlantının trafik bilgisi

Kaynak hedef düğümleri (s, d) olan bir bağlantının, (i, j) düğümleri arasında kurulmuş k no.lu ışık yolunda iletim yapması $f_{ij,k}^{sd} \geq 0$ şeklinde gösterilmektedir. Sadece tek zıplamalı (*single hop*) yol kurulumu yapıldığı durumlarda (s, d) ve (i, j)

aynı düğüm ikilisini temsil etmektedir ($s = i, d = j$) ve trafik bilgisi $f_{sd,k}$ olarak gösterilebilmektedir. Ancak çok zıplamalı (*multi hop*) yol kurulumunun da kullanıldığı durumlar için (s, d) ve (i, j) farklı düğüm ikililerini temsil edebilmektedir. Her iki durumu kapsayacak şekilde trafik bilgisi $f_{ij,k}^{sd}$ olarak gösterilmektedir.

Trafik isteği $T_{sd}(B, h_t)$, s - d kaynak-hedef düğümleri arasında B Gbps bant genişliği ihtiyacına sahip h_t birim zaman sürecek bir iletim isteğini temsil etmektedir. Trafiğin bant genişliği (B) ihtiyacı, kullandığı ışıkyolunun kapasitesine denk ise bu trafikler hat hızında trafik (*line rate traffic*) ya da dalgaboyu servisi (*wavelength services*) olarak adlandırılmaktadır. Işıkyolunun hat hızından daha düşük bit hızı isteyen trafikler althız trafikler (*subrate traffic*) olarak anılmaktadır. Nadiren trafik isteklerinin dalgaboyunun karşılayabildiği hat hızından daha yüksek (*overrate traffic*) olduğu durumlar da mevcuttur. Dinamik trafik isteği modelinde hat tutma süresi (*holding time*- h_t) kurulan bağlantının ağda kalacağı süreyi göstermekte, isteğin geliş (a_t) zamanından h_t birim zaman sonra sonlanacağını belirtmektedir. Trafik isteği modelinin statik ya da dinamik artımlı olduğu durumlarda bağlantılar sonlandırılmadığı için h_t süresi kullanılmamaktadır.

4.2 Çözüm Ortamının Desteklemesi Gereken Özellikler

Yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama için göz önünde tutulan özellikler aşağıda listelenmiştir (Liu, Tornatore, and Mukherjee 2011b; Mukherjee 2006; Simmons 2008).

1. Her bir ışıkyolu (*lightpath*), üzerinden geçtiği hatta bir dalgaboyunu (*wavelength*) işgal etmelidir.
2. Bir ışıkyolu, üzerinden geçtiği tüm hatlarda aynı dalgaboyunu kullanmalıdır.
3. Bir ışıkyolu, üzerinden geçtiği tüm hatlarda aynı hat hızını kullanmalıdır.
4. Aynı hattı kullanan ışıkyolları için, toplam ışıkyolu sayısı o hattaki dalgaboyu sayısına eşit ya da daha az olmalıdır.

$$\sum_{L_{ij,k} \in P(m,n)} \sum_l (W_{ij,k}^l + B_{ij,k}^l) \leq W \quad \forall(m, n), \forall(i, j) \quad (3)$$

(Liu et al. 2011b)

$P(m,n)$: m ve n düğümleri arasındaki hattın (l_{mn}) geçen ışık yolları kümesi

5. Bir ışık yolunda tımarlanan (*groomed*) bağlantıların toplam iletim kapasite ihtiyacı, o ışık yolunun iletim kapasitesini aşmamalıdır.

$$\sum_{L_{ij,k}} f_{ij,k} \leq r_{ij,max} \quad \forall(i,j) \quad (4)$$

$r_{ij,max} \cdot \alpha_{ij,k}^l = 1$ uygunluk koşulunu (1) sağlayan en yüksek hat hızı.

6. Aynı hattın geçen iki ışık yolu, birbirinden farklı iki dalga boyu kullanmalıdır.
7. Olabildiğince az kaynak kullanılmalıdır. Maliyeti oluşturan unsurun kullanılan almaç-göndermeç sayısı olduğu düşünülerek, toplamdaki maliyetin düşük tutulması yani kurulacak ışık yolu sayısının yeterli en aza indirilmesi gerekmektedir.

$$\text{Minimize } \sum_{ij} \sum_k \sum_l (W_{ij,k}^l + B_{ij,k}^l) \cdot D_l \quad (\text{Liu et al. 2011b}) \quad (5)$$

8. Fiziksel bir linkin, üzerindeki tüm dalga boyları ile hasara uğraması durumunda bile tüm sanal topoloji iletişime devam edebilmelidir. Kurulan sanal ağ topolojisinin kalımlılığı sağlanmalıdır.
9. Esas iletim yolları birbiri ile en az bir hatta çakışan iki trafik, yedek iletim yollarını paylaşmamalıdır.
10. Kurulan ışık yolları, üzerlerinde bulundukları hatların iletim mesafesi kısıtlarına uygun olarak, BER eşik değerinin (*BER threshold*) aşılmayacağı (*BER constraint*) şekilde, hat hızı atamasına tabi tutulmalıdır.

$$\alpha_{ij,k}^l = \begin{cases} 1 & \text{if } BER_{ij,k}^l \leq BER_threshold \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{Liu et al. 2011b}) \quad (1)$$

11. Tek bir fiber üzerindeki farklı dalga boylarında farklı hat hızlarında iletim yapılabilir.

4.3 Kısıtlar

Yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama için göz önünde tutulan kısıtlar aşağıda listelenmiştir.

1. Dalgaboyu devamlılığı kısıtı (*wavelength continuity constraint*) uyulmalıdır.
2. Hat hızı devamlılığı kısıtına (*line rate continuity constraint*) uyulmalıdır.
3. Dalgaboyu sayısı kısıtına uyulmalıdır.

$$\sum_{L_{ij,k} \in P(m,n)} \sum_l (W_{ij,k}^l + B_{ij,k}^l) \leq W \quad \forall(m,n), \forall(i,j) \quad (3)$$

(Liu et al. 2011b)

$P(m,n)$: m ve n düğümleri arasındaki hattan (l_{mn}) geçen ışık yolları kümesi

4. Hem yedek hem esas trafik için yeterli kapasite olmalıdır.

$$\sum_l r_l \cdot (W_{ij,k}^l + B_{ij,k}^l) \geq 2 \cdot \sum_{sd} f_{ij,k}^{sd} \quad \forall(i,j), k \quad (6)$$

(Liu et al. 2011b)

4.4 Hedefler

Yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama için göz önünde tutulan hedefler aşağıda listelenmiştir.

1. Kullanılan almanç-göndermeç maliyetini en aza indirmek.

$$\text{Minimize } \sum_{ij} \sum_k \sum_l (W_{ij,k}^l + B_{ij,k}^l) \cdot D_l \quad (\text{Liu et al. 2011b}) \quad (5)$$

2. Atıl kapasite miktarını en aza indirmek.

$$\text{Minimize } \sum_{ij} \sum_k \sum_l r_l \cdot (W_{ij,k}^l + B_{ij,k}^l) - 2 \cdot \sum_{sd} f_{ij,k}^{sd} \quad (7)$$

3. Engellenen trafik miktarını en aza indirmek.

4.5 Özellikler ve Varsayımlar

Çalışmada kullanılan ağın ve benzetim ortamının özellikleri hakkındaki varsayımlar aşağıda listelendiği gibidir.

1. Üzerinde çalışılan ağ, yenileyici kullanılmayan saydam bir iletim ağıdır.
2. Kullanılabilir hat hızları 10, 40 ve 100 Gbps'dir.
3. Farklı hat hızlarına ait almaç-göndermeç maliyetleri Çizelge 3.1'de listelendiği gibi kullanılmıştır.
4. Trafik istekleri farklı çalışma bölümlerinde farklı modellerle ele alınmıştır. Dinamik, dinamik artımlı ve statik trafik modelleri üzerinde çalışılmış ve tek zamanda tek istek ele alınacak şekilde servis sağlanmıştır. İlk çalışmalarda trafik istekleri matrisi üzerinden isteklere ait bilgilere erişilmektedir. Son çalışmalarda ise Poisson dağılımına uygun zaman aralıklarıyla gelen dinamik trafik istekleri ile çalışılmıştır. Bir trafik isteğine hem esas hem yedek iletim yolları kurduktan sonra sıradaki trafik isteği beklenmektedir.
5. Trafik isteklerinin hat tutma süreleri üstel dağılıma uygun olarak üretilmektedir.
6. Trafik isteklerinin bant genişliği ihtiyaçları üniform dağılıma uygun olarak üretilmektedir.
7. Aynı kaynak-hedef düğümleri arasında iletim yapacak iki trafiğin bant genişliği ihtiyaçları, istenen düğüm çifti arasında kurulacak tek bir ışık yolu tarafından karşılanabilecek durumda ise, bu iki trafik, bir ışık yolu üzerinde tımarlanabilmektedir (*traffic grooming*). Çalışmada hem tek zıplamalı hem de çok zıplamalı trafik tımarlama yöntemleri kullanılabilmektedir.
8. Bir trafik isteğine ait bant genişliği ihtiyacı, kaynak-hedef düğümler arasında kurulacak tek bir ışık yolu ile sağlanamayacak kadar büyük ise, trafik parçalara bölünerek (IMUX) aynı fiziksel yol üzerinde birden çok ışık yolu ile servis edilebilmektedir.

9. Bir trafik isteği, kaynak-hedef düğümler arasında uçtan uca kurulacak bir ışıkyolu ile karşılanamadığı ya da uçtan uca tek bir ışıkyolu kurulamadığı durumlarda çok zıplamalı yol kurulumu yapılabilir.
10. Kalımlılık sağlamak için adanmış yol koruma ve paylaşılan yol koruma yöntemleri kullanılabilir.
11. Bağlantı bazında (PAC) ve ışıkyolu bazında (PAL) koruma yöntemleri kullanılabilir.
12. Tüm hatlar çift yönlü iletim yapan fiberlerden oluşmaktadır.
13. Her düğüm, desteklenen tüm farklı hat hızlarını karşılayacak yeterli sayıda almaç-göndermeçe sahiptir.

4.6 Performans Ölçütleri

Maliyet değerlendirmesi için Eşitlik (5)'te görülen fonksiyon ile toplam almaç-göndermeç maliyetleri hesaplanmıştır. Maliyet, tüm ağ trafiği için kurulan esas ve yedek iletim ışıkyolları sayısı üzerinden hesaplanmaktadır. Her ışıkyoluna ait maliyet katsayısı, o dalgaboyunun taşıdığı hat hızını işleyen almaç-göndermeç maliyeti ile oranlandırılmıştır. Maliyetin düşük olması istenen bir durumdur.

$$\mathbf{MALİYET} = \sum_{ij} \sum_k \sum_l (W_{ij,k}^l + B_{ij,k}^l) \cdot D_l \quad (\text{Liu et al. 2011b}) \quad (5)$$

Maliyetin bir başka değerlendirilme şekli bağlantı başına düşen iletim maliyetini ya da birim trafik başına düşen iletim maliyetini hesaplamak olabilir. Böylece kullanılan yöntem ile tasarlanan iletim ortamının birim bazda ortalama maliyeti elde edilerek trafik yoğunluğundan bağımsız olarak diğer yönlendirme algoritmaları ile performans karşılaştırması yapılabilir. Toplam maliyetin servis sağlanan bağlantı sayısına bölünmesi ile bağlantı başına düşen iletim maliyeti hesaplayabileceği gibi, yine toplam maliyeti servis sağlanan trafik miktarına (b/s cinsinden) bölerek birim trafik başına düşen iletim maliyeti hesaplanabilmektedir.

Engellenen bant genişliği (*bandwidth blocking ratio*-BBR) değerlendirmesi Eşitlik (8)'de görülen fonksiyon kullanılarak yapılmaktadır. BBR değerinin düşük olması istenen bir durumdur.

$$BBR = \frac{\text{Reddilen Trafiklere ait Bant Genişliği}}{\text{Servis Sağlanan Trafiklere ait Bant Genişliği}} \text{ (b/s cinsinden)} \quad (8)$$

Çalışmada kullanılan bir başka ölçüt ışık yolu kullanım oranıdır. Ağda kurulmuş ışık yollarının kullanılan kapasite oranını gösteren bu ölçüt (*lightpath utilization ratio*-LUR), kaynak kullanım performansına dair bilgi vermektedir. Işık yolu kullanım oranını hesaplamak için Eşitlik (9)'da görülen fonksiyon kullanılmaktadır. Işık yolu kullanım oranının yüksek olması istenen bir durumdur.

$$LUR = \frac{\text{Işık yolu hat hızı} - \text{Işık yolundaki atıl kapasite}}{\text{Işık yolu hat hızı}} \quad (9)$$

Bir P yoluna ait kullanım değeri ($path_usage_P$) son çalışmalarda kullanılan bir ölçüttür. En az kullanılan yolu seç (*least used path first*-LU) yaklaşımının kullanıldığı senaryolarda uygun alternatif kaynaklar arasından kullanım değeri en düşük olan yolun seçilerek trafiğe ataması yapılmaktadır. Yol kullanım değeri Eşitlik (10)'da görülen fonksiyon ile hesaplanmaktadır. Bir ij hattının kullanım değeri ($link_usage_{ij}$), ij düğümleri arasındaki hatta kullanımda olan dalgaboyu sayısını temsil etmektedir. Bir P yolunun ij düğümleri arasındaki hattı kullanması koşulu ile, P yolunun kullanım değeri, üzerinden geçtiği tüm hatlar arasında en çok dolu dalgaboyuna sahip hattın -dar boğaz oluşturan hat- kullanım değerine eşittir.

$$path_usage_P = \max\{\forall (ij \in P) link_usage_{ij}\} \quad (10)$$

Paylaşım kapasite kazanımı (*sharing capacity gain ratio*-SGR), paylaşılan yedek yol korumasının getirdiği kapasite kazanımının ölçülmesi için oluşturulan bir ölçüttür. SGR, yedek iletim yolunda paylaşım yapan bağlantıların toplam yedek iletim ihtiyaçları kapasitesini ($total_DP_capacity$) hesaplar ve tüm ışık yolları üzerindeki paylaşılan toplam yedek iletim kapasitesi ($total_SP_capacity$) ile farklarını karşılaştırır. Dikkat edilmesi gereken nokta, yedek yolunda paylaşım yapmayan, adanmış koruma kullanan bağlantıların bu hesaplamanın dışında tutulmasıdır. Böylece paylaşılan yedek yol koruma kullanılmasının kazandırdığı kapasite oranı hesaplanabilmektedir. SGR oranı hesaplaması Eşitlik (11) ile yapılmaktadır. Paylaşım kapasite kazanımı oranının yüksek olması istenen bir durumdur.

$$SGR = \frac{\text{Paylaşım yapan bağ.toplam yedek ilt.kap.ihtiyacı} - \text{paylaşılan yedek ilt.kap.}}{\text{Paylaşım yapan bağlantıların toplam yedek iletim kapasitesi ihtiyacı}} \quad (11)$$

4.7 Kullanılan Alt Algoritmalar

Çalışma kapsamında geliştirilen, kalımlı yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama problemi iki ayrık süreçte ele alınmaktadır. Ara adımlarda ihtiyaç duyulan verilerin elde edilebilmesi için bir dizi alt algoritma kullanılmaktadır. Çevrim dışı olarak gerçekleştirilen ilk etap ağ kaynaklarını keşfetmek amacıyla gerçekleştirilir. Ağın tüm düğüm ikilileri arasındaki alternatif yolları bulan ve bu yolların etkin en yüksek hat hızlarını hesaplayan algoritmalar çalışmaktadır. Ağ kaynaklarının önceden keşfedilmesi, trafik isteklerine atanabilecek alternatif kaynakları tararken her seferinde aynı yol arama işlemlerinin yapılmasını önlemektedir.

Çevrimiçi olan ikinci etapta ise her bir trafik isteğini karşılamak için birinci etapta oluşturulan bilgilerden faydalanıp, bu kaynakların uygunluk durumlarına göre seçim yapan yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama algoritmaları çalışmaktadır. Kalımlılık sağlayabilmek için, her isteğe bir iletim yolu atamasının yanı sıra hata oluştuğunda kullanılmak üzere bir yedek yol ataması da yapılmaktadır. Bir trafik isteğine atanan esas ve yedek iletim yolları birbirlerinden hat ayrık olmalıdırlar. Bu kurala uyan yolların hızlı tespiti için, birinci etapta gerçekleştirilen ön işlem büyük avantaj sağlamaktadır.

Bu bölümde çevrim dışı etapta ağ yapısını incelemek ve yolların karşılayabildikleri hat hızlarını belirlemek için kullanılan alt algoritmalar tanıtılmaktadır. Benzetimlerde kullanılmak üzere tasarlanan trafik üreticine ve zamanlayıcıya ait yapılar ile benzetimlerde kullanılan parametreler yine bu bölüm altında tanıtılmaktadır.

4.7.1. $K \geq 2$ Hat Ayrık Yollar

Çevrimdışı etabın ilk alt algoritması fiziksel topolojiyi incelemekte ve tüm (s, d) kaynak-hedef düğüm çiftleri arasında hat ayrık alternatif yolları içeren bir tablo oluşturmaktadır. Problem çözümünün doğası gereği kalımlı bir iletim ortamı sağlayabilmek için, biri esas iletim yolu olarak biri de yedek iletim yolu olarak kullanılmak üzere en az iki ayrık yola ihtiyaç duyulmaktadır.

Alternatif yolların bulunabilmesi için (Bhandari 1999) çalışmasında yer alan algoritmanın değiştirilmiş bir versiyonu olan K ($K \geq 2$) hat-ayrık en kısa yollar (K edge-disjoint shortest path) algoritması kodlanmıştır. Yöntem uyarınca, her düğüm çifti için ağ incelenmekte ve aralarındaki en kısa yollar *Dijkstra* en kısa yol

algoritması (Dijkstra 1959) kullanılarak bulunmaktadır. Seçilen bir düğüm çifti için K hat-ayrık en kısa yollar algoritması çalışırken, Dijkstra algoritmasının her işleyişi sonucu bulunan yeni yol tabloya eklenmekte ve bu yolun kullandığı tüm hatlar geçici çizge üzerinde ağdan çıkarılmaktadır. Üzerinde çalışılan düğüm ikilisi için yeni bir yol bulunamayınca dek, yani geçici çizgede düğüm çifti kopuk hale gelene dek Dijkstra algoritması tekrar çalıştırılarak tüm yollar keşfedilmektedir. Geçici çizge, her düğüm ikilisi için tarama işleminin başlangıcında, gerçek fiziksel çizge ile birebir aynı olacak şekilde ilklenir. Her yeni yol bulunduğunda, bu yolun kullandığı hatlar geçici çizgeden çıkarılarak yeni yol arama işlemi yine geçici çizge üzerinden devam ettirilir. Yönteme ait taslak kod Algoritma 1’de görülebilmektedir.

Algoritma 1 K ($k \geq 2$) hat-ayrık en kısa yollar algoritması

verilen. Ağ komşuluk matrisi(adjacency_matrix), düğüm sayısı(#nodes)
çıktılar. Tüm düğüm ikilileri arasındaki hat ayrık yollar listesi (shortest_paths[s][d][][])

```

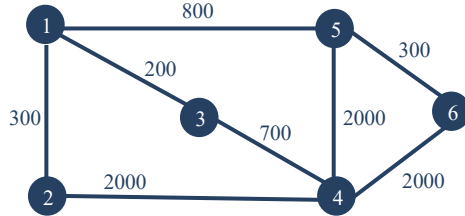
1  for (s=1; s<=#nodes; s++)
2      for (d=1; d<=#nodes; d++)
3          if (s == d) continue
4          copy_matrix(adjacency_matrix, temp_adj_matrix)
5          sp_index=0
6          while(1)
7              new_path_hopcount=
8                  dijkstra(physical_topology, temp_adj_mat, s, d, &new_shortest_path)
9              if (new_path_hopcount <= 0) break
10             shortest_paths[s][d][++ sp_index][] = new_shortest_path
11             modify_graph(temp_adj_mat, new_shortest_path)
12         end while
13     end for
14 end for

```

K hat-ayrık en kısa yollar algoritması ağdaki tüm düğüm ikilileri için çalıştıktan sonra ışık yolu adayı olacak hat-ayrık tüm yollar bulunmuş olacaktır. Tüm ikililer için bulunan en kısa yollar shortest_path_matrice[s][d][][] matrisinde, daha sonra yönlendirme yapılırken kullanılmak üzere saklanırlar.

Literatürde sıklıkla kullanımına rastlanan bu yönteme alternatif olarak, (Liu et al. 2011b) çalışmasında, bir düğüm çifti için ışık yolu adayları aranırken tek tek yolları değerlendirmek yerine yol ikilileri bazında değerlendirme yapıldığı görülmektedir. Bu şekilde bulunan kendi aralarında hat ayrık olan çiftlerden biri esas diğeri yedek iletim için kullanılabilir. Böylece tüm aday yolların birbirlerinden hat ayrık olmalarını sağlamak yerine ikililer halinde ayrık yol kümeleri oluşturulmaktadır.

Algoritmanın temsili için Şekil 4.1’de görülen 6 düğümlü örnek ağ üzerinden örnek verilebilir. Hatlar üzerindeki rakamlar km cinsinden hat uzunluklarını belirtmektedir. K ($k \geq 2$) hat-ayrık en kısa yollar algoritmasının örnek ağ üzerinde çalıştırılması sonucu Çizelge 4.1’de yol sütununda görülen hat-ayrık en kısa yollar kümesi elde edilecektir.



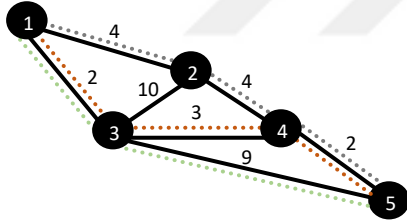
Şekil 4.1. 6 düğümlü örnek iletim ağı (Liu et al. 2011b).

İki düğüm arasında ayrık yollar bulunması problemi, hat-ayrık yollar problemine dönüştürülerek çözülmektedir. Bunun sebebi, optik ağlarda yaygın olarak tekil hat arızası ile karşılaşılmasıdır. Ağ yönlendirme, yenileme, almaç-göndermeç, vb. cihazların yedekli olarak kullanılması sebebiyle düğüm arızaları sıklıkla görülmemektedir. Buna rağmen, ayrık yol problemi, düğüm-ayrık yollar problemi olarak da ele alınabilmektedir. Bu şekilde yapılan tasarımlarda elde edilen düğüm-ayrık yollar, aynı zamanda hat-ayrık yollar olacaktır. Ancak tersi bir durumdan söz edilememektedir.

Kullanılan bu yöntemin bir dezavantajı bulunmaktadır. Hat-ayrık yollar kümesinin olabildiğince geniş olması, hem çoklu yol atama (*multipath provisioning*) problemine çözümde, hem de kalımlılık sağlamak için yedek yol seçiminde kolaylık sağlamaktadır. Ancak, ayrık yol bulma işleminde ilk bulunan yol, bulunabilecek toplam ayrık yol sayısını azaltabilmektedir. Bir örnek vermek gerekirse, Şekil 4.2’de, hatlar üzerinde uzunlukları verilmiş olan ağırlıklı çizgede (*weighted graph*), 1 ve 5 düğümleri arasındaki en kısa yolun 1 3 4 5 yolu olduğu düşünülürse; hat-ayrık en kısa yollar kümesine bu yol eklendiğinde, iki uç düğüm arasında kurulabilecek 1 3 5 ve 1 2 4 5 yollarının listeye eklenmesi engellenmiş olacaktır. Bulunması engellenen iki yol, ilk bulunan yoldan daha uzun olsa da düğüm çifti arasında iki ayrık yol bulunmasını sağladığından problem çözümüne hizmet etmektedir.

Çizelge 4.1. 6 düğümlü örnek ağda hat-ayrık en kısa yollar ve etkin hat hızları listelerinden bir kesit.

(s-d)	Yol	Uzunluk (km)	Etkin Hat Hızları (Gbps)
1-2	1 2	300	100 / 40 / 10
1-2	1 3 4 2	2900	10
1-3	1 3	200	100 / 40 / 10
1-3	1 2 4 3	3000	10
1-4	1 3 4	900	100 / 40 / 10
1-4	1 2 4	2300	40 / 10
1-4	1 5 4	2800	10
1-5	1 5	800	100 / 40 / 10
1-5	1 3 4 5	2900	10
1-5	1 2 4 6 5	4600	10
1-6	1 5 6	1100	100 / 40 / 10
1-6	1 3 4 6	2900	10
2-1	2 1	300	100 / 40 / 10
2-1	2 4 3 1	2900	10
2-3	2 1 3	500	100 / 40 / 10
2-3	2 4 3	2700	10
2-4	2 1 3 4	1200	100 / 40 / 10
2-4	2 4	2000	100 / 40 / 10
2-5	2 1 5	1100	100 / 40 / 10
2-5	2 4 5	4000	10
2-6	2 1 5 6	1400	100 / 40 / 10
2-6	2 4 6	4000	10
3-1	3 1	200	100 / 40 / 10
3-1	3 4 2 1	3000	10
3-2	3 1 2	500	100 / 40 / 10
3-2	3 4 2	2700	10
3-4	3 4	700	100 / 40 / 10
3-4	3 1 2 4	2500	40 / 10
3-5	3 1 5	1000	100 / 40 / 10
3-5	3 4 5	2700	10
3-6	3 1 5 6	1300	100 / 40 / 10
3-6	3 4 6	2700	10
4-1	4 3 1	900	100 / 40 / 10
4-1	4 2 1	2300	40 / 10
...			



Şekil 4.2. Hat ayırık en kısa yollar algoritmasının dezavantajını görmek için kullanılan örnek ağ.

4.7.2. Tüm Yalın Yollar

İletim ağındaki (s, d) düğüm ikilileri arasındaki alternatif yolların tespiti için bir başka yöntem tüm yalın yolların (*all-simple paths*) bulunmasıdır. Yalın yol (*simple path*) içinde herhangi bir düğümün tekrar ziyaret edilmediği yol olarak tanımlanmaktadır (Black and Pieterse 2008). Yalın yolların listelenmesi sırasında hat ayırık olma özelliği aranmamaktadır.

Tüm yalın yolların bulunması için geliştirilen algoritmada, sıg öncelikli arama (*breadth first search-BFS*) yöntemi probleme uyarlanmıştır. Başlangıç s düğümünden itibaren sıg öncelik mantığı ile komşular gezilerek bir ağaç (*tree*) yapısı oluşturulmaktadır. Bir düğüm ağacın birden çok dalında yer alabilir. Bu

yoluna atanan kaynaklarla hat ayırık olup olmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 4.2. 6 düğümlü örnek ağda tüm yalın yollar ve etkin hat hızları listelerinden bir kesit.

(s-d)	Yol	Uzunluk (km)	Etkin Hat Hızları (Gbps)
1-2	1 5 6 4 2	5100	10
1-2	1 5 4 2	4800	10
1-2	1 3 4 2	2900	10
1-2	1 2	300	100 / 40 / 10
1-3	1 5 6 4 3	3800	10
1-3	1 5 4 3	3500	10
1-3	1 2 4 3	3000	10
1-3	1 3	200	100 / 40 / 10
1-4	1 5 6 4	3100	10
1-4	1 5 4	2800	10
1-4	1 3 4	900	100 / 40 / 10
1-4	1 2 4	2300	40 / 10
1-5	1 3 4 6 5	3200	10
1-5	1 2 4 6 5	4600	10
1-5	1 3 4 5	2900	10
1-5	1 2 4 5	4300	10
1-5	1 5	800	100 / 40 / 10
1-6	1 3 4 5 6	3200	10
1-6	1 2 4 5 6	4600	10
1-6	1 5 4 6	4800	10
1-6	1 3 4 6	2900	10
1-6	1 2 4 6	4300	10
1-6	1 5 6	1100	100 / 40 / 10
2-1	2 4 6 5 1	5100	10
2-1	2 4 5 1	4800	10
2-1	2 4 3 1	2900	10
2-1	2 1	300	100 / 40 / 10
2-3	2 4 6 5 1 3	5300	10
2-3	2 1 5 6 4 3	4100	10
2-3	2 4 5 1 3	5000	10
2-3	2 1 5 4 3	3800	10
2-3	2 4 3	2700	10
2-3	2 1 3	500	100 / 40 / 10
...			

4.7.3. Etkin Hat Hızı Atama

Bir hat hızını kullanarak iletim yapılabilen en uzak etkin mesafeyi etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan bazıları: sinyalin atım kuvveti, modülasyon formatı, bit hızı, yükseltme (*amplification*) tipi, dağılım (*dispersion*) haritası, diğer sinyallerin yarattığı girişimdir (Varvarigos et al. 2011). MLR özelliğine sahip ağlar üzerinde çalışılırken, bunlara ek olarak girişim faktörü de değerlendirilmelidir. Bir fiberin farklı dalgaboylarını kullanan farklı modülasyon formatlarına sahip sinyaller, birbirleri üzerinde girişim yaratmaktadırlar. Bu sebeple etkin iletim mesafesi hesaplanırken, tüm hat hızları için sinyal zayıflaması ve girişim farkındalıklı çalışmalar yapılmalıdır. (Batayneh et al. 2011) çalışmasında, sinyalin veri hızı, modülasyon formatı ve ağda var olan trafik gibi birçok değişkenden etkilenen fiziksel sinyal zayıflamasının, iletim mesafesi kısıtı olarak temsil edilebileceği gösterilmektedir. Literatürde, hat hızlarının, bozunmasız (*without degradation*) olarak kat edebildikleri fiziksel iletim mesafelerine dair başka

çalışmalar da görülmektedir (Chowdhury et al. 2011; Mukherjee 2011; Vadrevu et al. 2012). Farklı çalışmalarda iletim mesafesi ile ilgili farklı değerlere rastlanmaktadır. Bunun başlıca sebebi, gerçek ortamlarda kurulan farklı test koşullarında farklı modülasyon tekniklerinin, farklı almaç-göndermeç ürünlerinin, vb. kullanılmasıdır.

Bu tez kapsamında, problemin karmaşıklığını azaltmak için sinyal zayıflaması yolun fiziksel uzunluğuna bağlı olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışmalarda, farklı hat hızları için etkin en uzak iletim mesafeleri, sinyal zayıflaması ve girişim farkındalıklı (Batayneh et al. 2011) çalışmasında önerilen ve (Wang et al. 2012) çalışmasında kullanılan şekilde varsayılmaktadır. Buna göre; 100 Gbps bir sinyalin etkin iletim mesafesi 2000 km iken 40 Gbps için 2500 km olarak kullanılmıştır. 10 Gbps hıza sahip bir sinyalin ise mesafe kısıtı yaşamaksızın iletim yapabildiği varsayılmıştır.

Bu varsayımlar ışığında, çevrimdışı etabın ikinci aşamasında, yolların fiziksel uzunluğuna bağlı olarak geliştirilen sezgisel yaklaşım ile tüm ışık yolu adaylarının karşılayabilecekleri etkin en yüksek hat hızları belirlenmektedir. Daha sonra trafik isteklerinin yönlendirilmesi aşamasında, gelen trafik isteklerinin kaynak-hedef düğümleri arasında uygun ışık yolu aranırken, karşılanabilecek hat hızı yeniden hesaplanmak yerine bir listeden bakma işlemine dönüştüğü için çözüm karmaşıklığı azaltılmıştır. Şekil 4.1'deki örnek iletim ağına ait, hat-ayrık yollar kümesindeki ışık yolu adaylarının karşılayabilecekleri etkin hat hızları Çizelge 4.1'deki etkin hat hızları sütununda görülebilmektedir. Yine benzer şekilde Şekil 4.1'deki örnek iletim ağına ait, yalın yollar kümesindeki ışık yolu adaylarının karşılayabilecekleri etkin hat hızları Çizelge 4.2'deki etkin hat hızları sütununda görülebilmektedir.

İletim ağları için ışık yollarına etkin en yüksek hat hızı atama algoritmasına ait taslak kod Algoritma 3'te görülebilmektedir. Hat hızı atamada kullanılan sezgisel yaklaşım oldukça basit olmasına karşın bu şekilde elde edilen sonuçlar, (Liu et al. 2011b) çalışması ile büyük oranda yakınlık göstermektedir. Diğer yandan hat hızı atama işlemi yönlendirme işleminden ayrı olarak ele alındığı için algoritmanın bütününe ait karmaşıklık da düşürülmüştür.

Çevrimdışı etaptan sonra, her yeni iletim isteği, s - d kaynak-hedef düğümleri arasında B Gbps bant genişliği ihtiyacına sahip h_t birim zaman sürecek $T_{sd}(B, h_t)$ ağa geldiğinde, hazırlanan kaynak bilgilerine bakılarak yönlendirme işlemi yapılacaktır. s - d arasındaki uygun aday yollar esas iletim ve yedek iletim yolları

olarak atanmak üzere incelemeye alınacaktır. Kaynakların çevrimdışı olarak önceden bulunup listelenmesi bu adımı basitleşmiş bir tablo okuma haline getirmektedir. Diğer yandan hat hızı atama işlemi yönlendirme işleminden ayrı olarak ele alındığı için algoritmanın bütününe ait karmaşıklık da düşürülmüştür.

Algoritma 3 Etkin en yüksek hat hızı atama algoritması

verilen. Işıkyolunun uzunluğu (length *km*), ağ tipi (SLR/MLR), hat hızları erişim mesafeleri
TRANSMISSION_RANGE_40=2500km; TRANSMISSION_RANGE_100=2000km

çıktılar. Işıkyolunun etkin en yüksek hat hızı

```

1  if (network_type == MLR)
2      if (length > TRANSMISSION_RANGE_40) return 10
3      else if (length > TRANSMISSION_RANGE_100) return 40
4      else return 100
5  else if (network_type == SLR10) return 10
6  else if (network_type == SLR40)
7      if (length > TRANSMISSION_RANGE_40) return 0
8      else return 40
9  else if (network_type == SLR100)
10     if (length > TRANSMISSION_RANGE_100) return 0
11     else return 100
12 end if

```

4.7.4. Trafik Üretici

İlk çalışmalarda, test senaryoları hazırlanırken trafik istekleri literatürden alınan bir matris üzerinden okunmakta ve rasgele sıralanmaları ile benzetimlerin trafik bilgisi oluşturulmaktaydı. Dinamik ve dinamik artımlı trafik modellerinde ardışık isteklerin geliş aralıkları rasgele olarak sistemi bekleterek oluşturulmaktaydı. Dinamik trafik modelinde bağlantıların hat tutma süreleri ise üretilen bir matris üzerinden okunarak belirlenmekteydi. Son çalışmalarda ise, dinamik trafik isteklerinin geliş aralıkları, hat tutma süreleri ve bant genişliği ihtiyaçlarının seçilen istatistiki modellere göre belirlenmektedir.

Literatürde (Cinkler et al. 2013; Shen, Wei, and Bose 2014; Xavier et al. 2016) yaygın olarak kabul gören bu yaklaşıma uyularak, dinamik ve dinamik artımlı trafik modellerinde istek geliş aralıkları Poisson dağılımına uygun olacak şekilde birim zamanda r istek üretilmesi sağlanmıştır. İki trafik isteğinin geliş zamanları arasındaki süre farkını $(a_t - a_{t-1})$ hesaplamak için Eşitlik (12) kullanılmıştır.

$$a_t - a_{t-1} = -\log f(1.0 - rand() / RAND_MAX + 1) / r \quad (\text{Presching 2011}) \quad (12)$$

Trafik isteklerine ait bant genişliği (B) ihtiyaçlarının üniform dağılıma uygun olarak üretilmesi için Eşitlik (13) kullanılmıştır.

$$B = (\text{rand}() \% (\text{rangeHigh} - \text{rangeLow} + 1)) + \text{rangeLow} \quad (13)$$

Dinamik trafik modelinde bağlantıların hat tutma (h_t) sürelerinin ortalama $1/m$ birim zaman sürerek üstel dağılıma uygun şekilde oluşturulması için iki adımlı Eşitlik (14.1) ve (14.2) çifti kullanılmıştır.

$$u = (\text{rand}() \% (\text{rangeHigh} - \text{rangeLow} + 1)) + \text{rangeLow} \quad (14.1)$$

$$h_t = \frac{\log(1 - u)}{(-1/m)} \quad (14.2)$$

Eşitlik (13) ve (14.1) aynı yapıya sahip olsa da u ve B değişkenlerinin birbirinden bağımsızlıklarını vurgulamak için ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Geliştirilen algoritmaya bu modellerin eklenmesi ile bir senaryo için farklı ağlarda, farklı trafik istekleri ile aynı konfigürasyonlara sahip çok sayıda testin gerçekleştirilmesi mümkün olmuştur. Böylece bir senaryonun sonucu için yapılan tüm testlerin sonuçları ortak olarak ele alınmakta ve değerlendirmelerde veriye görelilikten uzaklaşmaktadır.

Birim zamanda ortalama r adet istek üretilen ve her birinin ortalama $1/m$ birim zaman sürdüğü sistemde, birim zamandaki yük miktarı Erlang cinsinden r/m olarak hesaplanmaktadır.

4.7.5. Zaman Boyutu

Tez kapsamında ilk çalışmalarda dinamik artımlı trafik modeli üzerinde çalışılmıştı. Gelen trafik isteklerinin hat tutma süreleri göz ardı edilmiş, kurulan bağlantıların hiç kesilmeden devam ettikleri varsayılmıştı. Sonraki çalışmalarda benzetim ortamına zaman boyutunu eklenmesi ile trafik modeli dinamik hale getirilmiştir. Bu amaçla C dilinin <signal.h> kütüphanesinde tanımlı alarm() yapısı kullanılmıştır. Tüm algoritmanın içinde alarm ve signal kullanımına ait taslak kod Ek.3'teki Algoritma 4'te görülmektedir. Değişkenlerden time_line[][] zaman eksenini, timer_counter ise zaman sayacını temsil etmektedir. timer_counter değerinin artması zaman ekseninde ilerlemeye karşılık gelmektedir.

timer_stop değişkeni ise zaman biriminin (dakika, saniye, vs.) başlangıç ucunu temsil etmektedir.

Simülasyonun başlangıcında time_line[][] içeriği boş, timer_counter değeri ise sıfırdır. Alarm 2 saniyede bir sinyal verecek şekilde ayarlanmıştır. Her sinyal geldiğinde timer_stop değeri 1'e eşitlenir ve mutex kontrolü ile aynı anda birden fazla kullanıcının erişimine kapalı tutulan timer_counter değeri bir birim arttırılır. Aynı yerde, her zaman biriminin başında time_line[timer_counter][0] değeri kontrol edilerek hat tutma süresi sona eren bağlantı sayısı kontrol edilmektedir. Aynı zaman diliminde biten birden çok bağlantı olabileceği için bu değişken bir liste tutmaktadır. Ana algoritma akışında, biten bağlantıların silinmesi için time_line[timer_counter][i] listesi connections_tbr[] listesine aktarılır.

Normal çalışma akışı içinde, her yeni trafik isteği geldiğinde, algoritma bir zaman biriminin başında olup olmadığını kontrol eder. Her zaman biriminin başında öncelikle varsa kaldırılacak bağlantılara ayrılan kaynaklar boşa çıkarılarak ağ temizlenir. Böylece kaynak kullanımını optimize edilmektedir. Bir bağlantıyı silmek için remove_connection() fonksiyonu çağrılır. Fonksiyon içinde, silinecek bağlantıya atanmış yedek ve esas tüm ışık yollarından o bağlantıya atanan kapasiteler boşa çıkarılır. Ayrıca bağlantı, kullandığı ışık yollarının geçtiği yollardaki tüm linklerden silinir. Böylece SRG listeleri de temizlenmiş olur. Eğer üzerinde işlem yapılan bu ışık yolları arasında, bu bağlantı dışında başka bir aktif bağlantı tarafından kullanılmayan ışık yolları varsa o ışık yolları sanal ağdan çıkarılır.

Bağlantı silme işlemleri yapıldıktan sonra, yeni gelen trafik isteğine kaynak taraması ve ataması yapılmaktadır. Eğer gelen trafik isteğine yönlendirme yapılabilirse, bağlantının bitiş zamanı time_line[f_t][i] üzerine kaydedilmektedir. Burada f_t indisi, trafiğe servis sağlanan zaman ile hat tutma süresinin toplanması (f_t = timer_counter + h_t) ile elde edilen bağlantı sonlanma zamanıdır.

Benzetimler, başlangıçta belirlenen bir süre (N_MAX_DURATION) sonunda toplam iletim maliyeti, ışık yolu kullanımı, BBR değerleri gibi bilgiler hesaplanarak sona erdirilmektedir.

4.7.6. Parametreler

Tez kapsamında geliştirilen algoritmalar aşağıda listelenen özellikleri desteklemektedir. Yapılan tüm çalışmalarda bu parametrelerin uygun olarak seçilmesi ile test senaryoları oluşturulmuştur.

-hat_tutma_süresi (-holding_time) değerleri:

Herhangi bir integer değer (ör. 20, .., 55, vb.)

-dinamik_hat_hızı_atama (-dynamic_line_rate_assignment) değerleri:

1: statik hat hızı atama yöntemi

2: dinamik hat hızı atama yöntemi

-hat_hızı (-line_rate) değerleri:

1: en düşük hat hızı (RM) atama yöntemi

2: mümkün en yüksek hat hızı (MG) atama yöntemi

3: second pass (SP) hat hızı atama yöntemi

4: öğrenme mekanizmalı second pass (SP+L) hat hızı atama yöntemi

5: öğrenen second pass (SPL) hat hızı atama yöntemi

6: optimal kaynak (OPT) atama yöntemi

-ağ_tipi (-network_type) değerleri:

1: MLR

10: SLR 10 Gbps

40: SLR 40 Gbps

100: SLR 100 Gbps

-yedekleme (-backup) değerleri:

1: adanmış yedek koruma yöntemi

2: paylaşılan yedek koruma yöntemi

5. SRRWA PROBLEMİNE OPTİMAL KAYNAK ATAMA (OPT) ÇÖZÜMÜ

Bu çalışmada geliştirilen algoritma, kalımlı yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama (*survivable routing, rate and wavelength assignment-SRRWA*) probleminde kaynak seçimi aşamasına çözüm önermektedir. SRRWA problemi iki ayrık süreçte ele alınmaktadır. İlk etapta çevrimdışı olarak ağ kaynakları keşfedilmektedir. Ağ kaynaklarının önceden keşfedilmesi, trafik isteklerine atanabilecek alternatif kaynakları tararken her seferinde aynı yol arama işlemlerinin yapılmasını önlemektedir.

İkinci etapta ise çevrimiçi olarak, dinamik trafik isteklerine servis sağlamak için uygun kaynak atamaları yapılmaktadır. Kalımlılık sağlayabilmek için, her isteğe bir iletim kaynağı atamasının yanı sıra hata oluştuğunda kullanılmak üzere yedek kaynak ataması da yapılmaktadır. Trafik isteğine atanan kaynak ışık yoludur.

Bu bölümde SRRWA probleminde kaynak seçimi aşamasına çözüm olacak *optimal kaynak atama* (OPT) yöntemi anlatılmaktadır (Algin and Tunalı 2017a). Yöntemin yapısı ve problem çözümündeki yeri ışık yolu bazında (*protection at lighpath-PAL*) paylaşılan yedek yol koruma (*shared backup path protection-SB*) yöntemi kullanan SRRWA algoritması üzerinde sunulmaktadır. SRRWA algoritmasının bütününe ait taslak kod Algoritma 5’te görülmektedir.

OPT yöntemi hem iletim maliyetini düşürmek hem de yedek yol paylaşım etkinliğini arttırmak için çeşitli parametrelerde alternatifleri değerlendirmektedir. Ele alınan tüm parametreler ve seçimlerin yöntem sonuçlarına etkileri yine bu bölüm altında ele alınmaktadır.

5.1 SRRWA Algoritması Ve Optimal Kaynak Atama (OPT) Yöntemi

Algoritmanın çevrimdışı gerçekleştirilen ilk etabında, iletim ağındaki tüm düğüm ikilileri arasındaki alternatif yolların tespiti yapılmakta ve bulunan yolların etkin en yüksek hat hızları hesaplanmaktadır.

Çevrimdışı etabın ilk adımında, ağıdaki düğüm ikilileri ($s-d$) arasındaki alternatif yolların tespitini yapmak için, çalışmanın farklı versiyonlarında $k \geq 2$ hat ayrık alternatif yollar (K edge-disjoint shortest path) ve tüm yalın yollar (*all-simple paths*) yöntemleri kullanılmaktadır. İki yöntemin birbirlerine göre avantajları

mevcuttur. $K \geq 2$ hat ayırık alternatif yollar yöntemi kullanıldığında, listelenen tüm yolların birbirlerinden hat ayırık olması garantilenmektedir. Bu özellik kalımlılık amacıyla yedek yol taraması yapılmasını kolaylaştırmaktadır. Diğer yandan tüm yalın yollar yöntemiyle, hat ayırık olma özelliği aranmadığı için daha fazla sayıda yol listelenmekte ve tüm ağ kaynaklarının kullanıma açılması sağlanmaktadır. Bu durumda yedek yol aranırken, hat ayrıklık kontrolü yapılması gerekmektedir.

Algoritma 5 SRRWA algoritması

verilen. $T_{sd}(B, h_t)$ trafik isteği, ağda var olan s - d arası ışık yolları (lightpaths[s][d][[]])

çktılar. Uygun ışık yolunun hat hızının artırılması

çevrimdışı etap

```
1  foreach (sd çifti) {
2      s-d arasındaki tüm yalın yolları keşfet
3      bulunan tüm yalın yollar için etkin hat hızlarını hesapla
4  }
```

çevrimiçi etap

```
5  while (yeni trafik isteği  $T_{sd}(B, h_t)$  mevcut)
6  {
7      if (sd arasında yol ikilisi yoksa)
8          isteği reddet; continue.
9      SHTG: sd ışık yollarından uygun kapasite  $\geq B$  olanları keşfet.
10     MHTG: uygun kapasite  $\geq B$  olacak şekilde  $s$  ve  $d$  arasında sanal yol kuran ardışık
        ışık yollarını keşfet.
11     SHnew: uçtan uca bir boş dalgaboyu bulunduran  $sd$  yollarını keşfet, yolun uzunluğu
        seçilen hat hızının TR değeri ile kısıtlı olmalıdır.
12     MHnew:  $s$  ve  $d$  arasında sanal yol kuran ardışık alt-yolları keşfet. Her alt-yolun uç
        düğümleri arasında uçtan uca boş bir dalgaboyu bulunmalıdır. Her alt-yolun uzunluğu o
        alt-yol için seçilen hat hızının TR değeri ile kısıtlı olmalıdır.
13     if (esas iletim için kaynak yok)
14         isteği reddet; continue.
15     optimum performansa sahip alternatif yolu (OPT) esas iletim kaynağı olarak ata.
16     foreach (isteğe atanan her  $i$ - $j$  esas iletim yolu için)
17     { //bu esas iletim ışık yolu ile hat-ayırık olan yolları keşfet.
18         SHSB: paylaşım kapasitesi  $\geq B$  olan  $i$ - $j$  ışık yollarını keşfet.
19         MHSB: paylaşım kapasite  $\geq B$  olacak şekilde  $i$  ve  $j$  arasında sanal yol oluşturan ardışık
            ışık yollarını keşfet.
20         SHTG:  $ij$  ışık yollarından uygun kapasite  $\geq B$  olanları keşfet
21         MHTG: uygun kapasite  $\geq B$  olacak şekilde  $i$  ve  $j$  arasında sanal yol kuran ardışık
            ışık yollarını keşfet.
22         SHnew: uçtan uca bir boş dalgaboyu bulunduran  $ij$  yollarını keşfet, yolun uzunluğu
            seçilen hat hızının TR değeri ile kısıtlı olmalıdır.
23         MHnew:  $i$  ve  $j$  arasında sanal yol kuran ardışık alt-yolları keşfet. Her alt-yolun uç
            düğümleri arasında uçtan uca boş bir dalgaboyu bulunmalıdır. Her alt-yolun uzunluğu
            o alt-yol için seçilen hat hızının TR değeri ile kısıtlı olmalıdır.
24         if (yedek iletim için kaynak yok)
25             isteği reddet; tüm atanan kaynakları boş duruma getir; continue.
26         optimum performansa sahip alternatif yolu (OPT) yedek iletim kaynağı olarak ata.
27     } // yedek yol kurulumu sonu.
28 } // yol kurulumu sonu.
```

Algoritmanın çevrimdışı etabının ikinci adımında, fiziksel uzunluğa bağlı olarak geliştirilen sezgisel bir yaklaşım ile, daha önce listelenen alternatif yolların,

karşılayabilecekleri etkin en yüksek hat hızları belirlenmektedir. (Batayneh et al. 2011) çalışmasında, sinyalin veri hızı, modülasyon formatı ve ağda var olan trafik gibi birçok değişkenden etkilenen fiziksel sinyal zayıflamasının, iletim mesafesi kısıtı olarak temsil edilebileceği gösterilmektedir. Bu çalışmada da (Batayneh et al. 2011) çalışmasının sonuçları kullanılarak, tüm hat hızları için sinyal zayıflaması ve girişim farkındalıklı etkin iletim mesafesi değerleri kullanılmaktadır. Buna göre yapılan benzetimlerde; 100 Gbps bir sinyalin etkin iletim mesafesi 2000 km iken 40 Gbps için 2500 km olarak kabul edilmiştir. 10 Gbps hızda bir sinyalin ise mesafe kısıtı yaşamaksızın iletim yaptığı varsayılmaktadır. Bir yolun fiziksel uzunluğundan büyük ya da eşit iletim mesafesine sahip olan en yüksek hat hızı, o yolun etkin en yüksek hat hızı olarak değerlendirilmektedir. Tüm düğümlerde, her hat hızı için yeterli sayıda almaç-göndermeç olduğu varsayılmaktadır. Bu şekilde donanım sayısı kısıtı probleminden çıkarılarak basitleşmesi sağlanmıştır.

Çevrimdışı etabın çıktıları ağ kaynakları hakkında detaylı bilgiyi oluşturmakta ve dinamik olarak kaynak ararken her seferinde aynı yol arama işlemlerinin yapılmasını önleyerek kolaylık sağlamaktadır. Çevrimdışı etabın alt algoritmalarına ait detaylar bölüm 4.7.1, 4.7.2 ve 4.7.3'te anlatılmaktadır.

Algoritmanın çevrimiçi etabında, $T_{sd}(B, h_t)$ trafik isteklerine servis sağlamak için uygun kaynak atamaları yapılmaktadır. $T_{sd}(B, h_t)$ trafik isteği, s - d kaynak-hedef düğümleri arasında B Gbps bant genişliği ihtiyacına sahip h_t birim zaman sürecek bir iletim isteğini temsil etmektedir. Trafik, bant genişliği (B) ihtiyacına göre, hat hızında trafik (*line rate traffic*) ya da althız trafik (*subrate traffic*) olarak anılmaktadır. Trafik istekleri dalgaboyunun karşılayabildiği hat hızından daha yüksek ihtiyaca (*overrate traffic*) da sahip olabilmektedir. Dinamik trafik isteği modelinde hat tutma süresi (h_t) kurulan bağlantının ağda kalacağı süreyi göstermektedir. Tüm trafik istekleri geliş zamanlarına göre teker teker ele alınmaktadır. Her bir trafik isteği için öncelikle, ihtiyacını karşılayabilecek sayıda ve kapasitede esas iletim ışık yolları aranmaktadır. Bulunan uygun kaynaklardan optimal performansa sahip olanı trafiğe esas iletim yolu olarak atanmaktadır.

Her bir trafik isteği için kaynak ataması yapılırken, alternatif kaynakların performans değerlendirmesi çok hedefli bir en iyileme (*multi objective optimization*) stratejisi ile yapılmaktadır. Strateji *optimal kaynak atama* (OPT) yöntemi olarak adlandırılmıştır. Yöntemin geliştirilmesindeki motivasyon, kaynakların performansını değerlendirmede kullanılan ölçütlerin önceliklerini ihtiyaca göre değiştirebilmek ve kaynak alternatifleri arasından amaca en uygun

olanı seçebilmektir. OPT yönteminin kullandığı değerlendirme ölçütleri, i. kaynağın kullandığı yol kurma yöntemi, ii. kaynağın kullanılan dalgaboyu sayısı, iii. iletim maliyeti, iv. hat hızı, v. IMUX durumunda kurulan ışık yolu sayısıdır. Yöntem çok seviyeli bir en iyileme (*multi-level optimization*) formundadır. İlk seviyede yol seçme yaklaşımına; ikinci seviyede ise yol kurma yöntemleri öncelik sıralamasına göre karar verilmektedir. Her alt seviyede, sadece bir üst seviyenin koşullarını sağlayan alternatifler değerlendirmeye alınmaktadır. Böylece tüm seviyelerin önceliklerinin korunması garantilenmektedir. Her ölçütün sonuca etki katsayısı, tasarım sırasında ihtiyaca göre düzenlenebilmektedir. OPT yöntemi, iletim ağının o anki durumuna bakarak, kaynak hedef düğümler arasında dinamik olarak yol seçimi yaptığı için, bir uyarlamalı yönlendirme (*adaptive routing*) algoritmasıdır. Dalgaboyu atama alt problemi için, literatürde sıklıkla karşılaşılan düşük karmaşıklığa sahip ilk uygun (*first fit*-FF) dalgaboyu atama stratejisi (Zang et al. 2000) kullanılmaktadır.

Çevrimiçi etabın bir sonraki aşamasında, trafiğin kalımlılığını sağlamak için, atanan her bir esas iletim ışık yoluna kendisinden hat ayırık, geri dönmeli (*reverting*), ışık yolu bazında (PAL), m:n, paylaşılan ya da adanmış yedek iletim yolları taranmaktadır. Bulunan uygun kaynaklardan optimal performansa sahip olanı trafiğe yedek iletim yolu olarak atanmaktadır. PAL yaklaşımının kullanılması ile, trafik isteğinin kaynak hedef düğümleri arasında uçtan uca ışık yolu kurma kısıtı ortadan kalktığı için, hem bağlantı hem de alt bağlantı (*subconnection*) bazında koruma sağlanması mümkün hale gelmektedir. Alt bağlantı bazında yedek yolların paylaşılma ihtimalinin daha yüksek olduğu literatürde desteklenen bir bilgidir (Liu, Tornatore, and Mukherjee 2013). Koruma yönteminin m:n yapıda olması, bir esas iletim ışık yolunun birden çok yedek iletim ışık yolu ile korunabilmesine olanak sağlarken, tam tersi, bir yedek ışık yolunun birden çok esas iletim ışık yoluna koruma sağlamasına da olanak vermektedir (Liu et al. 2011b).

Paylaşılan yedek yol korumasının kullanılması ile, yedeklemeye ayrılan ve normal iletişimde atıl kalan kapasite miktarı azaltılmakta, genel kaynak kullanımı iyileştirilmektedir. Ancak bir yedek yolun paylaşılabilmesi için, korunmakta olan esas iletim kaynaklarının (hatlar, yollar, alt yollar, vb.) birbirlerinden hat ayırık olmaları gerekmektedir (Ou and Mukherjee 2005). Bu kısıdın sertliği sebebiyle paylaşılacak bir yedek yol bulunamazsa, trafik isteklerine PAL adanmış yol koruma yöntemi ile yedek yol atanmaktadır. Bu durumda esas iletim kapasitesine eşik bir kapasite trafik isteğinin yedek iletimi için ayrılmaktadır.

Kurulacak yedek iletim ışıkyolları için alternatif yollar taraması, esas iletim yolu için yapılan tarama ile aynı prosedürleri izlemektedir. Bu aşamadaki bir farklılık; yedek iletim yolu için kullanılacak fiziksel yolun, kalımlılığı sağlanacak esas iletim ışıkyolunun kullandığı fiziksel yoldan hat ayrık olması gerekliliğidir. Hem esas hem de yedek iletim kaynakları, uçtan uca ya da çok zıplamalı olarak, var olan ışıkyolları üzerinde tımarlama yoluyla oluşturulabileceği gibi yeni ışıkyolu kurulumu ile de sağlanabilmektedir. Bir isteği karşılayabilecek esas ve yedek iletim yolları kurulamazsa o istek reddedilmektedir.

Statik trafik modeli için çalışan versiyonlarda çevrimiçi etap farklı çalışmaktadır. Yine bir zamanda tek trafik isteği ele alınırken, tüm trafik isteklerine esas iletim yolları atandıktan sonra hepsine teker teker yedek iletim yolları aranmaktadır. Kurulan esas iletim ışıkyollarına tek tek ya da kurulan bağlantılara tek tek PAL/PAC yedek iletim yolları atanmaktadır.

Kalımlılığı sağlamak adına, PAL yöntemi yerine, trafik isteği için kurulan bağlantının bütününe de yedek yol taraması yapılabilmektedir. Bu durumda trafiğin uç düğümleri arasında uçtan uca ya da çok zıplamalı bir yedek iletim (PAC) yolu kurulmasına çalışılacaktır. Bu çalışma kapsamında PAL yöntemi kullanılırken, PAC yöntemi de uygun bir alternatif olarak görülmektedir.

5.2 Yol Seçme Sezgisel Yaklaşımları

Alternatif yollar arasında yapılan seçim, o anda işlenen trafik isteğini etkilediği kadar, ağın genelini de maliyet ve kaynak kullanımı anlamlarında etkilemektedir. Yol seçimi aşamasındaki amaç, o anki trafik isteğine uygun kaynakları atamanın yanı sıra ilerleyen zamanlarda gelebilecek trafik istekleri için de mümkün olduğunca boş kaynak bırakmak olmalıdır. Akılcı olmayan yol seçimleri anlık iletim maliyetini arttıracak gibi erken kaynak tükenmesine, trafik engellemelerine ve yedek yolların paylaşım ihtimalinde düşüşe de sebep olacaktır.

Bu çalışmada, yol seçimi konusunun etkilerini gözlemlemek için iki sezgisel yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, uygun kaynaklar arasından en az kullanılan (*least used path first-LU*) seçen yaklaşımdır. LU yaklaşımı, alternatif kaynaklar arasından, üzerindeki kullanılan dalgaboyu sayısı en az olana öncelik vermektedir. Bu yöntemin yük dengelemede (*load balancing*) akılcı bir yaklaşım olacağı ve yedek yolu paylaşım ihtimalini arttıracak düşünülmemektedir. Bir yolun kullanım değeri (*path_usage_p*), o yol üzerindeki en çok kullanılan hattın kullanım

değerine eşit olarak alınmaktadır. Eşitlik (10)'da da görüldüğü gibi bu hesaplamada yol üzerinde dar boğaz olan hat baz alınmış olmaktadır. Bir ij hattının kullanım değeri ($link_usage_{ij}$), o hattın kullanımda olan ($busy$) dalgaboyu sayısı olarak tanımlanmaktadır.

İkinci yol seçimi yaklaşımı, en düşük maliyete (*least cost path first-LC*) sahip alternatif kaynağı seçen yaklaşımdır. Eşitlik (15)'de görüldüğü üzere, bir yolun iletim maliyeti ($communication_cost_p$), yolun kurulması için gerekli ışık yolları tarafından kullanılan tüm almaç-göndermeçlerin toplam maliyeti olarak hesaplanmaktadır. LC yaklaşımının amacı, her bir yolun kurulum aşamasında maliyetini düşürerek ağı toplam maliyetini en aza indirmektir.

$$communication_cost_p = \sum_{ij \in P} \sum_k \sum_l W_{ij,k}^l \cdot D_l \quad (15)$$

Her iki yaklaşım için, ağı iletim maliyeti Eşitlik (5)'te görüldüğü gibi, esas ($W_{ij,k}^l$) ve yedek ($B_{ij,k}^l$) iletim için kurulan tüm ışık yollarında kullanılan almaç-göndermeçlerin toplam maliyeti olarak hesaplanmaktadır.

5.3 Yol Kurma Yöntemleri

Bir $T_{sd}(B, h_t)$ trafik isteğine servis sağlarken kullanılabilecek yol kurma yöntemleri tek (SHTG) ve çok zıplamalı (MHTG) trafik tımarlama; ve tek (SHnew) ve çok zıplamalı (MHnew) yeni yol kurulumu yöntemleridir. Trafik tımarlama işleminin yapılabilmesi için, ($s-d$) kaynak hedef düğümleri arasında iletim kanalı oluşturabilecek ışık yollarının üzerindeki atıl kapasitenin, trafik isteğinin bant genişliği ihtiyacını (B) karşılayabilecek büyüklükte olması gerekmektedir. Uçtan uca tek bir ışık yolu üzerinde SHTG en ideal yol kurma seçeneği olarak değerlendirilmektedir. Bir diğer tımarlama yöntemi ise, ($s-d$) düğümleri arasında kurulmuş ardışık ışık yolları üzerinde MHTG yöntemidir. Tımarlama marifetiyle yapılan kaynak atamalar ek bir almaç-göndermeç kullanımı gerektirmediği için bu adayların maliyeti sıfır olarak varsayılmaktadır.

Dalgaboyu devamlılığı kısıtı (*wavelength continuity constraint*) sebebiyle, yeni bir ışık yolu kurmak için, istenen düğüm çifti arasında, üzerinde bir dalgaboyunun uçtan uca boş olduğu bir yolun bulunması gerekmektedir. ($s-d$) kaynak hedef düğümleri arasında uçtan uca bu kısıtı sağlayan bir yol bulunabilirse SHnew yapılabilir. Bu amaçla, düğüm çifti arasındaki alternatif yollar kümesinden, trafiğin bant genişliği (B) kısıdına (*rate constraint*) uyabilecek ve

üzerinde uçtan uca kullanılmayan dalgaboyu mevcut yollar incelenmektedir. İnceleme km cinsinden en kısa yoldan başlayarak en uzun yola doğru yapılmaktadır. Böylece en yüksek hat hızının kullanılabileceği alternatiflerin önce taranması sağlanmaktadır. Bir ışık yolunun kurulumunda hangi hat hızının kullanılacağına, farklı etmenlere bağlı olarak farklı yöntemlerle (Algin and Tunali 2015) karar verilebilse de genellikle en fazla tımarlama ihtimalinin oluşturulabilmesi için en yüksek hat hızlarının kullanılması tercih edilmektedir. Trafik isteğine atanabilecek uygun yollarda isteği karşılayacak bant genişliği sağlanamıyorsa, trafik isteği parçalara bölünerek (IMUX) aynı fiziksel yolun farklı dalgaboylarını kullanacak birden çok ışık yolu üzerinden iletim sağlanabilmektedir. Bu yöntemle bulunan aday yolların maliyeti hesaplanırken kullanılan almaç-göndermeçlerin çalıştıkları hat hızına göre maliyetleri (bkz. Çizelge 3.1) toplanmaktadır. IMUX özelliği kullanılmışsa trafiğe atanan dalgaboyu sayısı kadar almaç-göndermeç kullanıldığı için bu durum maliyet hesaplamasına eklenmektedir. Maliyet hesaplama denklemi Eşitlik (5)'in bir kısmını oluşturan $\sum_k \sum_l W_{sd,k}^l \cdot D_l$ şeklindedir.

Kaynak – hedef düğümleri arasında uçtan uca yeterli dalgaboyunun bulunmaması ya da istenen hat hızında yeni bir ışık yolu kurulamaması vb. durumlarda, $(s-d)$ düğüm çifti arasında, ardışık ışık yolları kurulup, sanal olarak birleştirilerek MHnew yapılabilir. Ardışık ışık yollarının aynı dalgaboyunu kullanması ya da aynı hat hızında çalışması gibi kısıtlar yoktur. Böylece daha esnek servis sağlama yeteneği oluşmaktadır. Bu çalışmada, kurulacak MH yeni ışık yolları dizisinin üzerinden geçeceği fiziksel yolun tespiti için, $s-d$ düğümleri arasındaki km cinsinden en uzun yoldan tarama yapmaya başlanmaktadır. Bu sezgisel yaklaşımın sebebi, daha kısa yolları tek zıplamalı ışık yolu kurulumu için saklanmaya teşvik etmektir.

MHnew yönteminde iletim maliyeti hesaplanırken, her ara düğümde kullanılan almaç-göndermeçlerin çalıştıkları hat hızına göre maliyetleri (bkz. Çizelge 3.1) toplanmaktadır. MHnew yönteminde yine IMUX özelliği kullanılabilmektedir. IMUX yapılan ışık yollarında trafiğe atanan dalgaboyu sayısı kadar almaç-göndermeç kullanıldığı için bu durum maliyet hesaplamasına da eklenecektir. Maliyet hesaplama denklemi yine Eşitlik (5)'in bir kısmını oluşturan $\sum_{ij} \sum_k \sum_l W_{ij,k}^l \cdot D_l$ şeklindedir.

Bir trafik isteğine yedek iletim yolu taraması yapılırken, esas iletim yolları için kullanılabilen kaynaklara ek olarak, daha önce kurulmuş yedek iletim

ışık yollarından paylaşılabilir durumda olanlar da incelenmektedir. Bir yedek iletim yolunun birden çok bağlantı tarafından paylaşılabilmesi için, o bağlantılara atanmış esas iletim yollarının birbirlerinden hat ayırık olmaları gerekmektedir (Simmons 2008). Bu kısıt sağlandığı sürece iki veya daha fazla bağlantı aynı ışık yolu kapasitesini kendilerine yedek iletim yolu olarak belirleyebilmektedir. Kaynak-hedef düğümleri arasında uçtan uca tek zıplamalı paylaşılan yedek yol (*single hop shared backup-SHSB*) kullanılabildiği gibi, ardışık ışık yolları üzerinde çok zıplamalı paylaşılan yedek yol (*multi hop shared backup-MHSB*) alternatifi de mümkündür. SHTG ve MHTG yöntemlerine benzer şekilde, var olan yedek iletim ışık yollarının paylaşımına ayrılan kapasiteleri, yeni trafik isteğinin yedek iletim isteğine yeterli düzeyde ise bu ışık yolları üzerinde paylaşılan yedek yol koruması uygulanabilmektedir. Yedek yolun paylaşılması durumunda yapılan kaynak atamalar, ek bir almaç-göndermeç kullanımı gerektirmediği için bu adayların maliyeti sıfır olarak varsayılmaktadır. Ancak literatürde karşılaşılan bir uygulama, paylaşılan yedek yol adaylarını maliyetsiz olarak ele almak yerine, azaltılmış (ör. %50) bir maliyet ataması yapılmasıdır (Simmons 2008). Böylece algoritmayı, paylaşılabilir kaynakları seçmeye yöneltirken, gereğinden çok uzun yolların seçilmesine de bir yaptırım uygulanmış olmaktadır.

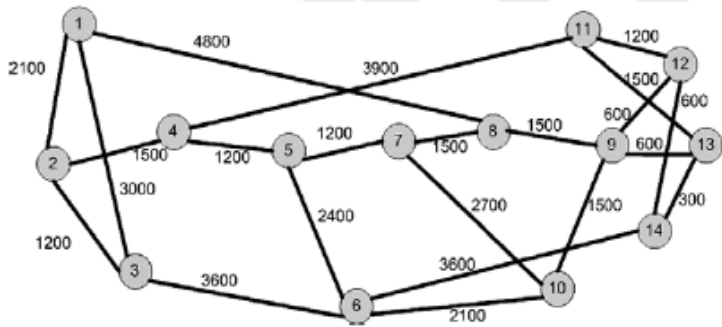
Bir kaynak atanırken, yol kurma yöntemlerinin seçilme öncelikleri tasarım aşamasında ağın ya da trafik isteklerinin yapısına göre düzenlenebilmektedir. Bu düzenleme yönlendirme algoritmasının performansını etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında, oluşturulan bir dizi senaryo ile yol kurma yöntemlerinin seçilme önceliklerinin yönlendirmeye etkileri incelenmiştir. Senaryolarda SHTG, MHTG, SHnew ve MHnew yöntemlerinin seçilme öncelikleri değiştirilmiş, SHSB ve MHSB yöntemlerinin ise mümkün oldukları tüm durumlarda en yüksek öncelikte seçilmeleri sağlanmıştır. Yol kurma ve yol seçme yaklaşımlarını bir arada ele alan benzetim sonuçları ve yorumları ilerleyen bölümde anlatılmaktadır.

5.4 Yol Kurma ve Yol Seçme Yöntemlerinin Yönlendirme Performansına Etkileri

Yol kurma ve yol seçme yöntemlerinin yönlendirme performansına etkilerini gözlemlemek için, OPT kaynak atama ve paylaşılan PAL yedek yol koruma yöntemlerini kullanan SRRWA algoritması üzerinde bir dizi test senaryosu oluşturulmuştur (Algin and Tunali 2017a). Senaryolarda, yol kurma yöntemlerinden SHTG, MHTG, SHnew ve MHnew yöntemlerinin seçilme öncelikleri değiştirilmiş, SHSB ve MHSB yöntemlerinin ise mümkün oldukları tüm

durumlarda en yüksek öncelikte seçilmeleri sağlanmıştır. Yol seçme yöntemleri olarak LU ve LC yaklaşımları senaryolara eklenmiştir.

Öncelikle, LU yaklaşımı kullanılarak, SHTG, MHTG, SHnew, ve MHnew yol kurma yöntemlerinin tüm öncelik sıralamalarını barındıran 24 senaryo hazırlanmıştır. Senaryolarda kullanılan ağ Şekil 5.1’de görülen 14 düğümlü 22 hatlı NSF ağıdır. Hatlar üzerindeki sayılar km cinsinden hat uzunluklarını vermektedir. Her senaryo için, toplamı yaklaşık 10 Tbps olan, 500-1100 Erlang yük aralığında tüm düğüm çiftleri arasında dengeli olarak dağıtılmış dinamik trafik istekleri üretilmiştir. İsteklerin bant genişliği ihtiyacı üniform dağılıma uygun olacak şekilde 1-10 Gbps aralığında oluşturulmuştur. Trafik istekleri, Poisson dağılımına uygun olarak birim zamanda ortalama 20 istek oluşacak şekilde üretilmiştir. İsteklere ait hat tutma süreleri, üstel dağılıma uygun olarak ortalama 25-55 birim zaman aralığında olacak şekilde ayarlanmıştır. Senaryoların Erlang cinsinden yük miktarını ayarlama için ortalama hat tutma süresi parametresi ile oynanmıştır. Her senaryo ellişer kez tekrar çalıştırılmış ve ortalama sonuçları raporlanmıştır.



Şekil 5.1. 12 düğümlü NSF ağı (Liu et al. 2011a).

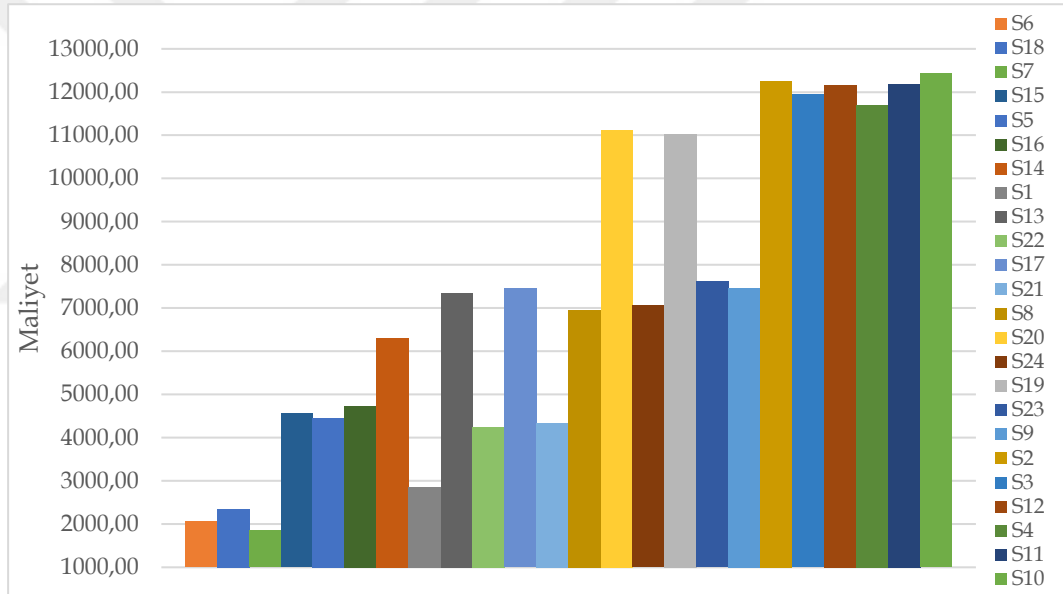
Oluşturulan 24 senaryodaki yöntem öncelik dizilimleri Çizelge 5.1’de görülmektedir. Tüm senaryolar 500 Erlang ila 1100 Erlang arasında trafik yükleri ile tekrarlanmış ve tüm yüklerde senaryoların 3 performans grubu altında toplandıkları görülmüştür. Grupların her yükte aynı senaryolardan oluştuğu, grup içi senaryo dizilimlerinin ise yaklaşık olarak aynı olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında, gösterim kolaylığı da olması amacıyla, performans karşılaştırmaları 700 Erlang yük ile gerçekleştirilen senaryo sonuçları kullanılarak yapılacaktır. Şekil 5.2’de senaryolara ait iletim maliyetleri, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te sırasıyla BBR ve LUR değerleri görülmektedir.

Şekiller ve çizelge üzerinde senaryolar S1’den S24’e kısaltmalarla temsil edilmektedir. Öncelik sıralamalarındaki sayıların anlamları; 0: SHTG, 1: SHnew, 3: MHTG, 5: MHnew şeklindedir. Bu durumda S1(3015) yöntem seçim öncelikleri

sırasıyla MHTG, SHTG, SHnew ve MHnew şeklinde olan 1 numaralı senaryoyu temsil etmektedir. Çizelge 5.1 senaryolara ait detayları barındırırken, gösterim kolaylığı olması amacıyla şekillerde sadece senaryo kısaltmaları kullanılmıştır. Şekillerde senaryoların gösterim sıralaması, sergiledikleri BBR değerlerine göre artan sırada yapılmıştır.

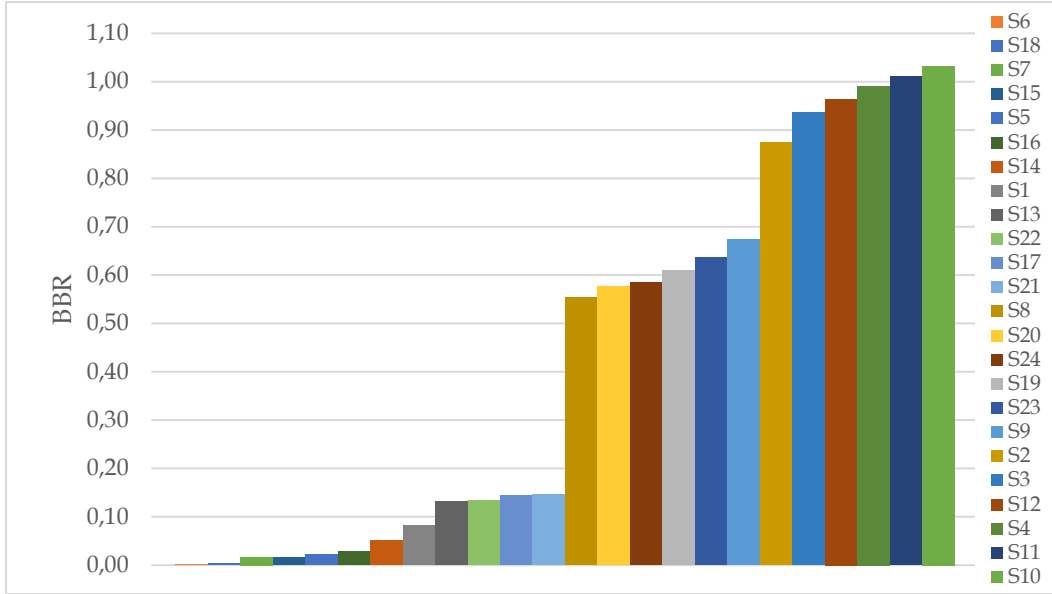
Çizelge 5.1. Yol kurma yöntemi seçimlerinin yönlendirme performansına etkileri için kurulan senaryoların detayları.

<i>id</i>	<i>Öncelik Sıralaması</i>	<i>id</i>	<i>Öncelik Sıralaması</i>	<i>id</i>	<i>Öncelik Sıralaması</i>	<i>id</i>	<i>Öncelik Sıralaması</i>
S1	3015	S7	0315	S13	1503	S19	0531
S2	5103	S8	0351	S14	1053	S20	0513
S3	5013	S9	3501	S15	1305	S21	3150
S4	5031	S10	5301	S16	1350	S22	3105
S5	1035	S11	5310	S17	1530	S23	3510
S6	0135	S12	5130	S18	0153	S24	3051

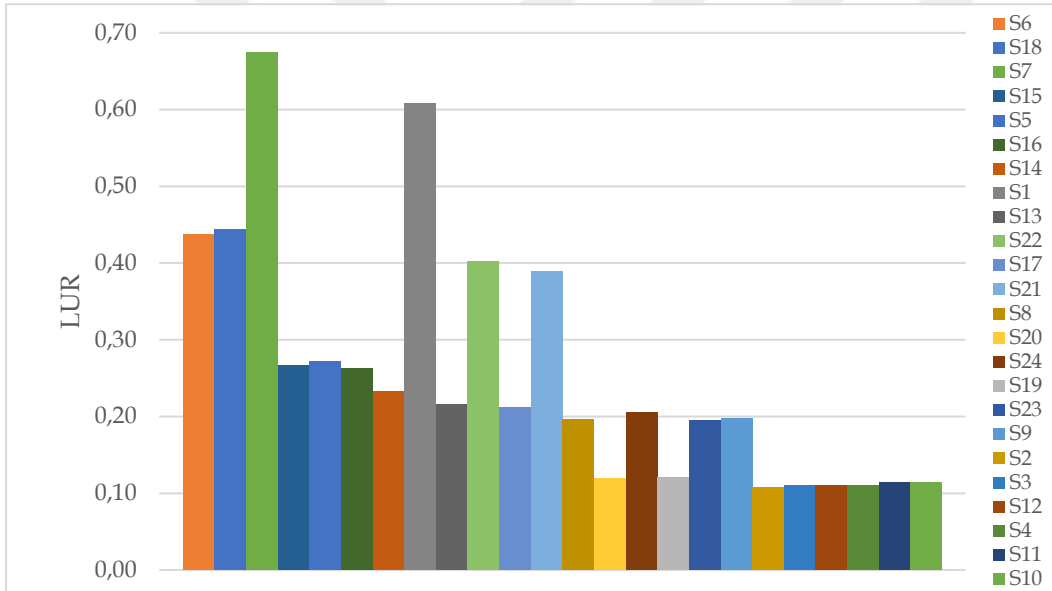


Şekil 5.2. 700 Erlang yük ile farklı yol kurma senaryolarına ait iletim maliyeti değerleri.

Performans sonuçlarına göre senaryoları 3 performansı grubu altında değerlendirmek mümkündür. İlk grubu oluşturan S6(0135), S18(0153) ve S7(0315) senaryoları, özellikle iletim maliyeti ve LUR ölçütlerinde diğer senaryolara belirgin olarak üstünlük sağlarken, diğerlerinden düşük BBR değerleri sergiledikleri görülmektedir. Bu senaryoların avantajı, çok zıplamalı yol kurulumundansa (MHTG, MHnew) uçtan uca yol kurulumuna (SHTG, SHnew) öncelik vermeleri ve her iki durumda da yeni yol kurulumundan (SHnew, MHnew) önce tımarlama yöntemlerine (SHTG, MHTG) öncelik vermeleridir.



Şekil 5.3. 700 Erlang yük ile farklı yol kurma senaryolarına ait BBR değerleri.



Şekil 5.4. 700 Erlang yük ile farklı yol kurma senaryolarına ait LUR değerleri.

S15, S5, S16, S14, S1, S13, S22, S17 ve S21 senaryolarından oluşan ikinci performans grubu ortalama maliyet ve BBR değerleri sergilemektedirler. Bu senaryoların en baskın dezavantajının yeni yol kurulumuna (SHnew, MHnew) tımarlamadan (SHTG, MHTG) daha yüksek öncelik vermeleri ve bazı senaryolarda MHTG yöntemini SHTG yönteminden daha yüksek öncelikle seçmeleri olduğu değerlendirilmektedir. Işıkyolları üzerinde atıl kapasiteler olmasına rağmen; bu gruba dahil senaryolar, yeni ışık yolları kurmak için dalga boylarını mürşifçe kullanmakta ve sonuç olarak kapasite kaybına ve gelecek trafiklerde engelleme artışına sebep olmaktadır.

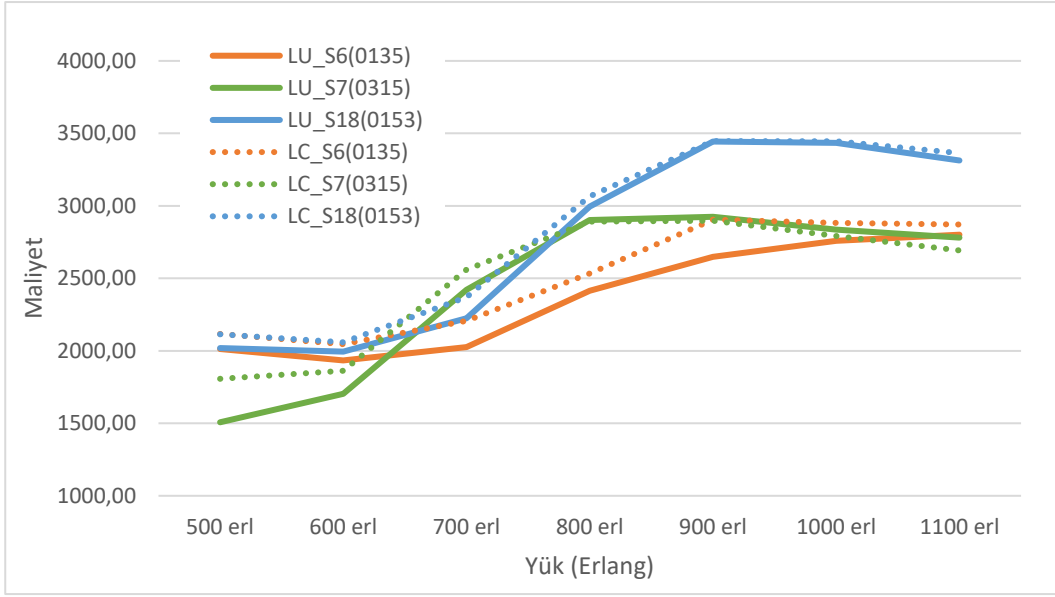
Çok zıplamalı yeni yol kurulumun (MHnew) uçtan uca yeni yol kurulumundan (SHnew) daha öncelikli olarak seçildiği tüm senaryolarda hem BBR hem de iletim maliyetleri belirgin şekilde artış göstermektedir. Bu sonucun ana sebebi, gereğinden uzun yolların ve bu yollar üzerindeki dalgaboylarının müsrifçe kullanılması sonucu yaşanan kaynak kullanımı etkinliğindeki düşüştür. Bu özelliğe sahip S8, S20, S24, S19, S23, S9, S2, S3, S12, S4, S11 ve S10 senaryoları en kötü performans değerlerini sergileyerek üçüncü grupta yer almaktadırlar. Çizelge 5.2 benzetimler sonucu yapılan yorumları özetlemektedir.

Çizelge 5.2. Yol kurma yöntemlerinin zayıf ve güçlü yönleri.

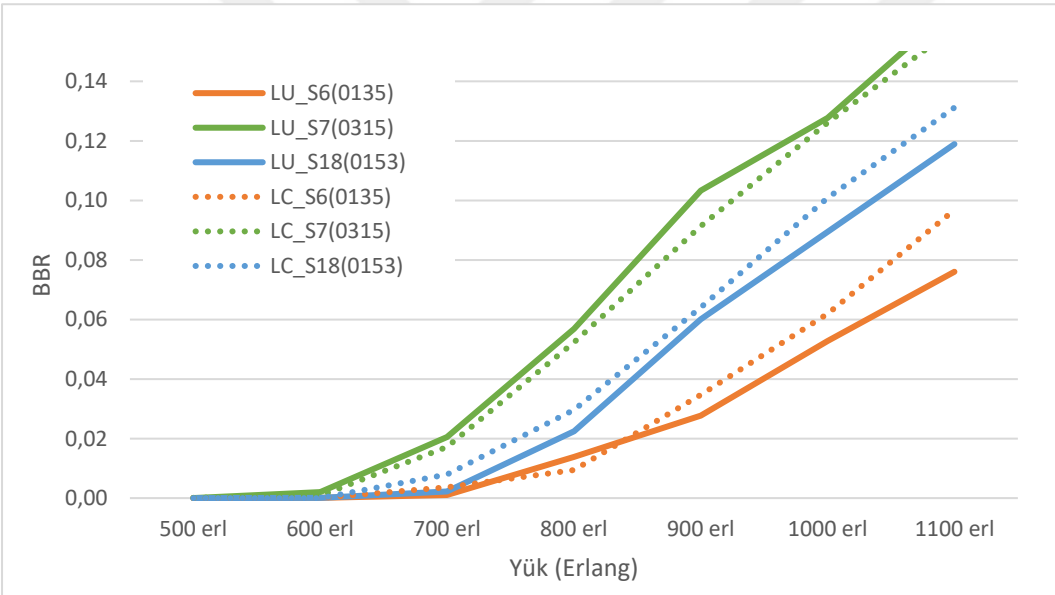
Yöntem	Güçlü Yönleri	Zayıf yönleri
SHTG	• Işıkyollarındaki atıl kapasitelerin etkin kullanımı	• TR kısıdına tabi olmak
SHnew	• Uçtan uca az sayıda dalgaboyu kullanımı • Görece kısa yollar	• TR kısıdına tabi olmak • Dalgaboyu devamlılığı kısıdına tabi olmak
MHTG	• Uçtan uca kapasitenin olmadığı durumlarda daha çok kaynak alternatifi	• Görece uzun yollar sebebiyle atıl kapasitelerin müsrifçe kullanımı
MHnew	• Uçtan uca kapasitenin olmadığı durumlarda daha çok kaynak alternatifi • TR değerlerinden daha uzak düğümlerin birbirleriyle iletişim kurabilmesi	• Görece uzun yollar sebebiyle daha çok dalgaboyu ve iletim donanımı kullanımı

LU yol seçim yaklaşımı ile en iyi performansı veren senaryoları gözlemlendikten sonra, testler yine Şekil 5.1’de görülen NSF ağı üzerinde LC yaklaşımı, OPT kaynak atama ve paylaşılan PAL yedek yol koruma yöntemlerini kullanan SRRWA algoritması ile tekrarlanmıştır. Her senaryo için, toplamaları yaklaşık 10 Tbps olan, 500-1100 Erlang yük aralığında tüm düğüm çiftleri arasında dengeli olarak dağıtılmış dinamik trafik istekleri üretilmiştir. Trafik isteklerinin oluşturulması bir önceki benzetimler ile aynı yapıdadır. LU yaklaşımını ile en iyi performansı sergileyen S6, S7 ve S18 senaryolarının LU ve LC yaklaşımları ile oluşturdukları iletim maliyetleri Şekil 5.5’te, BBR değerleri Şekil 5.6’da karşılaştırılmaktadır.

Benzetim sonuçlarına göre, yüksek yüklerde hem LU hem LC yaklaşımı ile S6 senaryosu en düşük engellemeyi sergilerken, S7 ve S18 senaryolarına ait BBR değerleri belirgin olarak artış göstermektedir. BBR sonuçları ışığında iletim maliyetleri değerlendirildiğinde, S6 senaryolarının daha düşük iletim maliyeti oluşturduğu görülürken, LU yaklaşımı kullanan senaryoların LC emsallerinden daha düşük maliyetle çalıştıkları görülmektedir.



Şekil 5.5. NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının iletim maliyeti değerleri.

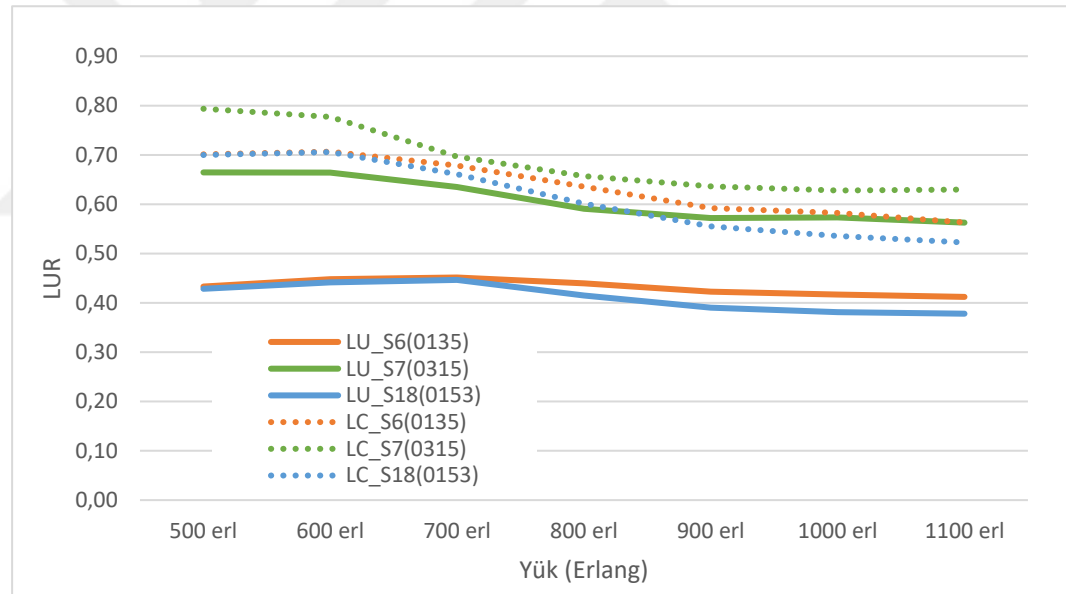


Şekil 5.6. NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının BBR değerleri.

Şekil 5.7 LU ve LC yaklaşımları kullanan S6, S7 ve S18 senaryolarının LUR değerlerini göstermektedir. Karşılaştırmada da görülebileceği gibi, tüm senaryolar için LC yaklaşımı kullananlar LU emsallerine göre daha etkin kaynak kullanımı sergilemektedirler. Bu sonuç, LU yaklaşımının bağlantıları farklı yollar üzerinde dağıtmaya çalışmasına karşılık, LC yaklaşımının sürekli en düşük maliyetli yolların kullanımını teşvik etmesi sebebiyle görülmektedir. LC yaklaşımının hep en düşük maliyetli yolları seçmesi, trafiğin hep bu yollar üzerinde toplanmasına sebep olmaktadır. LU yaklaşımının yük dengelemesi yapabilmek için trafikleri farklı yollara dağıtması kaynak kullanım etkinliğini düşürmektedir.

LU_S6 ve LU_S18 kendi LC emsallerine göre daha iyi maliyet ve BBR performansı sergilemektedirler. Bu sonuca, LU yaklaşımının, yük dengelemek için farklı yollarda kurduğu ışık yolları üzerindeki atıl kapasitenin trafik tımarlama yöntemi ile etkin olarak kullanılabilmesi sebep olmaktadır.

BBR değerinin sıfır olduğu düşük yüklerde, her iki yol seçme yaklaşımı ile de S7 senaryosu, S6 ve S18 senaryolarından daha düşük maliyetle çalışmaktadır. S7 senaryosunun hem SHTG hem de MHTG tımarlama yöntemlerine en yüksek önceliği vermesi bu avantajı yaratmaktadır. Ancak S7, SHnew yönteminden daha yüksek önceliği MHTG yöntemine vermektedir. MHTG yöntemi SHTG'ye göre çok daha uzun yolları kullanmakta, bu yollardaki ışık yollarının atıl kapasitelerini daha hızlı tüketmekte ve yeni yol kurulumuna daha erken ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır. SHTG yöntemi, MHTG'ye göre daha hassas şekilde atıl kapasite kullandığı için S7 senaryosunun trafik engellemedeki etkinliği uzun vadede düşmektedir.



Şekil 5.7. NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının LUR değerleri.

LU_S7 ve LC_S7 karşılaştırıldığında, LC yaklaşımın daha düşük maliyet ve BBR oluşturduğu görülmektedir. Sürekli en az kullanılan yolların seçilmesini sağlayan LU_S7 yöntemi ile, SHTG alternatifleri bittiğinde, MHTG yöntemi ile ışık yollarının atıl kapasiteleri hızla tüketilmektedir. MHTG'den önce SHnew yol kurulumu yapılabilse, daha sonraki trafik isteklerine SHTG yöntemi ile kullanılabilecek kapasiteler oluşturulabilirdi. Buna karşılık, LC yaklaşımı, hep aynı yolların seçilmesini teşvik ettiği için atıl kapasitelerin SHTG yöntemi ile

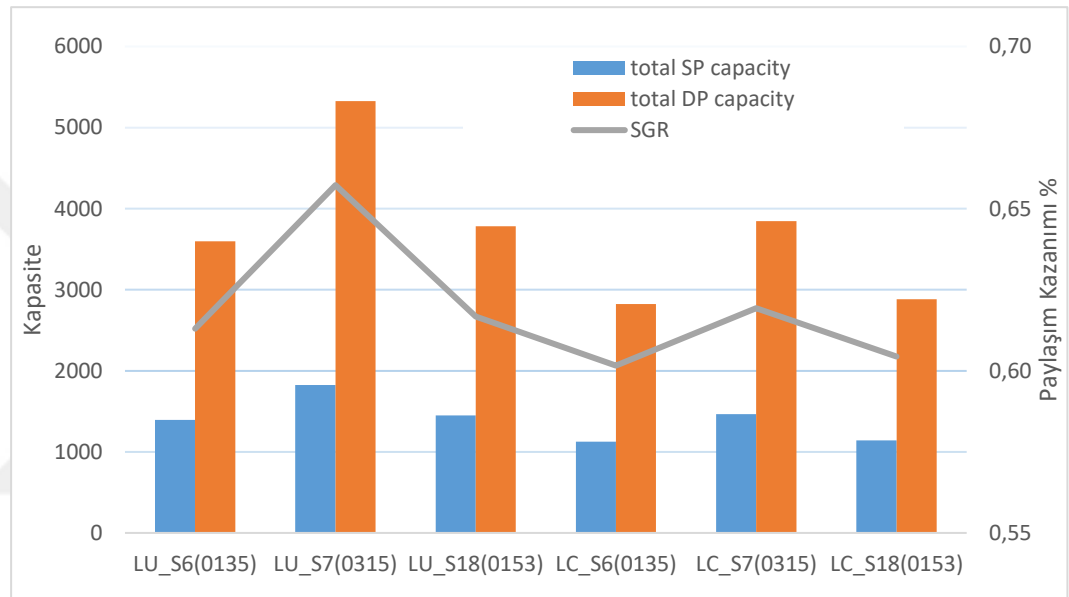
kullanılmasını sağlamakta, MHTG'ye çok alternatif bırakmamaktadır. Böylece yeni yol kurulumuna gidilmekte ve performans değerleri daha yüksek olmaktadır.

LC_S6 ve LC_S18 kendi LU emsallerine göre daha yüksek engelleme yaratmaktadır. LC senaryoları, hep en düşük maliyetli aynı yolların seçilmesini zorunlu kıldıkları için, atıl kapasiteler SHTG alternatifleri ile hızla tükenmekte ve yeni yol kurulmasına gerek doğurmaktadırlar. Bu durum var olan dalgaboylarının LU emsallerine göre daha hızlı tüketilmesine sebep olmaktadır. LU yaklaşımı ile ise, farklı yolların seçimi teşvik edildiğinden, başlarda daha çok yeni yol kurulsada ilerleyen zamanda SHTG alternatifleri daha fazla olmaktadır. Diğer taraftan LC senaryolarının aynı yolları kullanmaya meyilli olması kaynak kullanım etkinliklerini LU emsallerine göre arttırarak daha yüksek LUR performansı sergilemelerini sağlamaktadır.

Her iki yol seçme yaklaşımı ile de S7 senaryoları tüm yüklerde daha etkin kaynak kullanımı sergilemektedirler. S7 senaryosunun tımarlama yöntemlerine öncelik vermesi bu sonucu doğurmaktadır. Ancak artan yüklerde SHnew yönteminden önce MHTG yönteminin seçilmesi sebebiyle kaynak kullanımı etkinliği %68 ortalamasından %55 civarına düşmektedir. Tüm yüklerde LU_S6 ve LU_S18 senaryoları, LU yaklaşımının yük dengeleme amacı sayesinde birbirlerine yakın olarak ortalama %43 kaynak kullanımı sergilemektedir. Düşük yüklerde S6 ve S18 senaryolarının, S7'ye göre daha çok atıl kapasite ile çalışması SHTG alternatifi bulamadıklarında hemen yeni yol kurmaları sebebiyle oluşmaktadır. Artan yüklerde bu kurulan yollar yeni SHTG alternatifleri oluşturacağından, kaynak kullanımı aynı kalmakta ve maliyet dengelenmektedir. S7'de olduğu gibi atıl kapasitelerin SHTG yerine MHTG ile değerlendirilmesi bu kapasitelerin daha hızla tükenmesine sebep olmakta, gelecekte oluşabilecek SHTG alternatiflerine de engel olmaktadır.

Şekil 5.8 LU ve LC yaklaşımları kullanan S6, S7 ve S18 senaryolarının yedek yol paylaşımı ile kazanılan kapasite değerlerini göstermektedir. Paylaşım kapasite kazanımı (*sharing capacity gain ratio*-SGR), yedek iletim yolunda paylaşım yapan bağlantıların toplam yedek iletim ihtiyaçları kapasitesi (*total_DP_capacity*) ile tüm ışık yolları üzerindeki paylaşılan toplam yedek iletim kapasitesi (*total_SP_capacity*) değerlerini kullanır. Toplam kapasite ihtiyacı ile kullanılan kapasite farkı, paylaşımın getirdiği kazancı göstermektedir. Yedek iletim yolunda paylaşım yapmayan, adanmış koruma kullanan bağlantılar bu hesaplamanın dışında tutulur. SGR oranı hesaplaması Eşitlik (11) ile yapılmaktadır.

Kapasite değerleri incelendiğinde, LU yaklaşımını kullanan senaryolarda paylaşıma ayrılan kapasitenin (total_SP_capacity) daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç, LU yaklaşımı ile daha çok trafik isteğinin paylaşılan yedek yol kullandığını göstermektedir. LU yaklaşımı kullanan senaryolarda SGR eğrisinin LC emsallerinden daha yüksek değerde olması da bu yorumu desteklemektedir. LU yaklaşımı ile %66, LC yaklaşımı ile %62 SGR değeri sunan S7 senaryosu diğer senaryolardan daha iyi performans göstermektedir. S6 ve S18 senaryoları birbirlerine yakın değerler sergilerken, LU yaklaşımı ile yaklaşık %62, LC yaklaşımı ile yaklaşık %60 SGR değeri oluşturmuşlardır.



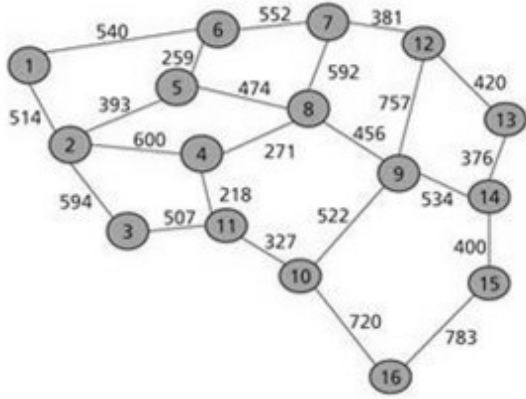
Şekil 5.8. NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının SGR değerleri.

Çizelge 5.3 NSF ağında benzetimlerin sonuçlarını özetlemektedir. İlk sütunda senaryo kısaltması yer alırken; ikinci sütunda bu senaryonun hangi yaklaşım ile en iyi sonucu verdiği belirtilmektedir. Maliyet, BBR ve LUR sütunlarındaki işaretler, bu ölçütlerdeki en iyi değerlerin hangi senaryo ile elde edildiğini belirtmektedir. Zayıf yönlerin belirtildiği sütunda, ilgili senaryoların hangi özellikleri sebebiyle performans düşüşü yaşadığına değinilmektedir.

Çizelge 5.3. NSF ağı için bulguların özeti.

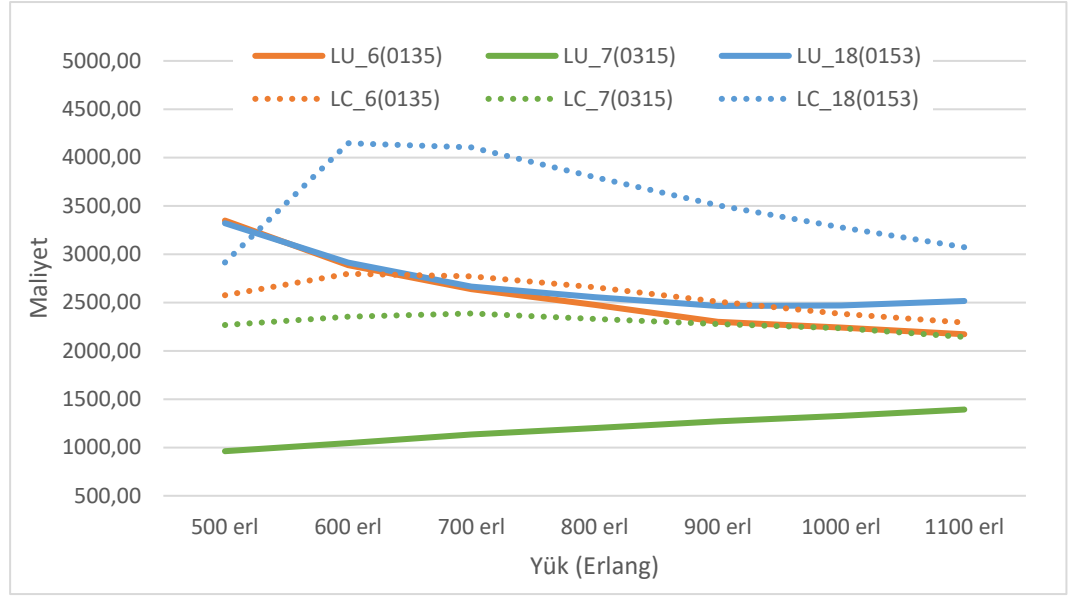
id	LU/LC	Maliyet	BBR	LUR	Zayıf Yönleri	
S6	LU	✓	✓		Farklı yollara dağıtılan ışık yolları sebebiyle düşük kaynak kullanımı etkinliği	
S18	LU					MHTG'den daha öncelikli olarak seçilen MHnew sebebiyle kaybedilen MH tımarlama ihtimalleri
S7	LC			✓	Tüm bağlantılar için aynı görece kısa seçerek tımarlama ihtimalinin düşürülmesi	

Gerçekleştirilen senaryoların farklı ağlarda nasıl davrandığını gözlemlemek adına benzetimler, Şekil 5.9'da görülen EON ağı üzerinde, LU ve LC yol seçme yaklaşımları, OPT kaynak atama ve paylaşılan PAL yedek yol koruma yöntemlerini kullanan SRRWA algoritması ile tekrarlanmıştır. Trafik isteklerinin oluşturulması bir önceki benzetimler ile aynı yapıdadır. Şekil 5.9'da hatlar üzerindeki değerler hattın km cinsinden uzunluğunu belirtmektedir. 16 düğüm 23 hat barındıran EON ağı ortalama 487 km hat uzunluğu ile NSF ağından (ort. 1.936 km) çok daha kısa hatlara sahiptir. Dolayısıyla, EON ağı çok daha yüksek oranda yenilemesiz yüksek hat hızlı ışıkyolu kurulumuna olanak vermektedir. Bu sebeple, EON ağındaki ışıkyolları genellikle yüksek hat hızlarıyla kurulmakta ve trafik tımarlama ile kullanılabilir yüksek miktarda atıl kapasite barındırmaktadırlar. Benzetimi yapılan senaryoların iki ağıdaki performans farklılıkları genel olarak bu yapısal farka dayanmaktadır.

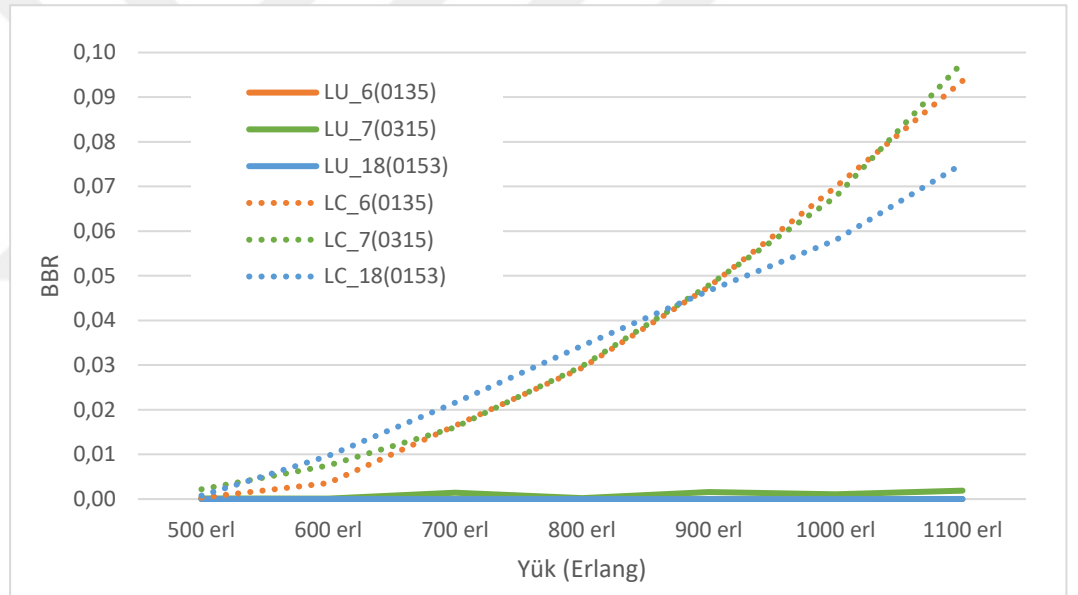


Şekil 5.9. 16 düğümlü EON ağı (Morea et al. 2013).

EON ağında, S6, S7 ve S18 senaryolarının LU ve LC yaklaşımları ile oluşturdukları iletim maliyetleri Şekil 5.10'da, BBR değerleri Şekil 5.11'de karşılaştırılmaktadır. Sonuçlara bakıldığında en iyi performansın LU_S7 senaryosu ile elde edildiği görülmektedir. EON ağının, yüksek hat hızlarında ışıkyolu kurulumunu destekleyerek tımarlama ihtimalini arttırması, SHTG ve MHTG yöntemlerine en yüksek önceliği veren S7 senaryosunun, LU yaklaşımının yük dengeleme avantajını da kullanarak en iyi performansı sergilemesine sebep olmaktadır.



Şekil 5.10. EON ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının iletim maliyeti değerleri.



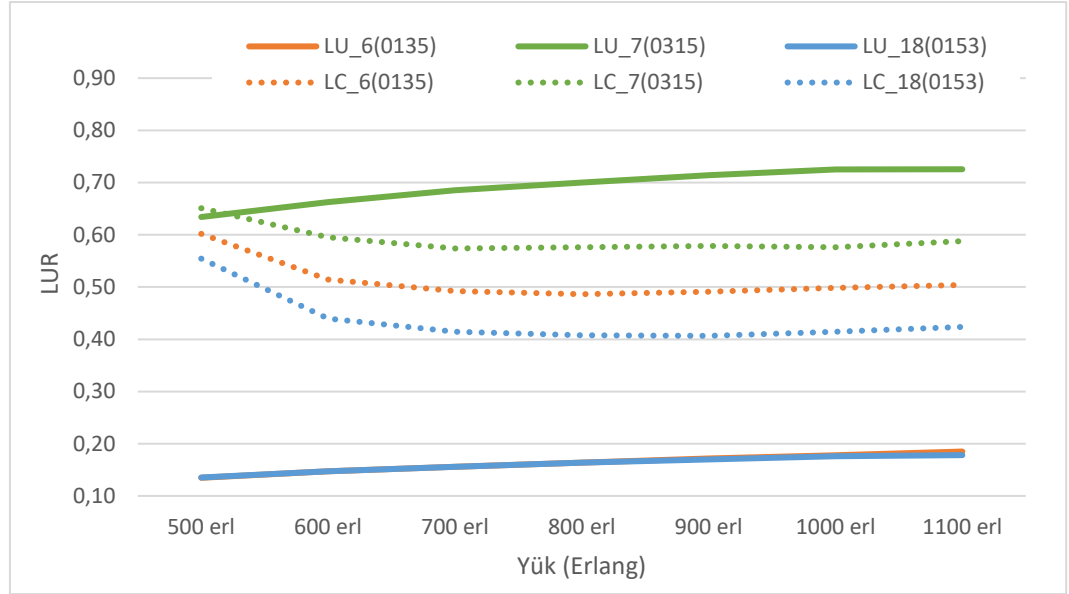
Şekil 5.11. EON ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının BBR değerleri.

Tüm yüklerde LU yaklaşımı kullanan senaryolar engelleme yaşamazken, LC yaklaşımı kullanan senaryolar belirgin olarak artan engelleme oranları sergilemektedir. İki yaklaşım arasındaki performans farkı EON ağında NSF ağına göre daha belirgin olarak görülmektedir. LU yaklaşımları, engellenmenin var olduğu tüm yüklerde kendi LC emsallerinden daha iyi performans sergilemektedirler. Düşük yüklerde LU_S6 ve LU_S18 senaryoları en yüksek maliyeti sergilemektedir. Bunun sebebi, hep en az kullanılan yollar üzerinde dağıtarak kurdukları yüksek hat hızlı ışık yollarındaki atıl kapasiteleri SHTG yöntemi ile kullanamadıklarında MHTG alternatiflerini değerlendirmek yerine yeni yol kurmayı seçmektedirler. NSF ağında bu seçim avantaj sağlarken, EON ağında bir dezavantaja

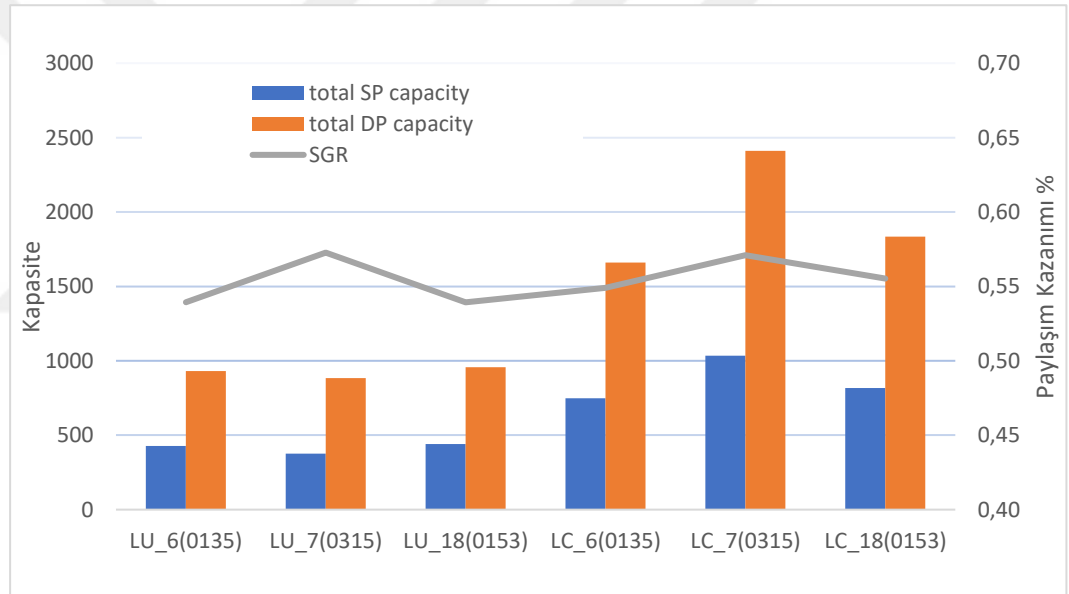
dönüşmektedir. Bunun sebebi EON ağının kısa hat uzunlukları ile yüksek hat hızlarını yenilemesiz olarak desteklemesi; kurulan ışıkyollarında atıl kapasite miktarının genellikle çok kalması; ve bu kapasitenin genellikle SHTG ile tüketilemeyecek kadar çok olmasıdır. Tımarlama ihtimalinin bu kadar yüksek olduğu durumda hep aynı yolları seçmeye meyilli LC yaklaşımı daha düşük iletim maliyeti oluşturmaktadır. Ancak, yükselen yüklerde aynı yolları seçmenin getirdiği tımarlama ihtimalindeki düşüş maliyet ve engelleme oranında artışa sebep olmaktadır. Dolayısıyla artan yüklerde LU_S6 ve LU_S18 yöntemleri kendi LC emsallerinden daha düşük maliyetle çalışmaktadırlar. LU_S7 senaryosu ile karşılaştırıldıklarında, MHTG yerine SHnew yöntemine öncelik vererek tımarlama avantajını kullanamamaları sebebiyle LU_S6 ve LU_S18 senaryoları, LU_S7 senaryosuna göre daha düşük maliyet ve LUR performansı sergilemektedirler.

Şekil 5.12 LU ve LC yaklaşımları ile S6, S7 ve S18 senaryolarının EON ağında sergiledikleri LUR değerlerini göstermektedir. S7 senaryosunun en yüksek; LU_S6 ve LU_S18 senaryolarının en düşük kaynak kullanıma sahip olduğu sonuçlar NSF ağında elde edilenlere benzerlik göstermektedir. Tımarlama yöntemlerine yüksek öncelik veren LU_S7, EON ağının yüksek atıl kapasite miktarını ve LU yaklaşımının yük dengeleme özelliğini iyi değerlendirerek LC senaryolarının bile üstünde LUR değerleri sergilemektedir. Aynı yoları kullanmaya meyilli LC yaklaşımı yine yüksek kaynak kullanımı sergilemekte ama yine bu özelliği sebebiyle LU_S7 senaryosundan daha yüksek engelleme yaşayarak LU_S7'den daha düşük LUR performansı sergilemektedir.

Şekil 5.13 LU ve LC yaklaşımları ile S6, S7 ve S18 senaryolarının EON ağında sergiledikleri SGR değerlerini göstermektedir. SGR değerleri tüm senaryolar için %55 civarında yakın seyrederken, en iyi değer %57 ile S7 senaryosu tarafından sergilenmektedir. LC senaryolarının paylaşımına ayırdıkları kapasitenin nispeten daha fazla olması, bu yaklaşımı sahip senaryolarda daha çok trafik isteğinin paylaşılan yedek yol kullandığını göstermektedir.



Şekil 5.12. EON ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının LUR değerleri.



Şekil 5.13. EON ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı yol kurma senaryolarının SGR değerleri.

Çizelge 5.4 EON ağında elde edilen benzetimlerin sonuçlarını özetlemektedir. İlk sütunda senaryo kısaltması yer alırken; ikinci sütunda bu senaryonun hangi yaklaşım ile en iyi sonucu verdiği belirtilmektedir. Maliyet, BBR ve LUR sütunlarındaki işaretler, bu ölçütlerdeki en iyi değerlerin hangi senaryo ile elde edildiğini belirtmektedir. Zayıf yönlerin belirtildiği sütunda, ilgili senaryoların hangi özellikleri sebebiyle performans düşüşü yaşadığına değinilmektedir.

Çizelge 5.4. EON ağı için bulguların özeti.

<i>Id</i>	<i>LU/LC</i>	<i>Maliyet</i>	<i>BBR</i>	<i>LUR</i>	<i>Zayıf Yönleri</i>	
S6	LU		√		Farklı yollara dağıtılan ışık yolları sebebiyle düşük kaynak kullanımı etkinliği	
S18	LU		√			MHTG'den daha öncelikli olarak seçilen MHnew sebebiyle kaybedilen MH tımarlama ihtimalleri
S7	LU	√	√	√		

5.5 Paylaşım Kapasitesi Esnekliği Sezgisel Yaklaşımları

Paylaşılan yedek yol (SB) koruması, birden fazla trafik isteğine aynı yedek iletim kapasitesini ayırarak etkin kaynak kullanımı sağlamaktadır. Yedek iletim yoluna ihtiyaç duyulması durumu için ayrılan ve normal iletişimde atıl kalan kapasite miktarının azaltılması genel kaynak kullanımını iyileştirmektedir. SB yöntemi üzerinde yapılan çalışmalarda paylaşım etkinliğini düşüren faktörler gözlenmiştir. Bunlardan en öne çıkanı, kurulan tüm bağlantıların, en kısa yolu kullan (*shortest path first*) en iyilemesi sebebiyle aynı esas iletim yolunu seçmesi sonucu yedek iletim yollarında paylaşım yapılamamasıdır. Bu sorunu çözmek için kullanılabilecek bir dizi yaklaşım akla gelmektedir:

- Esas iletim yolu kurulurken kullanılan en kısa yolu kullan en iyilemesi yerine en az kullanılan (*least used*) vb. bir en iyileme kullanarak esas iletim yollarının hep aynı fiziksel yolu kullanmasına engel olmak. Bu öneri farklı yol seçme yaklaşımları kullanılarak benzetimlerde gerçekleştirilmiştir.
- Her düğüm çifti için $k \geq 2$ hat ayırık alternatif yollar yöntemi ile bulunan yollardan birini yedek iletim yoluna ayırıp, gelen trafik isteklerinin esas iletimlerinin diğer yollara dağılmasını sağlamak. Bu durumda karşılaşılan sorun, ağların düğüm derecelerinin (*nodal degree*) düşük olması sebebiyle, düğüm çiftleri arasında birbirleriyle hat ayırık ortalama 2-3 yolun bulunabilmesidir. Bu yollardan birisinin yedek iletime ayrılması durumunda esas iletim için alternatif yol sayısı düşmekte ve yüksek yüklerde bu durum dar boğaz oluşturmaktadır. Literatürde benzeri bir çalışma *preprovisioning* adı ile gerçekleştirilmiştir (Dikbiyik, Tornatore, and Mukherjee 2014).
- Esas iletim yolları kurulduktan sonra, aynı fiziksel yol üzerine kurulmuş esas iletim yollarını hat ayırık alternatif yollar üzerine kaydırarak yedek iletim yolunda paylaşım şansı sunmak. Bu durumda esas iletim kesintiye uğrayacağı için yöntem uygulanmamıştır.

Literatürde benzeri bir çalışma *reprovisioning* adı ile gerçekleştirilmiştir (Dikbiyik et al. 2014).

- iv. Tek zıplamalı yeni yol kurulumu yerine çok zıplamalı yeni yol kurulumu yaparak, uçtan uca paylaşılabilir yedek yol aramak yerine alt yolda paylaşım adayı aratmak. Bu öneri yol kurma yöntemlerinin seçim önceliklerini değiştirerek yapılan benzetimlerde denenmiştir. MH yöntemleri SH yöntemlerine göre daha masraflı ve gereksiz dolanmalar yapabildiği için, artan yükte trafik engelleme ve maliyet çok artmıştır.

Paylaşım performansına etki eden bu sorunu çözebilmek için iki farklı yol seçme yaklaşımı denenmiştir. Bu yaklaşımlar, uygun kaynaklar arasından, üzerinde en az sayıda dolu dalgaboyu olan kaynağı seçen en az kullanılan yolu seç (*least used path first-LU*) ve en ucuz kaynağı seçen en düşük maliyetli yolu seç (*least cost path first-LC*) yaklaşımlarıdır. Yaklaşımlara ait detaylara önceki bölümlerde yer verilmiştir.

Paylaşım performansına etkisi olan bir başka faktör, ışık yolları üzerinde yedek yol paylaşımına ayrılan kapasitedir (*SB_capacity*). Bir ışık yolu yedek iletim için kurulduğunda, üzerinde ayrılan kapasite ileride oluşacak uygun trafik isteklerinin yedek iletim kapasitesi olarak da kullanılabilir. Bir yedek iletim kapasitesinin paylaşılabilmesi için,

- i. Korunmakta olan esas iletim kaynaklarının (hatlar, yollar, alt yollar, vb.) birbirlerinden hat ayırık olmaları gerekmekte (Ou and Mukherjee 2005).
- ii. Yedek iletime ayrılan kapasitenin (*SB_capacity*) paylaşım adayı trafik isteğinin bant genişliği ihtiyacına yeterli olması gerekmektedir.

Bir ışık yolu üzerindeki *SB_capacity* o ışık yolunu yedek iletim için ilk kuran bağlantı isteğinin bant genişliği ihtiyacına eşit tanımlanmaktadır. Dolayısıyla gelecek trafik istekleri için küçük kalabilmektedir. Bu soruna çözüm olabilecek farklı sezgisel yaklaşımlar aşağıdaki gibi listelenebilir;

- i. Sabit olarak tüm ışık yolu kapasitesini *SB_capacity* olarak tanımlamak. Bu öneri benzetimlerde denenmiştir. Bu şekilde kurulan bir yedek iletim ışık yoluna paylaşım adayı gelmezse, atıl kapasite tımarlama yöntemiyle

de kullanılmadığı için kaynak kullanımı etkinliği düşmekte, trafik engelleme oranı da artmaktadır.

- ii. Esnek bir uygulama ile, bir ışıkyoluna paylaşım isteği oluştuğunda, o ışıkyolunun atıl kapasitesinden kullanarak $SB_capacity$ 'i arttırmak.

Paylaşım performansına etki eden bu sorunu çözebilmek için farklı paylaşım kapasitesi ($SB_capacity$) politikaları kullanan 2 paylaşılan yedek yol koruma (SB) yaklaşımı hazırlanmıştır. Bu yaklaşımlar; iri hassasiyetli değişken paylaşım kapasitesi (CGS_SB_cap) ve ince hassasiyetli değişken paylaşım kapasitesi (FGS_SB_cap) olarak adlandırılmaktadırlar. Bu yaklaşımların etkisi klasik sabit paylaşım kapasitesi ($fixed_SB_cap$) politikası ile karşılaştırılarak gözlemlenmiştir.

Paylaşılan yedek yol koruması yapan senaryolardan ilkinde ($fixed_SB_cap$) paylaşım kapasitesi sabit tutulmuştur. Bu kapasite, paylaşım aday ışıkyolunu yedek iletimi için ilk kuran trafik isteğinin ihtiyacına eşit tanımlanmakta ve sabit tutulmaktadır. Esnek olmayan bu yöntem ile, daha sonra gelecek trafik istekleri için bu yol paylaşımına uygun olsa bile, $SB_capacity$ yeni trafiğin ihtiyacı için yetersiz olursa yedek yol paylaşımı yapılamamaktadır.

Esnek paylaşım kapasitesi sağlayan yöntemlerden ilki olan CGS_SB_cap yaklaşımı, bir yedek iletim ışıkyolu kurarken, yine ilk kuran trafik isteğinin ihtiyacına eşit olacak paylaşım kapasitesi yaratmaktadır. Ancak daha sonra, bant genişliği ihtiyacı ayrılan paylaşım kapasitesinden fazla olan bir paylaşım aday istek gelirse, kapasiteyi o ışıkyolu üzerindeki tüm atıl kapasiteyi de içine alacak şekilde ($SB_capacity += available_cap$) güncellemektedir. Bu şekilde kapasite yetersizliği sebebiyle reddedilen paylaşım olanakları da değerlendirilebilmektedir. Ancak yapılan testlerde, bir kaynağı paylaşabilecek alternatiflerin az olması ve büyük bir kapasitenin paylaşımına ayrılmış olması, kapasitenin tımarlama yöntemleriyle değerlendirilememesine sebep olmuş ve olumsuz kaynak kullanımı doğurmuştur.

Paylaşılan yedek yol koruması yapan üçüncü senaryo olan FGS_SB_cap yaklaşımı da diğer ikisi gibi, yeni bir yedek iletim ışıkyolu kurulurken, yolu ilk kuran trafik isteğinin bant genişliği ihtiyacına eşit olacak paylaşım kapasitesi yaratmaktadır. Daha sonra, paylaşım aday olan ancak bant genişliği ihtiyacı paylaşım kapasitesini aşan bir trafik isteği olursa, kapasiteyi o ışıkyolunun atıl kapasitesi izin verdiği müddetçe ihtiyaç kadar ($SB_capacity += newtraffic.data_rate - SB_capacity$) arttırmaktadır. Bu güncelleme sayesinde paylaşım aday reddedilmezken gereksiz kapasite ayrımı da yapılmamış olmaktadır.

Kapasite artırımı yedek iletim yolu üzerinde yapıldığı için aktif bağlantıların iletişimi etkilenmemektedir. Çizelge 5.5 yaklaşımlar üzerinde yapılan yorumları özetlemektedir.

Çizelge 5.5. Paylaşım kapasitesi esnekliği sezgisel yaklaşımlarının zayıf ve güçlü yönleri.

Yaklaşım	Güçlü Yönleri	Zayıf yönleri
fixed_SB_cap	• Işıkyollarındaki atıl kapasitelerin tımarlamaya ayrılarak etkin kullanımı	• İlk trafik isteğinin bant genişliği ihtiyacına göre ayarlanmak • Esnek olmamak
CGS_SB_cap	• İhtiyaç durumunda kapasite artırımı yapmak	• Kapasite artırımı yapıldığında tımarlama ihtimalini ortadan kaldırması • Gereğinden çok kapasiteyi paylaşımına ayırması
FGS_SB_cap	• İhtiyaç durumunda kapasite artırımı yapmak • İhtiyacından fazla kapasiteyi paylaşımına ayırmayarak, ışıkyolunda tımarlama ile kullanılabilecek kapasite bırakmak	• Her ihtiyaç durumunda paylaşım kapasitesini artırmak

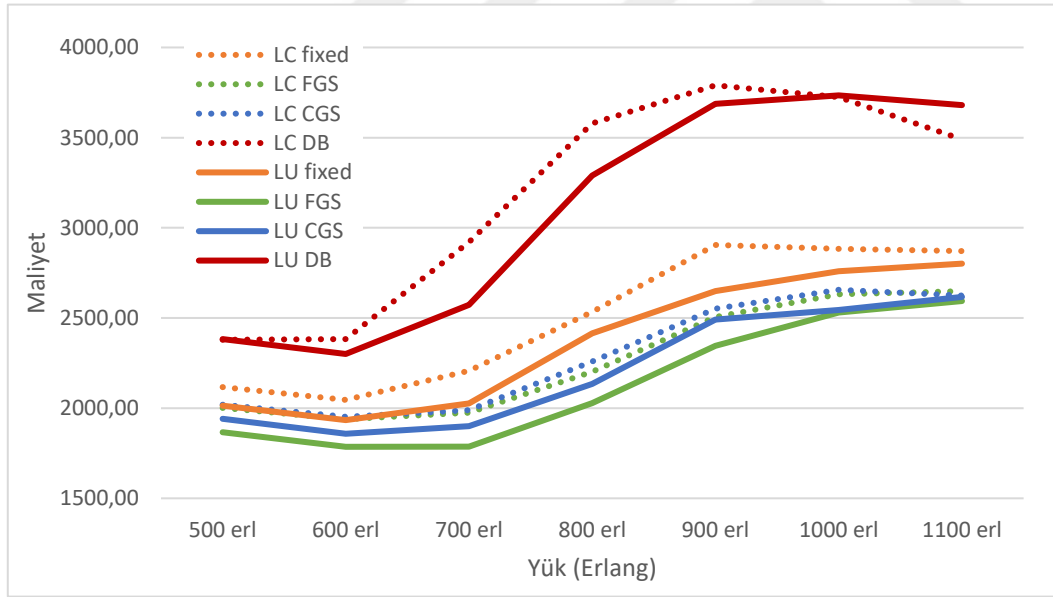
5.6 Paylaşım Kapasitesi Esnekliği Sezgisel Yaklaşımlarının Yönlendirme Performansına Etkileri

Bölüm.5.5’de anılan fixed_SB_cap, CGS_SB_cap ve FGS_SB_cap paylaşım kapasitesi esnekliği yaklaşımlarına ait performanslar, Şekil 5.1’de görülen 14 düğümlü NSF ağında, LU ve LC yol seçme yaklaşımları, OPT kaynak atama ve paylaşılan PAL yedek yol koruma yöntemlerini kullanan SRRWA algoritması üzerinde bir dizi benzetim ile karşılaştırılmıştır. Farklılıkların görülebilmesi için, karşılaştırmalara adanmış yol koruması (DB) yöntemi de eklenmiştir. Yol kurma yöntemlerinin seçim önceliği olarak, NSF ağında en iyi performansı sergileyen S6(0135) senaryosu kullanılmıştır. S6 senaryosu uyarınca, yöntemlerin seçim öncelikleri SHTG, SHnew, MHTG ve MHnew sırası ile kullanılmaktadır.

Her senaryo için, toplamı yaklaşık 10 Tbps olan, 500-1100 Erlang yük aralığında, tüm düğüm çiftleri arasında dengeli olarak dağıtılmış dinamik trafik istekleri üretilmiştir. İsteklerin bant genişliği ihtiyacı üniform dağılıma uygun olacak şekilde 1-10 Gbps aralığında oluşturulmuştur. Trafik istekleri, Poisson dağılımına uygun olarak birim zamanda ortalama 20 istek oluşacak şekilde üretilmiştir. İsteğe ait hat tutma süreleri, üstel dağılıma uygun olarak ortalama 25-55 birim zaman aralığında olacak şekilde ayarlanmıştır. Senaryoların Erlang cininden yük miktarını ayarlama için ortalama hat tutma süresi parametresi ile oynanmıştır. Her senaryo ellişer kez tekrar çalıştırılmış ve ortalama sonuçları raporlanmıştır.

Farklı senaryoların iletim maliyetleri Şekil 5.14'te, BBR değerleri Şekil 5.15'te görülmektedir. Şekil üzerinde; LU en az kullanılan yolu seçme yaklaşımını, LC en düşük maliyetli yolu seçme yaklaşımını, fixed, CGS ve FGS sırasıyla fixed_SB_cap, CGS_SB_cap ve FGS_SB_cap paylaşılan yedek yol koruma yöntemlerini temsil ederken, DB adanmış yedek yol koruma yöntemini temsil etmektedir.

Karşılaştırmalardan da görülebildiği gibi, tüm ölçütlerde en kötü performans adanmış yol koruma yöntemleri (DB) ile elde edilmiştir. Engellemenin de belirgin olarak fazla olduğu DB yöntemi, yedek iletim kapasitesinde kullanım iyileştirmesi yapmadığı için bu performansı sergilemektedir. Tüm yedek yol yöntemleri için LU yaklaşımı kullananlar, kendi LC emsallerinden daha düşük engelleme ve maliyet sergilemektedirler. Bunun sebebi, LU yöntemi ile farklı yollar üzerine dağıtılmış ışık yollarında daha çok paylaşım ve tımarlama ihtimalinin oluşmasıdır. Beklendiği üzere daha hassas bir esneklik sunan FGS yaklaşımları her iki yol seçim yaklaşımında da en iyi performansı sergilemektedirler.

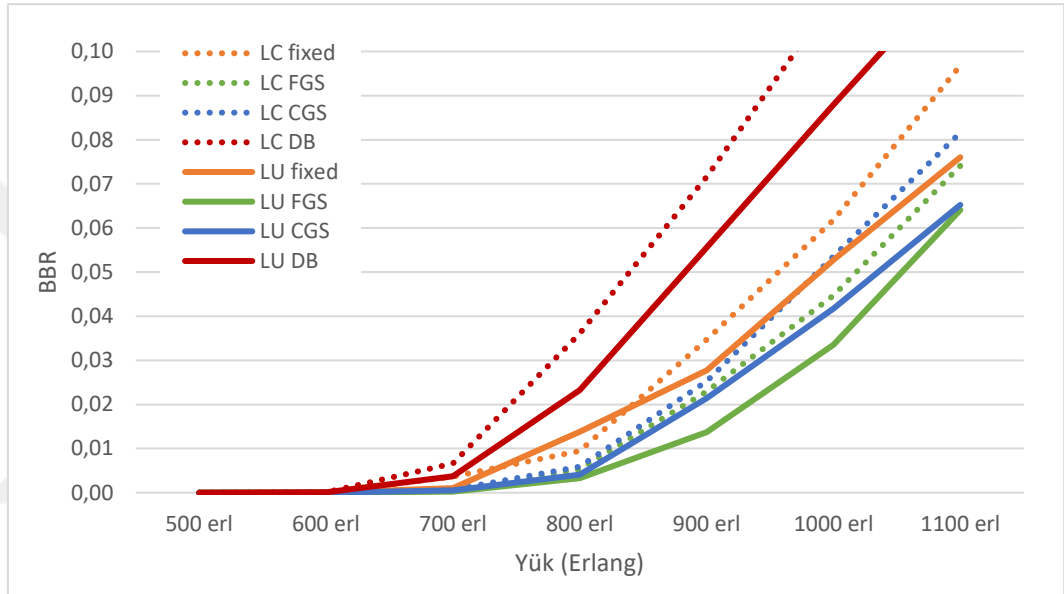


Şekil 5.14. NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının iletim maliyeti değerleri.

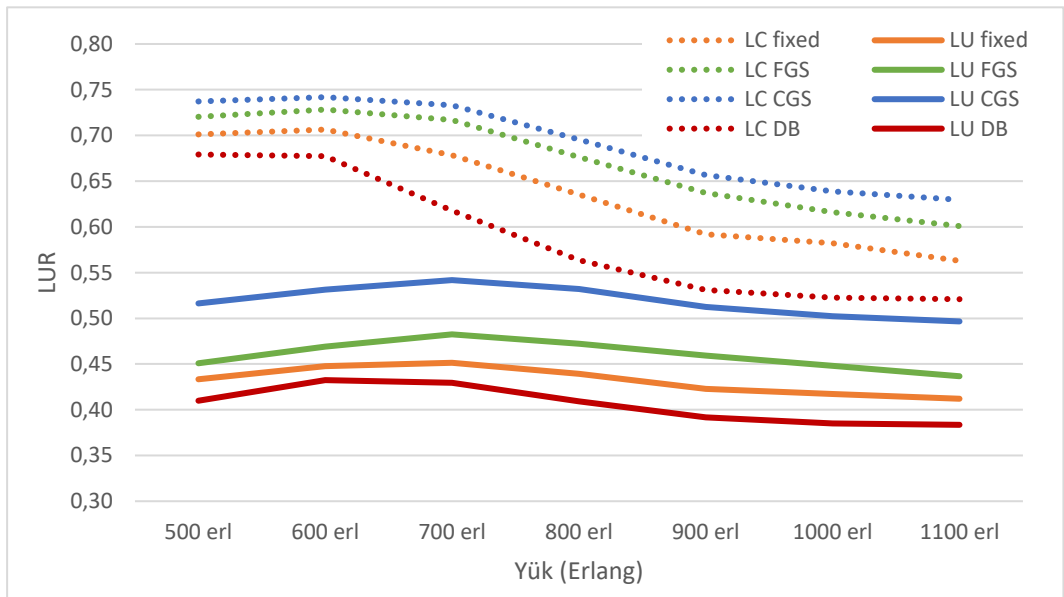
Esnek kapasite imkanı sunan diğer paylaşılan yol koruma yöntemi olan CGS, sabit kapasiteli fixed yönteminden daha iyi performans sergilerken, daha hassas esneklik sunan FGS yönteminin gerisinde kalmıştır.

Şekil 5.16'da görülen LUR değerlerine bakıldığında, LC yaklaşımını kullanan senaryoların kurdukları ışık yollarını kullanım oranlarının, kendi LU

emsallerinden daha fazla olduğu görülmektedir. En düşük kaynak kullanım performansı beklendiği gibi DB yöntemlerine aittir. DB yöntemini, sırasıyla fixed, FGS ve CGS yöntemleri izlemektedir. CGS yöntemi paylaşım ihtimali oluştuğunda, bir ışıkyolundaki tüm atıl kapasiteyi o ışıkyolunun paylaşımına ayrılan kapasitesine eklemektedir. Ancak çoğu zaman bu kapasitenin tamamı yedek iletim tarafından kullanılmamaktadır. LUR değerleri ise ışıkyollarının atıl kapasiteleri üzerinden hesaplandığı için CGS yönteminde atıl kapasiteler çok azmış gibi görünmekte ve Şekil 5.16'da olduğu gibi CGS yöntemi en iyi kaynak kullanımına sahip gibi sonuç vermektedir.

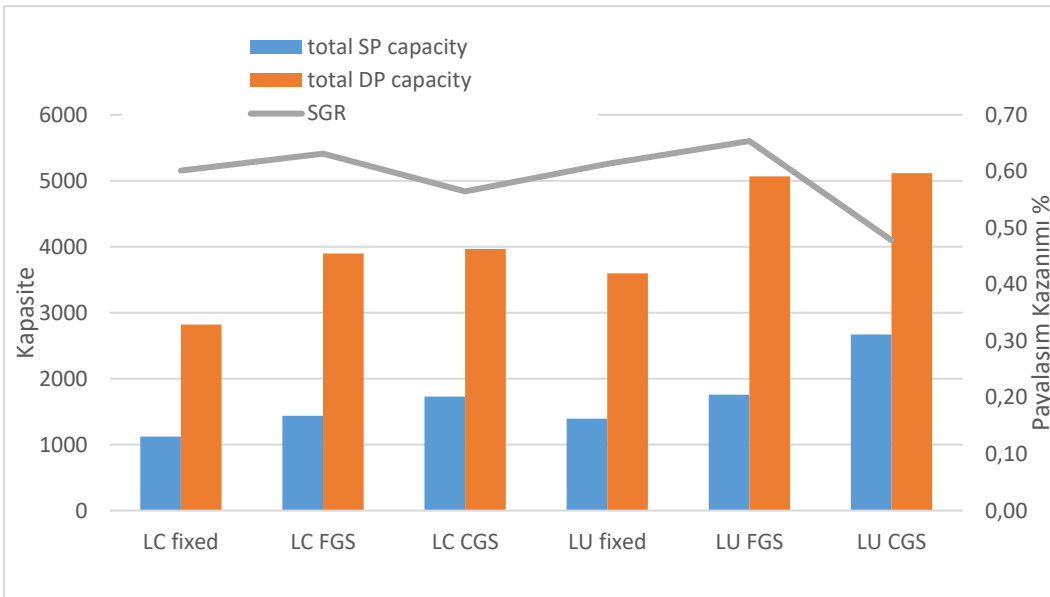


Şekil 5.15. NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının BBR değerleri.



Şekil 5.16. NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının LUR değerleri.

Şekil 5.17 farklı senaryolara ait paylaşım değerlerini sergilemektedir. Karşılaştırmalardan da görülebildiği gibi, LU yaklaşımı kullanan senaryolar kendi LC emsallerinden daha fazla kapasiteyi paylaşımına ayırarak, daha çok trafik isteğine paylaşılan yedek yol koruması yaptıklarını göstermektedirler. Yaklaşık %64 ile en yüksek SGR performansı her iki yaklaşımda da FGS yöntemi ile elde edilmektedir. FGS yöntemi ile aynı toplam yedek iletim ihtiyacı kapasitesine (total_DP_capacity) sahip olan CGS yöntemi, her ışık yolunda paylaşım (SB_capacity) gereğinden fazla kapasite ayırarak toplam paylaşım kapasitesini (total_SP_capacity) arttırmakta ve SGR performansını düşürmektedir.



Şekil 5.17. NSF ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının SGR değerleri.

Çizelge 5.6 NSF ağında benzetimlerin sonuçlarını özetlemektedir. İlk sütunda yaklaşımın kısaltması yer alırken; ikinci sütunda bu senaryonun hangi yol seçme yöntemi ile en iyi sonucu verdiği belirtilmektedir. Maliyet, BBR, LUR ve SGR sütunlarındaki işaretler, bu ölçütlerdeki en iyi değerlerin hangi senaryo ile elde edildiğini belirtmektedir. Zayıf yönlerin belirtildiği sütunda, ilgili yaklaşımların hangi özellikleri sebebiyle performans düşüşü yaşadığına değinilmektedir.

Çizelge 5.6. NSF ağı için bulguların özeti.

Yaklaşım	LU/LC	Maliyet	BBR	LUR	SGR	Zayıf Yönleri
fixed_SB_cap	LU					- İlk trafik isteğinin bant genişliği ihtiyacına göre kapasite ayırmak - Esnek olmamak
CGS_SB_cap	LC			√		Gereğinden çok kapasiteyi paylaşımına ayırarak tımarlama ihtimalini ortadan kaldırmak
FGS_SB_cap	LU	√	√		√	
DB	LU				-	Yedek iletim yolunda paylaşım yapmayarak kaynak kullanım etkinliğini düşürmek

Gerçekleştirilen senaryoların farklı ağlarda nasıl davrandığını gözlemlemek için NSF ağında gerçekleşen benzetimler, Şekil 5.9'da görülen EON ağı üzerinde, LU ve LC yol seçme yaklaşımları, OPT kaynak atama ve paylaşılan PAL yedek yol koruma yöntemlerini kullanan SRRWA algoritması ile tekrarlanmıştır. Yol kurma yöntemlerinin seçim önceliği olarak, EON ağında en iyi performansı sergileyen S7(0315) senaryosu kullanılmıştır. S7 senaryosu uyarınca, yöntemlerin seçim öncelikleri SHTG, MHTG, SHnew ve MHnew sırası ile kullanılmaktadır. Trafik isteklerinin oluşturulması bir önceki benzetimler ile aynı yapıdadır.

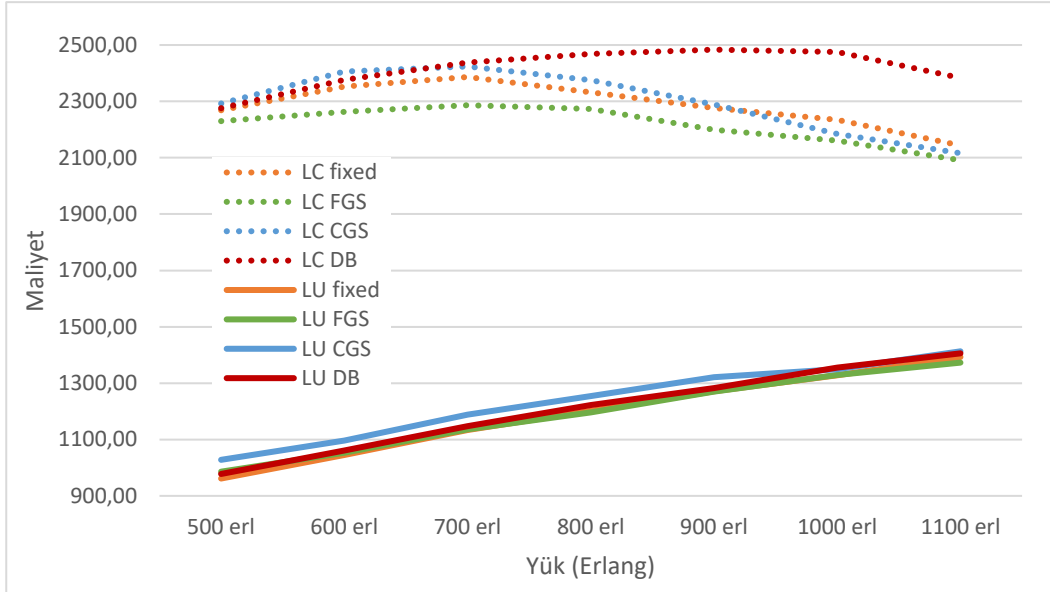
Şekil 5.18'de farklı senaryoların EON ağı üzerinde oluşturdukları iletim maliyetleri görülmektedir. Karşılaştırmalarda da görüldüğü gibi, LU yaklaşımı kullanan senaryolar engelleme yaşamamalarına rağmen, LC senaryolarından belirgin olarak düşük, birbirlerine yakın maliyetler sergilemektedirler. DB yönteminin, paylaşımlı yöntemlere yakın olarak düşük maliyet sergilemesi, paylaşım ihtimalinden çok tımarlama ihtimalinin oluştuğunun göstergesidir. Birbirlerine çok yakın iletim maliyetleriyle çalışan LU senaryoları arasında, FGS yöntemi kullanan senaryo, artan yüklerde en düşük maliyeti sergilemektedir.

Şekil 5.19'da farklı senaryoların BBR değerleri görülmektedir. EON ağının, NSF ağına göre daha kısa hat uzunluklarına sahip olması, ışık yollarında yenilemesiz olarak daha yüksek hat hızlarının desteklenmesini sağlamaktadır. Bu sayede kurulan ışık yolları üzerinde daha büyük kapasiteler oluşmaktadır. Bu özellik sebebiyle, NSF ağında trafik engellemesiyle karşılaşılan yük miktarlarında, EON ağı engelleme yapmamaktadır. Şekil 5.19'da görülebildiği gibi LU yaklaşımı kullanan senaryolar ihmal edilebilecek düşüklükte engelleme yaşarken, LC yaklaşımı kullanan senaryolar artan yük ile birlikte artan miktarda engelleme sergilemektedirler.

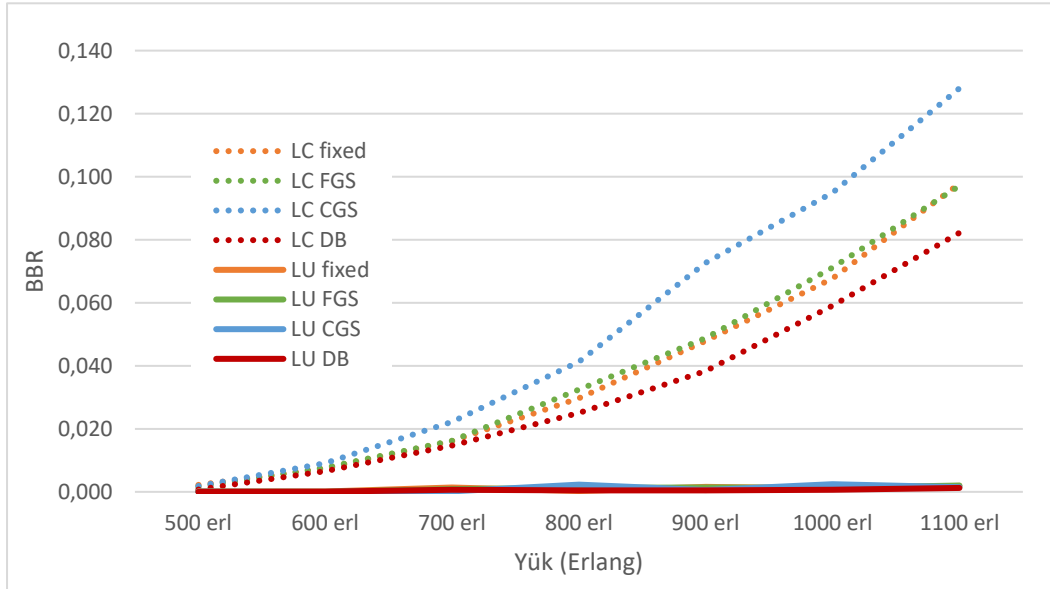
CGS yöntemine ait performans, EON ağında yapılan benzetimlerde, NSF benzetimlerindeki farklı bir sırada konumlanmaktadır. NSF ağında, ikinci en iyi performansa sahipken EON ağında en yüksek engelleme ve en yüksek maliyet değerlerini sergilemektedir. Bunun sebebi, CGS yönteminin SB_capacity artırımı politikasıdır. CGS yöntemi, paylaşım ihtimalinde ışık yolunun tüm atıl kapasitesini paylaşım kapasitesine aktarmaktadır. EON ağında yüksek hat hızlı kurulan ışık yollarında atıl kapasite miktarları çok yüksektir. Bu atıl kapasiteler tımarlama yoluyla kullanıldıklarında maliyet avantajı yaratırken CGS yönteminin yaptığı gibi paylaşım kapasitesine eklendiklerinde gereğinden büyük SB_capacity değeri

oluşmaktadır. Bu kapasitenin paylaşım yoluyla tüketilme ihtimali de düşük olduğu için müsrif bir kapasite kullanımı oluşmakta, engelleme ve maliyet artmaktadır.

LU ve LC yaklaşımlarını kullanan senaryolar arasındaki performans farkı EON ağında daha belirgin olarak görülmektedir. Hep en düşük maliyetli yolları seçen LC yaklaşımı, toplam maliyeti düşürmeyi hedeflerken tımarlama ihtimallerini azalttığı için daha yüksek maliyet oluşturmaktadır.

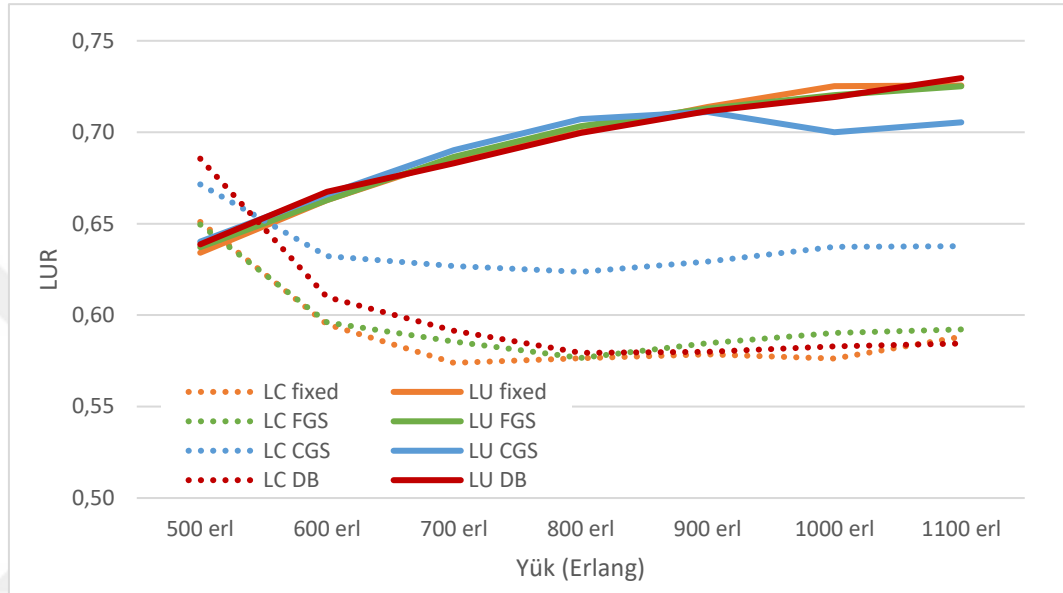


Şekil 5.18. EON ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının iletim maliyeti değerleri.



Şekil 5.19. EON ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının BBR değerleri.

Şekil 5.20’de farklı senaryolara ait LUR değerleri görülmektedir. NSF ağından farklı olarak EON ağında LU senaryolarının artan yüklerde daha yüksek kaynak kullanımı sergilediği görülmektedir. Bunun sebebi, EON ağının yüksek hat hızlı ışık yollarındaki atıl kapasitelerin varlığı ve LU yöntemlerinin sunduğu yüksek tımarlama ihtimalidir. S7(0315) senaryosunun EON ağında daha etkin sonuç vermesi sebebiyle bu benzetimlerde tımarlama yöntemlerine yüksek öncelik verilmiştir. Bu dizilim de LUR sonuçlarını etkilemektedir.

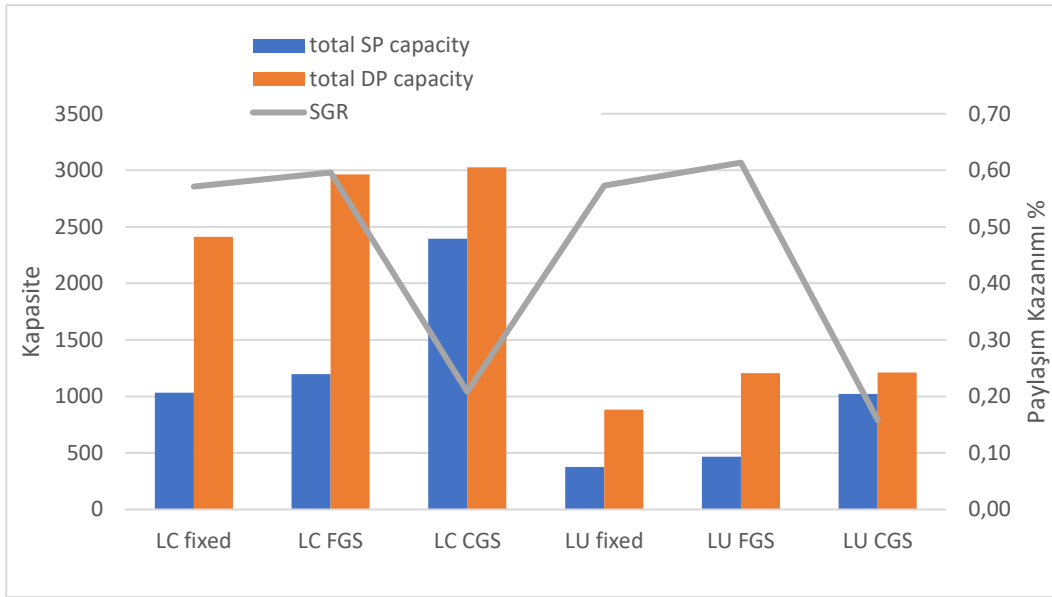


Şekil 5.20. EON ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının LUR değerleri.

Şekil 5.21’de farklı senaryoların paylaşım değerleri görülmektedir. LC senaryoları, paylaşımına daha çok kapasite ayırarak daha çok isteğe paylaşılan yol koruması yaptıklarını göstermektedirler. Her iki yaklaşımda da FGS yöntemleri yaklaşık %60 ile en yüksek SGR değerlerini vermektedir. NSF ağında olduğu gibi EON’da da CGS yöntemlerinde görülen çok düşük değerler, paylaşım kapasitesini gereksiz yere arttırmasından kaynaklanmaktadır. EON ağındaki yüksek hat hızlı ışık yollarının üzerinde daha fazla atıl kapasite olduğu, CGS yöntemi de bu atıl kapasiteyi paylaşım ihtimalinde paylaşım kapasitesine aktardığı için EON ağında daha da düşük SGR değerleri oluşturmaktadır.

Çizelge 5.7 EON ağında elde edilen benzetimlerin sonuçlarını özetlemektedir. İlk sütunda yaklaşımın kısaltması yer alırken; ikinci sütunda bu yaklaşımın hangi yol seçme yöntemi ile en iyi sonucu verdiği belirtilmektedir. Maliyet, BBR ve LUR sütunlarındaki işaretler, bu ölçütlerdeki en iyi değerlerin hangi senaryo ile elde edildiğini belirtmektedir. Zayıf yönlerin belirtildiği sütunda,

ilgili yaklaşımların hangi özellikleri sebebiyle performans düşüşü yaşadığına değinilmektedir.



Şekil 5.21. EON ağında LU ve LC yaklaşımları ile farklı paylaşım kapasitesi senaryolarının SGR değerleri.

Çizelge 5.7. EON ağı için bulguların özeti.

Yaklaşım	LU/LC	Maliyet	BBR	LUR	SGR	Zayıf Yönleri
fixed_SB_cap	LU		√	√		- İlk trafik isteğinin bant genişliği ihtiyacına göre kapasite ayırmak - Esnek olmamak
CGS_SB_cap	LU		√	√		Çok fazla olan atıl kapasitenin tamamını paylaşımına ayırarak tımarlama ihtimalini ortadan kaldırmak
FGS_SB_cap	LU	√	√	√	√	
DB	LU		√	√	-	Yedek iletim yolunda paylaşım yapmayarak iletim maliyetini artırmak

6. SRRWA PROBLEMİNE DİNAMİK HAT HIZI ATAMA (DYN) ÇÖZÜMÜ

İletişim ağlarında trafik yoğunluğu gün içinde değişmektedir. Kullanıcıların iletişim desenlerine göre, günün farklı saatlerinde daha yoğun ya da daha seyrek trafik istekleri oluşmaktadır. Bu desenin gözlemlenip kaynak atama aşamasında kullanılmasıyla daha akılcı kaynak atama politikaları oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada düşünülen düzenleme, gün içindeki trafik yoğunluğu değişimlerine göre saat dilimleri oluşturmak ve kurulan ıfkyollarına içinde bulunduğu saat diliminin yoğunluk değeriine göre hat hızı ataması yapmaktır.

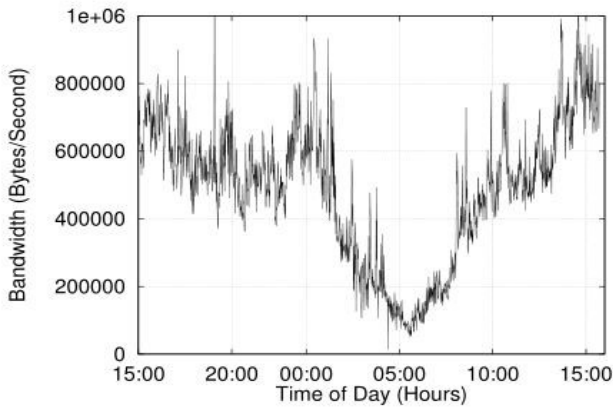
Günlük saat dilimlerini daha gerçekçi bir şekilde oluşturabilmek için üzerinde çalışılan ağın iletişim deseni gözlenmelidir. Ağdaki bazı düğüm ikililerinin belirgin iletişim desenleri olabileceğı gibi ağın genelinin atıl olduğu zamanlar oluşabilmektedir. Yapılan çalışmalar, omurga ağlardaki trafik yoğunluklarının 24 saatlik periyotlarının belirgin olarak tekrar ettiğini göstermektedir (Thompson, Miller, and Wilder 1997). IP trafiğı çok hareketli olmasına rağmen, omurga ağlarda trafiklerin bir araya getirilerek iletilmesi (*aggregation*) sebebiyle daha yumuşak değişimler gözlenmektedir (Gencata 2003). Bu durum yoğunluk dilimlerini oluşturmaya olanak sağlamaktadır. Bu durumların değerlendirilmesi akılcı bir politika üretilmesini sağlayacaktır.

6.1 Dinamik Hat Hızı Atama Yöntemi

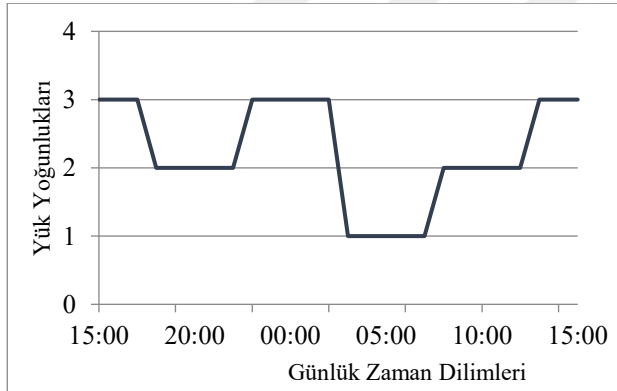
Yoğunluk değişimlerinin göz önünde bulundurulmasının kaynak yönetimini etkileyeceğı öngörülmüş, bu amaçla dinamik hat hızı atama yöntemi (DYN) üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmada, dinamik trafik isteğı modeli için, ağın günlük trafik yoğunluğu bilgisini göz önünde tutan DYN yöntemi geliştirilmiştir (Algin and Tunalı 2017b). En az kullanılan yolu seçme (LU) sezgisel yaklaşımı ve paylaşılan PAL yedek yol koruma yöntemlerini kullanan SRRWA algoritması üzerinde bir dizi senaryo oluşturularak, DYN yöntemi, statik optimal kaynak atama (OPT), uygun en düşük hat hızı (RM) ve mümkün en yüksek hat hızı (MG) atama yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan iletim ağları için gerçek günlük trafik yoğunluğu bilgilerine ulaşılammıştır. Bu sebeple, genel geçer bir kullanım yoğunluğu göz önünde bulundurulması düşünülmüş ve Harvard ana kampüsü ile internet çıkışı arasındaki trafik yoğunluk değişimlerinin (Morris and Dong Lin 2000) iletim

ağlarının geneli için de geçerli olduğu varsayılarak gün içi yoğunluk saat dilimleri oluşturulmuştur. Harvard ağının 24 saatlik trafik izlemi (Morris and Dong Lin 2000) Şekil 6.1’de görülmektedir. Bu değerlere bakarak dilimler oluşturulursa, 0-400.000 bps değerleri arası düşük yoğunluklu, 400.000-700.000 bps değerleri arası orta yoğunluklu ve 700.000 bps ve üstü trafik yükü yüksek yoğunluklu trafik olarak kategorize edilebilmektedir. Bu kategorilere göre günlük yoğunluk dilimleri oluşturulursa, Şekil 6.2’de görülen düşük -1-, orta -2- ve yüksek -3- yoğunluk dilimleri elde edilebilir.



Şekil 6.1. Harvard ağı 24 saatlik trafik izlemi (Morris and Dong Lin 2000).



Şekil 6.2. Harvard ağı trafik izlemine göre oluşturulan günlük saat bazında trafik yoğunluk dilimleri.

Yoğunluk dilimlerini benzetimlerde temsil edebilmek adına, Algoritma 6’da görülen taslak kodda load_ katsayısı kullanımı ile trafik isteklerinin yoğunlukları ayarlanmaktadır. Yapılan çalışma (DYN), trafik yoğunluğunun düşük olduğu zamanlarda kaynak israfını önlemek için RM (line_rate_str=1), yüksek olduğunda tımarlamayı arttırmak için MG (line_rate_str=2), orta yoğunluklu trafik diliminde ise OPT (line_rate_str=6) yöntemlerini dinamik olarak seçerek maliyeti en iyileştirmeye çalışmaktadır. Çalışma kapsamında dinamik hat hızı atama (dynamic_line_rate_str==2) yöntemi, statik (dynamic_line_rate_str==1) RM, MG ve OPT yöntemleriyle karşılaştırılmak-

tadır. Hat hızı atama yönteminin statik olması, tüm benzetim süresince, trafik yoğunluğu değişiminden bağımsız olarak, aynı hat hızı atama politikasının kullanılması anlamına gelmektedir.

6.2 Deneyisel Bulgular

Benzetimler Şekil 5.1’de görülen NSF ağı üzerinde LU yaklaşımı ve paylaşılan PAL yedek yol koruma yöntemlerini kullanan SRRWA algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.1’de literatürden alınan toplam 1 Tbps trafiği temsil eden trafik istekleri matrisi görülmektedir. Matriste Gbps cinsinden, kaynak ve hedef düğüm eksenleri ile belirtilen alanlarda temsil edilen trafik istekleri benzetimde; rastgele sırada, ve bir anda tek trafik isteği olacak şekilde ele alınarak dinamik trafik modeli oluşturulmuştur. Algoritma 6’da da görülebildiği gibi, trafik isteğinin geliş zamanında geçerli olan yoğunluk dilimine göre, bant genişliği istekleri $load_katsayısı$ ile düzenlenmektedirler. Yöntemi farklı yüklerde denemek adına, ağdaki trafik miktarını da arttırmak için trafik matrisinde bulunan istekler tekrarlı olarak (10X, 11X, ..., 15X) kullanılmıştır. Bu durumda 10X yük ile çalışan benzetimde en az 10 Tbps trafik isteği bulunmaktadır. Trafik miktarının benzetim başında net olarak belirtilememesinin sebebi, benzetim süresince farklı yoğunluk dilimlerinde $load_katsayısına$ bağlı olarak trafik miktarının artırılmasıdır. Benzetimlerde üretilen trafik isteklerinin toplam yükü, sonuçlar raporlanırken yük eksenlerinde gösterilmektedir.

Algoritma 6 Dinamik hat hızı atama (DYN) algoritması

verilen. Trafik yoğunluk bilgisi, trafik isteği bilgisi $T_{sd}(B, h_t)$

çıkıtlar. Yoğunluk dilimine göre bant genişlik isteği düzenlenmiş trafik isteğinin yönlendirmesi

```

1  if (intensity_period == HIGH)
2      if (dynamic_line_rate_str_ == DYN) line_rate_str_ = MG
3      load_ = 6
4  else if (intensity_period == LOW)
5      if (dynamic_line_rate_str_ == DYN) line_rate_str_ = RM
6      load_ = 2
7  else if (intensity_period == MEDIUM)
8      if (dynamic_line_rate_str_ == DYN) line_rate_str_ = OPT
9      load_ = 4
10 end if
11 SRRWA( $T_{sd}(B * load_, h_t)$  line_rate_str_)

```

Çizelge 6.2’de oluşturulan dinamik trafik isteklerinin hat tutma (h_t) süreleri görülmektedir. Hat tutma süresi, dinamik trafik isteğinin geliş (a_t) zamanından h_t birim zaman sonra sonlanacağını belirtmektedir.

Çizelge 6.1. NSF ağı için trafik istekleri matrisi (toplam 1 Tbps) (Nag and Tornatore 2008).

<i>s/d</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	2	1	1	1	4	1	1	2	1	1	1	1	1
2	2	0	2	1	8	2	1	5	3	5	1	5	1	4
3	1	2	0	2	3	2	11	20	5	2	1	1	1	2
4	1	1	2	0	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2
5	1	8	3	1	0	3	3	7	3	3	1	5	2	5
6	4	2	2	1	3	0	2	1	2	2	1	1	1	2
7	1	1	11	2	3	2	0	9	4	20	1	8	1	4
8	1	5	20	1	7	1	9	0	27	7	2	3	2	4
9	2	3	5	2	3	2	4	27	0	75	2	9	3	1
10	1	5	2	2	3	2	20	7	75	0	1	1	2	1
11	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	0	2	1	61
12	1	5	1	2	5	1	8	3	9	1	2	0	1	81
13	1	1	1	1	2	1	1	2	3	2	1	1	0	2
14	1	4	2	2	5	2	4	4	1	1	61	81	2	0

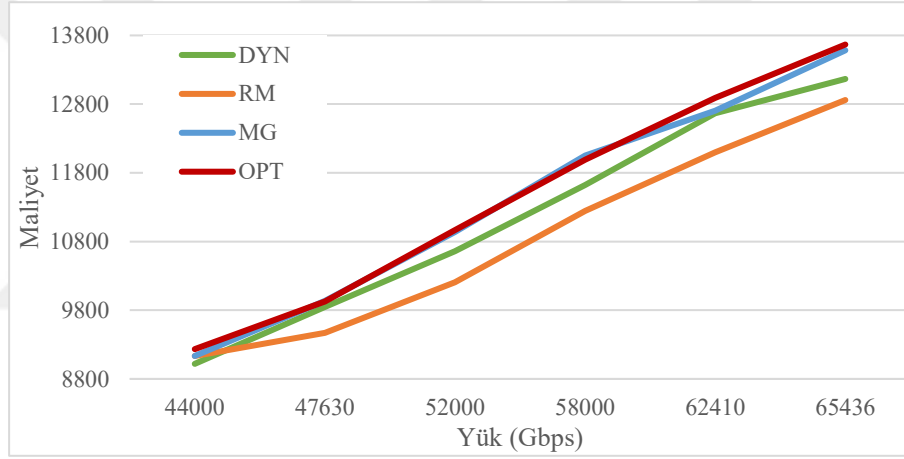
Çizelge 6.2. NSF ağı trafik istekleri için oluşturulan hat tutma (h_t) süreleri matrisi.

<i>s/d</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	2	1	3	4	4	2	1	2	5	1	2	7	10
2	2	0	2	1	8	2	4	5	3	5	10	5	11	4
3	1	2	0	7	3	2	11	4	5	2	14	1	1	2
4	3	1	7	0	18	12	2	1	2	2	11	2	21	6
5	4	8	3	18	0	3	3	1	3	3	1	5	2	5
6	4	2	2	12	3	0	2	1	8	2	13	9	1	3
7	2	4	11	2	3	2	0	9	4	20	1	8	12	4
8	1	5	4	1	1	1	9	0	4	7	2	3	2	7
9	2	3	5	8	3	2	4	4	0	15	2	9	13	1
10	5	5	2	2	3	2	20	7	15	0	1	1	25	8
11	1	10	14	11	1	13	1	2	2	1	0	25	11	10
12	2	5	1	2	5	9	8	3	9	1	25	0	1	20
13	7	11	1	21	2	1	12	2	13	25	11	1	0	2
14	10	4	2	6	5	3	4	7	1	8	10	20	2	0

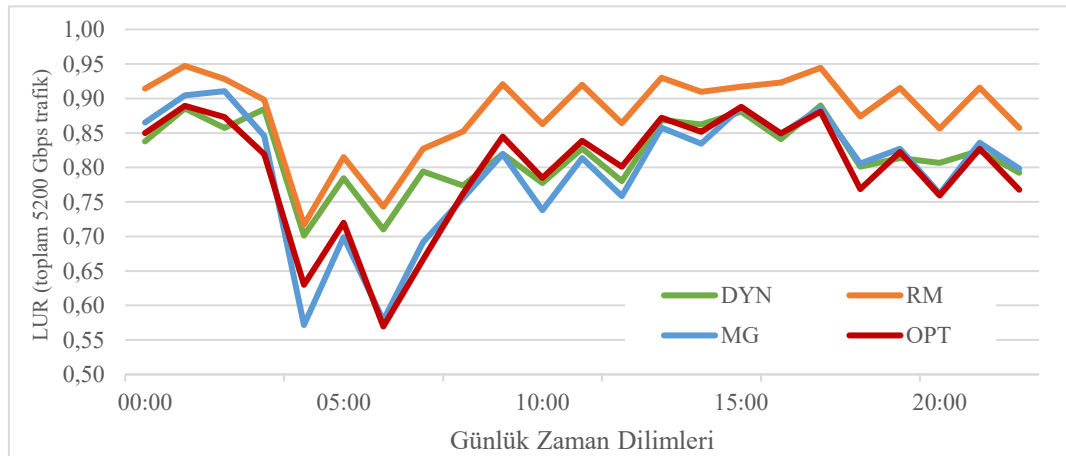
Kısa hat tutma sürelerine sahip dinamik trafik modelinde engellemenin düşük olması beklenmektedir. Ortalama 5.7 birim zaman hat tutma süresine sahip benzetimlerde, bu beklenti karşılanacak şekilde, tüm senaryoların BBR değerlerinin birbirlerine yakın olarak yaklaşık 0.015 civarında olduğu gözlenmiştir. BBR değerlerinin birbirlerine yakın olmasına rağmen senaryolara ait iletim maliyetleri farklılık göstermektedir. Şekil 6.3'te farklı senaryolara ait iletim maliyetleri karşılaştırması görülmektedir. Karşılaştırmalarda en düşük maliyetin statik olarak RM yöntemini kullanan senaryo tarafından üretildiği görülmektedir. RM yöntemi, her durumda en düşük hat hızlarında düşük maliyetli almaç-göndermeçler kullanarak toplam maliyeti de düşük tutmaktadırlar. Statik OPT ve MG yöntemleri düşük yoğunluklu dilimlerde bile en yüksek hat hızlarında ışıkyolları kurarak toplam maliyetin yükselmesine sebep olmuşlardır. Önerilen DYN yöntemi tüm yüklerde ortalama bir performans sergilemektedir. DYN, RM yönteminden ortalama %1 daha yüksek maliyet sunarken, MG ve OPT yöntemlerinden ortalama %0.2 daha düşük değerle çalışmaktadır.

Şekil 6.4'te farklı senaryolara ait kaynak kullanım değerleri görülmektedir. LUR değerlerine bakıldığında, tüm yöntemler için kaynak kullanımının, trafik yoğunluk dilimleri grafiği ile benzerlik gösterdiği görülebilmektedir. Eğrilerin keskin köşelere sahip olmasının sebebi, LUR ölçümlerinin belirli zaman aralıklarıyla yapılmasıdır. Daha sık yapılacak ölçümlerde eğrilerin daha yumuşak hatlara sahip olması mümkün olacaktır.

Düşük trafik yoğunluğunun olduğu dilimlerde LUR eğrileri belirgin olarak düşüş yaşarken, orta ve yüksek yoğunluklu dilimlerde artış göstermektedir. Tüm yoğunluk dilimlerinde RM yöntemi en düşük hat hızında ışık yolları kurması sebebiyle ortalama %88 ile en etkin kaynak kullanımını sergilemektedir. Bu yöntemle kurulan ışık yolları üzerinde atıl kapasite miktarı az kalmakta ve kurulan kaynakların kullanımı artmaktadır.



Şekil 6.3. NSF ağında farklı hat hızı senaryolarının iletim maliyeti değerleri.



Şekil 6.4. NSF ağında farklı hat hızı senaryolarının LUR değerleri.

Önerilen DYN yöntemi, orta ve yüksek yoğunluklarda MG ve OPT yöntemlerine benzer kaynak kullanımı sunarken, düşük yoğunluklu trafik diliminde

RM yönteminin etkinliğine yakın bir performans sunmaktadır. Böylece tüm yoğunluk dilimlerinde ortalama %82 LUR değeri sunarak, keskin iniş çıkışlar sergilememiştir. OPT ve MG yöntemleri orta ve yüksek yoğunluk dilimlerinde DYN yöntemine yakın LUR değerleri verirken, düşük yoğunluklu dilimlerde kötü bir kaynak kullanımı performansı sergilemektedirler. %90 ila %55 arasında dalgalanan LUR değerleri sergileyen OPT ve MG yöntemleri ortalama %80 kaynak kullanım performansı göstermektedir.

Kurulan senaryolarda çok sayıda, düşük bant genişliği ihtiyacına sahip trafik isteği bulunması sebebiyle, düşük hat hızlı ışıkyollarının kurulumu yeterli kapasite sunmakta, tımarlama için uygun atıl kapasite kalmasını sağlamakta ve daha düşük maliyet oluşturmaktadır. Benzer şekilde hat tutma sürelerinin kısa olduğu trafik desenlerinde ışıkyollarının yaşam süresi kısa olmakta ve tımarlama ihtimali azalmaktadır. Bu sebeplerle, kurulan senaryolarda ortalama bir maliyet sergileyen DYN yönteminin avantajlarını daha rahat sergileyebilmesi için, daha yüksek trafik yükleri ve daha uzun hat tutma süreleri ile benzetimlerin tekrar edilmesi uygun olacaktır. Bu amaçla, trafik üreticinde geliş aralıkları ve hat tutma süreleri parametreleri ile oynanarak daha yüklü dinamik trafik istekleri oluşturulmalıdır.

Çizelge 6.3 NSF ağında yapılan benzetimlerin sonuçlarını özetlemektedir. İlk sütunda yöntemlerin kısaltması yer almaktadır. Maliyet, BBR ve LUR sütunlarındaki işaretler, bu ölçütlerdeki en iyi değerlerin hangi senaryo ile elde edildiğini belirtmektedir. Zayıf yönlerin belirtildiği sütunda, ilgili yöntemlerin hangi özellikleri sebebiyle performans düşüşü yaşadığına değinilmektedir.

Çizelge 6.3. NSF ağı için farklı hat hızı senaryolarının bulgu özeti.

Yöntem	Maliyet	BBR	LUR	Zayıf Yönleri
DYN		√		Tımarlama olanağının tüm hat hızlarındaki ışıkyollarında var olduğunu fark etmeyerek, yoğun trafik dilimlerinde yüksek hat hızlı ışıkyolları kurarak maliyeti arttırmak
OPT		√		Hep yüksek hat hızlarında ışıkyolu kurarak; - iletim maliyetini yükseltmek - kaynak kullanımı etkinliğini düşürmek
RM	√	√	√	
MG		√		Hep yüksek hat hızlarında ışıkyolu kurarak; - iletim maliyetini yükseltmek - kaynak kullanımı etkinliğini düşürmek

7. SRRWA PROBLEMİNE SECONDPASS HAT HIZI ATAMA (SP) ÇÖZÜMÜ

Literatürdeki çalışmalarda, bir ağın hat hızı atama politikasına tasarım aşamasında karar verildiği görülmektedir. Seçilen politikaya göre, trafik isteklerine ışık yolları kurulurken, uygun en düşük (*rate matching*-RM) ya da mümkün en yüksek (*maximize grooming*-MG) hat hızı yöntemlerinden biri kullanılmaktadır (Batayneh et al. 2011). Tımarlama ihtimalinin düşük olduğu, genellikle küçük bant genişliği isteklerine sahip trafiklerin bulunduğu ağlarda RM politikasının kullanılması makulken, yüksek tımarlama oluşabilecek ağlarda almaç-göndermeçlerdeki maliyet indirimi (*volume discount*) sayesinde MG politikasının seçilmesi etkin sonuçlar üretmektedir. Ancak dinamik iletim ağlarında zaman periyodlarında trafik yoğunlukları tahmin edilebilirken, tımarlamaya yatkınlık durumu tahminlenebilir bir durum değildir. Bu durumda hat hızı politikasının esnek olması daha etkin sonuçlar elde edilmesine fayda sağlayacaktır.

MLR ağ özelliğinden faydalanılarak hat hızı atama politikası yumuşatılabilmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen *SecondPass* (SP) yöntemi dinamik olarak ışık yolu bazında hat hızı seçme politikası uyguladığı için, hat hızı ataması politikasına esneklik sağlanmıştır (Algin and Tunali 2015). Böylece her iki hat hızı atama yönteminin de avantajlarından faydalanarak, ihtiyaç olan ışık yollarında MG hat hızı kullanımına geçilmesi, ihtiyaç olmayan ışık yollarında da RM hat hızının kullanılması mümkün olmuştur.

7.1 SecondPass Yöntemleri

SP yöntemi, yeni kurulan bir ışık yolunda, o an işlenen trafik ihtiyacını karşılayan en düşük hat hızının atanmasını sağlamaktadır. Daha sonra gelen bir $T_{sd}(B, h_t)$ trafik isteği için, var olan ışık yollarından s - d düğüm çifti arasında olanlar (`lightpaths[s][d][]`) üzerinde tımarlama ihtimali aranmakta ve tüm uygun ışık yollarının atıl kapasite (`lightpaths[s][d][l].available_capacity`) miktarları incelenmektedir. Klasik tımarlama yönteminde, hiçbir ışık yolunun atıl kapasitesi yeni trafiğin ihtiyacını (B) karşılayamıyorsa, trafiğe yeni ışık yolu kurulumu yapılmaktadır. SP yönteminde ise bu durumda ikinci bir tarama turu gerçekleştirilmektedir. İkinci turda, s - d düğüm çifti arasındaki uygun ışık yolları tek tek ele alınarak desteklediği etkin en yüksek hat hızları (`lightpaths[s][d][l].max_feasible_line_rate`) kontrol edilmektedir. İncelenen bir ışık yolunda, halihazırdaki hat hızı yükseltip desteklediği en yüksek hat hızına

çıkarıldığında oluşacak atıl kapasite yeni trafiğin ihtiyacını karşılayabilecek büyüklükte ise; o ışık yolunun hat hızı değiştirilmekte, üzerinde hali hazırda iletim yapmakta olan eski trafik/ler ile yönlendirmesi yapılan yeni trafik bu ışık yolu üzerinde tımarlanarak iletme devam edilmektedir. Bu düzenleme sırasında ışık yolu üzerinde iletimi yapılan eski trafik/ler, geçici olarak yedek iletim yollarına aktarılmaktadırlar.

Görece daha maliyetli olan yüksek hat hızlarına ait almaç-göndermeçlerin gereksiz durumlarda kullanılması iletim maliyetini arttırmaktadır. Ancak, yüksek bant genişliği ihtiyacındaki trafikler için, birden çok düşük hat hızına ait almaç-göndermeç yerinde tek bir yüksek hat hızlı almaç-göndermeç kullanmak maliyet indirimi sebebiyle daha avantajlıdır. SP yöntemi kullanacağı donanım dinamik olarak karar verebildiği için maliyeti optimal seviyede tutabilmektedir. Diğer yandan SP, yeni dalgaboylarını işgal ederek yeni ışık yolu kurmak yerine, destekleyebildiği potansiyelinden daha düşük kapasite ile kurulan ışık yollarının tüm kapasitelerini kullanıma açması sayesinde ağ kaynaklarının kullanımını da daha etkin hale getirmektedir.

SP yöntemin en büyük dezavantajı hali hazırda aktif olan trafiklerin rahatsız edilmesidir. Çalışma kapsamında, bu dezavantajı bertaraf eden ancak SecondPass yönteminin esnekliğini kullanmayı da mümkün kılan *SecondPass_for_Learning* (SPL) yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemin başlıca farklılığı, SecondPass taramasını yaparken uygun bir tımarlama ihtimali bulursa bu ışık yolunun aktif trafik iletimini kesmeden *s-d* kaynak-hedef düğümlerini öğrenmesidir. İşlemekte olduğu trafik isteğine servis vermek için yeni bir ışık yolu oluştururken, bu sayede öğrendiği *s-d* kaynak-hedef düğümleri arasında daha sonraki trafik isteklerine MG hat hızı ile ışık yolu ataması yapacaktır. Böylece ileride oluşabilecek tımarlama ihtimalleri en iyi şekilde değerlendirilebilecektir. Yanılma payı her zaman mevcut olmakla birlikte, trafik desenlerinin özbenzeşliği (*self-similar*) sebebiyle öğrenilen *s-d* kaynak-hedef düğümlerinin ağda yoğun aktiviteye sahip olma ihtimali yüksek olduğundan yöntem etkinlik göstermektedir.

Bir diğer SecondPass varyasyonu olan *SecondPass&Learning* (SP+L) yöntemi ise aynı SecondPass yönteminde olduğu gibi, aktif ışık yolunun hat hızını yükseltirken, öğrenme mekanizmasını da aktif tutarak yoğun iletişimdeki düğüm ikililerinin gelecek trafiklerinin kesilmesine mani olmaktadır. Her üç varyasyona ait taslak kod Algoritma 7’de görülmektedir.

Öğrenme mekanizmalarının dezavantajı, öğrenilen s - d düğüm çiftleri arasındaki gelecek tüm trafik isteklerine yüksek hat hızı atması yapmasıdır. Ancak bu seçenek olmadığı durumda da hep SP ihtiyacı doğduğunda aktif trafik akışının rahatsız edilmesi söz konudur. Bu durum atıl kalan kapasite ve aktif trafik kesilmesi arasında bir ödünleşim (*tradeoff*) doğurmaktadır. Bu ödünleşimde ağın trafik eğilimine göre karar verilmelidir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için bir zaman aşımı mekanizması kullanmak düşünülebilir. Bu şekilde, öğrenilen düğüm çiftlerinin belirli bir süre sonunda unutulması uzun süre bu bilgi ile karar verilmesinin önüne geçebilecektir.

Algoritma 7 SecondPass hat hızı atama politikası ve varyasyonlarına ait algoritma

```

verilen.  $T_{sd}(B, h_r)$  trafik isteği, ağda var olan  $s$ - $d$  arası ışık yolları (lightpaths[s][d][l])
çıktılar. Uygun ışık yolunun hat hızının artırılması
1  for (l=1; l <= #lightpaths[s][d][l]; l++)
2      if ((lightpaths[s][d][l].line_rate < lightpaths[s][d][l].max_feasible_line_rate) &&
3          ((lightpaths[s][d][l].max_feasible_line_rate) - (lightpaths[s][d][l].line_rate) +
4          (lightpaths[s][d][l].available_capacity) >= B) )
5          if (SP || SP+L)
6              lightpaths[s][d][l].available_capacity +=
7                  lightpaths[s][d][l].max_feasible_line_rate - lightpaths[s][d][l].line_rate
8              lightpaths[s][d][l].line_rate = lightpaths[s][d][l].max_feasible_line_rate
9              // yeni trafiği bu ışık yolu üzerinde tımlarla
10             ...
11             end if
12             if (SPL || SP+L)
13                 spLog(s,d, lightpaths[s][d][l]); // kayıt oluştur
14             end if
15             break
16         end if
17     end for

```

Algoritma 7’de de görüldüğü gibi, hat hızı artırımı sadece incelenen ışık yollarından tımlamaya uygun olanı üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bir turda yeni trafiğin sadece bir iletim yolu için tımlama ihtimali taranmaktadır. Bir başka deyişle, yeni gelen trafiğin öncelikle esas iletimi için uygun bir ışık yolu bulunup tımlama ihtimali incelenmektedir. Ancak uygun tımlama işlemi gerçekleştikten sonra trafiğin yedek iletimi için ışık yolu aramasına geçilmektedir. Bu durumda her iki iletim yolu için de işlem ayrı ayrı ve diğerinden bağımsız olarak gerçekleştirilmektedir.

Tüm yedek yol atamalarında olduğu gibi, bir trafiğin yedek iletim yolu için SP yöntemleri kullanıldığında da, o trafiğe atanan esas iletim yolu ile incelenen yedek yol adayı ışık yolunun birbirinden hat ayrık olması koşulu sağlanmalıdır. İncelenen ışık yolu, desteklediği en yüksek hat hızına çıkarıldığında, yeni trafiğin

yedek iletim ihtiyacını karşılayabiliyorsa, bu ışık yolunun iletim hızı en yüksek hat hızına çıkarılmakta, ışık yolu yeni trafiğe yedek iletim yolu olarak atanmakta ve yeni trafik o ışık yolunu kullanan eski trafik/lerle birlikte tımarlanarak iletme devam edilmektedir.

SP yöntemlerinde, IMUX ile trafiği parçalara bölerek yönlendirme yapma seçeneği de göz ardı edilmektedir. Bunun başlıca sebebi, tımarlama yapılacak atıl kapasitelerin farklı ışık yollarında farklı büyüklüklerde olabileceği gerçeğidir. Bu durumda trafiği parçalara bölme işleminin basit yapısı bozulacağından ve her parçanın iletim hızı farklı olabileceğinden iletimin kontrolü karmaşıklaşacaktır. Benzer şekilde basitliğin korunması için SP yöntemi sadece SHTG kullanırken, MHTG yönteminin de sisteme eklenmesi mümkündür.

Literatürde ışık yolu değişikliği (*lightpath switching*) yapan çalışmalar (Charbonneau et al. 2012) görülmesine rağmen, ışık yollarında hat hızı değişikliği yapan çalışmaya başka rastlanmamaktadır.

7.2 Deneysel Bulgular

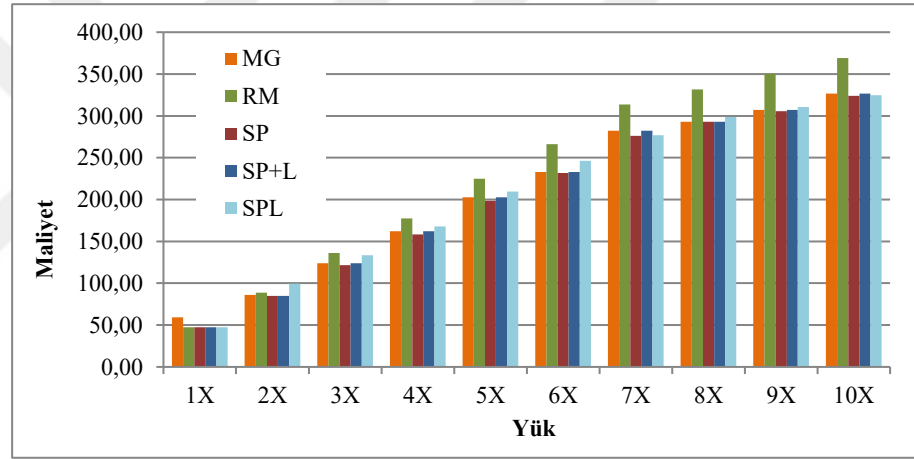
SecondPass algoritmalarının ilk benzetimi, Şekil 4.1'deki 6 düğümlü örnek ağ üzerinde, Çizelge 7.1'deki trafik istekleri matrisi kullanılarak test edilmiştir. Örnek ağda hatların üzerinde km cinsinden hat uzunlukları belirtilmektedir. Çizelgede gösterilen trafik istekleri, kaynak (*s*) ve hedef (*d*) düğüm eksenleri ile belirtilen alanlarda Gbps cinsinden temsil edilmektedirler. Maliyet hesaplamalarında almaç-göndermeç maliyetleri Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi varsayılmıştır. Çizelge 7.1'deki trafik istekleri, dinamik artımlı trafik modeline uygun şekilde, rastgele sırada, ve bir anda tek trafik isteği oluşturularak kullanılmaktadır. Dinamik artımlı trafik modelinin seçilmesindeki motivasyon trafik tımarlama olasılığını arttırmaktır. Aynı amaçla, trafik miktarını da arttırmak için trafik matrisinde bulunan istekleri tekrarlı olarak (1X, 2X, .. 10X) kullanılmıştır. Bu durumda 2X yük ile çalışan benzetimde toplam 600 Gbps trafik isteği bulunmaktadır. Her fiberde 80 dalgaboyu olduğu ve her düğümde tüm hat hızları için yeter sayıda almaç-göndermeç bulunduğu varsayılmıştır.

Performans ölçütleri olarak iletim maliyeti ve BBR sonuçları değerlendirilmiştir. BBR değeri %20'nin üzerine çıktığında ağın doygunluğa ulaştığı ve trafiklere servis sağlayamadığı varsayılmaktadır.

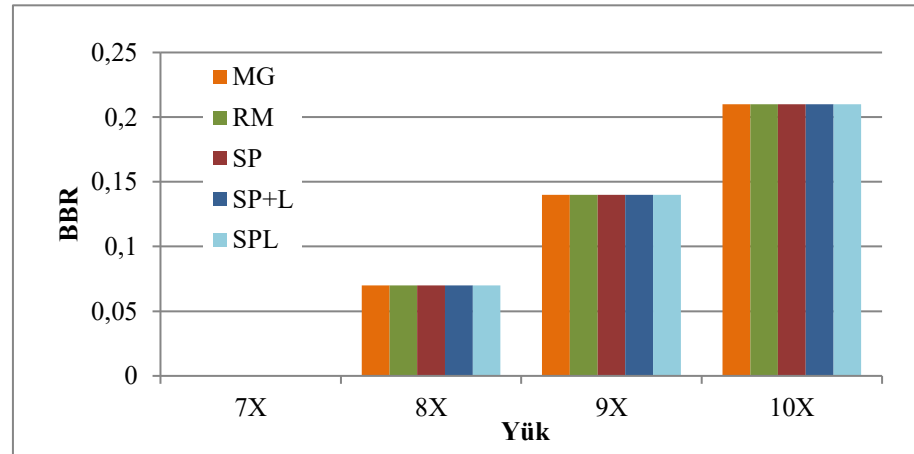
Çizelge 7.1 6 düğümlü örnek iletim ağı için trafik istekleri matrisi (toplam 300 Gbps).

s/d	1	2	3	4	5	6
1	0	20	0	80	40	30
2	0	0	50	0	40	0
3	0	0	0	0	0	0
4	10	0	0	0	0	30
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

Kurulan senaryo ile, üç SecondPass varyasyonu ile en yüksek hat hızı atama (MG) ve en düşük hat hızı atama (RM) yöntemleri kullanılarak MLR ağlarda yönlendirme yapılmıştır. Testler sonucunda elde edilen verilerden, anılan hat hızı atama yöntemlerinin iletişim maliyetleri karşılaştırması Şekil 7.1’de görülmektedir. Maliyetin Şekil 7.2’deki BBR değerleri ile birlikte değerlendirilmesi uygun olacaktır.



Şekil 7.1. 6 düğümlü örnek iletim ağında hat hızı atama yöntemlerine ait iletim maliyetleri.



Şekil 7.2. 6 düğümlü örnek iletim ağında hat hızı atama yöntemlerine ait BBR değerleri.

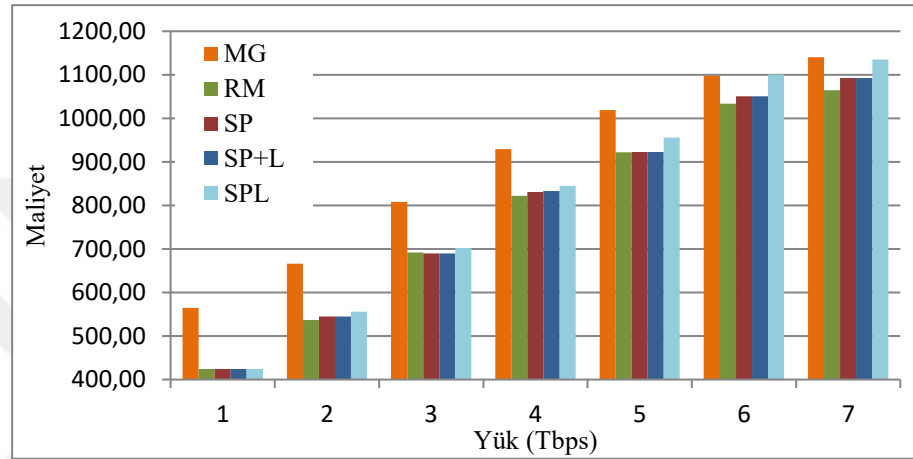
1X yükte (toplam 300 Gbps) RM ve SP yöntemlerinin maliyetleri eşit görülmektedir. Bunun sebebi hiçbir tımarlama ihtimali oluşmadığı için

ışık yollarının hep yeterli en düşük hat hızları ile kurulmasıdır. Beklendiği gibi MG yöntemi hep en yüksek hat hızlı almaç-göndermeçleri kullandığı için en yüksek maliyete sahiptir. Artan yüklerde RM yönteminin daha yüksek maliyet oluşturduğu görülmektedir. Büyük bant genişliğine ihtiyaç duyan trafiklerden oluşan bu senaryoda; genellikle yeter seviyede düşük hat hızlı ışık yolları kuran RM yöntemi, tımarlama ihtimalini düşürdüğü için ve en yüksek hat hızında ışık yolu kurmayıp dalga boylarının potansiyel kapasitelerini kullanmadığı için, dalga boylarını mürifçe kullanmaktadır. Diğer yöntemler ise dalga boylarının desteklediği en yüksek hat hızlarını seçtikleri için maliyet indiriminin avantajını kullanmışlardır. SP yöntemi, MG yöntemine yakın ancak daha düşük maliyetle çalışmaktadır. Bunun sebebi, yüksek hat hızlı donanımı sadece gerektiğinde kullanmasıdır. SP varyasyonları arasındaki maliyet farkı hat hızı değiştirme politikalarındaki farklılıklar sebebiyle ortaya çıkmaktadır. Sadece gerektiği zamanlarda, gerekli ışık yollarında hat hızı artırımı yapan SP diğerlerinden düşük maliyet sergilemektedir. Öğrendiği düğüm ikilileri arasında sürekli en yüksek hat hızında ışık yolları kuran SPL yöntemi, artan trafik isteklerinde MG yöntemine yakın maliyetlerde çalışmaktadır.

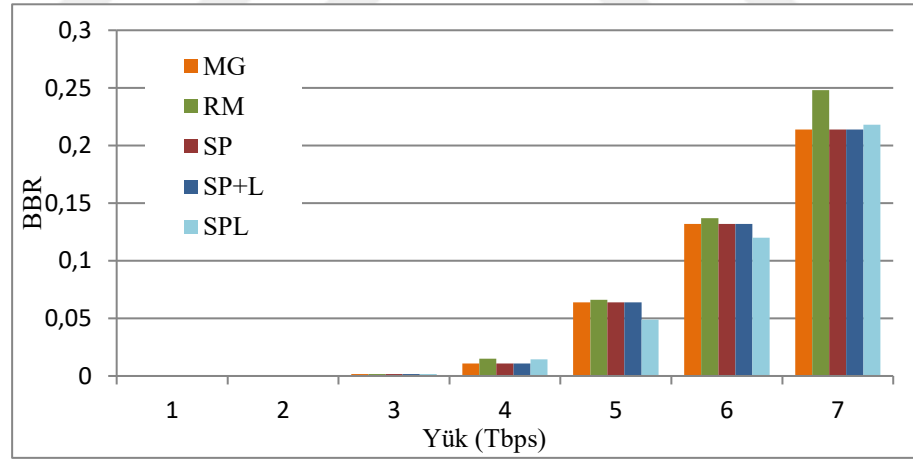
Şekil 7.2’de görülen BBR sonuçları değerlendirildiğinde, SP yöntemlerinin diğer hat hızı atama yöntemleriyle aynı engelleme oranına sahip olduğu görülmektedir. Eşit BBR değerlerine rağmen tüm yüklerde, SP yöntemi en düşük maliyeti sergilemektedir. Ortalama iletim maliyetlerine bakılırsa, SP yöntemi, MG yönteminden yaklaşık %2, RM yönteminden ise yaklaşık %12 düşük maliyet ile çalışmaktadır.

SecondPass algoritmalarının benzetiminde kullanılan ikinci ağ, Şekil 5.1’de görülen 12 düğümlü NSF ağıdır. Çizelge 6.1’de literatürden alınan toplam 1 Tbps trafiği temsil eden trafik istekleri matrisi görülmektedir. Matriste Gbps cinsinden, kaynak ve hedef düğüm eksenleri ile belirtilen alanlarda temsil edilen trafik istekleri benzetimde, rastgele sırada, ve bir anda tek trafik isteği olacak şekilde ele alınarak dinamik artımlı trafik modeli oluşturulmuştur. Trafik miktarını da arttırmak için trafik matrisinde bulunan istekler tekrarlı olarak (1X, 2X, .. 10X) kullanılmıştır. Bu durumda 2X yük ile çalışan benzetimde toplam 2 Tbps trafik isteği bulunmaktadır. Benzetim ortamında kullanılan tüm parametreler 6 düğümlü örnek ağda yapılan testlerdekiyle aynıdır. Hat hızı atama yöntemlerine ait iletişim maliyetleri karşılaştırması Şekil 7.3’te görülmektedir. Şekil 7.4 yapılan testler sonucu oluşan BBR değerlerini göstermektedir.

Çizelge 6.1'deki gibi, küçük bant genişliği ihtiyaçlarına sahip çok sayıda trafik isteğini barındıran bir trafik deseninde düşük hat hızlarına ait almaç-göndermeçlerin kullanılması daha etkin maliyet değerleri oluşturmaktadır. Bunun sebebi, ışık yolları en düşük hat hızıyla bile kurulsa üzerlerinde klasik trafik tımarlama ile kullanılabilir atıl kapasitenin mevcut olmasıdır. Bu durumda, Şekil 7.3'te de görülebildiği gibi MG yöntemi tüm yüklerde en yüksek maliyeti oluşturmaktadır. SP yöntemlerinin, RM yöntemine yakın ancak daha yüksek maliyetle çalıştığı görülmektedir.



Şekil 7.3. NSF ağında hat hızı atama yöntemlerine ait iletim maliyetleri.



Şekil 7.4. NSF ağında hat hızı atama yöntemlerine ait BBR değerleri.

Maliyet avantajına rağmen, Şekil 7.4'te görülebildiği gibi, yüksek yüklerde RM yönteminin BBR değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi, RM yönteminin ışık yolu kurarken dalga boylarını mürşifçe harcaması ve dalga boylarının potansiyel kapasitelerini kullanmamasıdır. Tüm yüklerde MG ve SP yöntemleri birbirlerine yakın engelleme oranları sunmaktadır. SP yönteminin engelleme oranının hızla yükseldiği (yaklaşık %25) yüklerde (ör. 7 Tbps) bile, MG

ve SP yöntemleri ile ağ doyuma ulaşmamakta ($BBR \approx 0.20$) ve gelen trafik isteklerine servis sunabilmektedir.

Ortalama iletim maliyetlerine bakılırsa, SP yöntemi, MG yönteminden yaklaşık %9 daha düşük maliyet ile çalışırken, RM yönteminden yaklaşık %3 daha yüksek maliyet sergilemektedir.

7.3 Sonuçlar

Bu çalışmada geliştirilen SecondPass yöntemleri SRRWA problemine dinamik bir hat hızı atama politikası sunmaktadır. Önerilen üç varyasyonun (SP, SPL, SP+L) birbirlerine göre farklı avantajları mevcuttur. SP yöntemi sadece gerek duyulan ışık yollarında hat hızı değişikliği yaparken, öğrenme tabanlı çalışan SPL ve SP+L yöntemleri, aralarında bir kez hat hızı artırımına ihtiyaç duyulmuş (s, d) düğüm çiftleri arasında gelecek tüm trafik isteklerinde yüksek hat hızlı ışık yolları kurmaktadır. Bu farklılık SP ve SPL/SP+L varyasyonları arasında maliyet ve BBR farklılığı gözlenmesine sebep olabilmektedir. Sonuç olarak SPL ve SP+L yöntemleri ile kurulmuş bazı ışık yollarında boşa ayrılmış kapasite mevcut olsa da, SP yöntemlerinde MG yönteminden daha düşük maliyet değerleri gözlenmektedir. SP yönteminin aktif trafiği kesme dezavantajı, az bir maliyet artışı ile SPL ve SP+L yöntemlerinde ortadan kaldırılmıştır. Üç yöntemden birinin seçimine bu ödünleşim değerlendirilerek karar verilmelidir.

NSF ağı ile 6 düğümlü örnek ağ sonuçları karşılaştırıldığında iletim maliyeti ve BBR desenlerinin farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılık trafik desenlerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. 6 düğümlü ağ senaryosundaki gibi, az sayıda ancak yüksek bant genişliği ihtiyacına sahip trafik isteklerinin olması, trafik tımarlama ile maliyeti düşürebilmek için yüksek hat hızlarında ışık yollarının kurulmasını gerektirmektedir. Bu durumda RM yöntemi en yüksek maliyeti vermiştir. SP yöntemi ise tüm yüklerde en düşük maliyetleri sergilemiştir. BBR sonuçları tüm yöntemlerin aynı etkinlikte kaynak kullanımı olduğunu göstermektedir.

Diğer taraftan, NSF ağı senaryosundaki gibi çok sayıda düşük bant genişliği ihtiyacında trafik istekleri olması, düşük hat hızlı ışık yollarında bile tımarlama ile kullanılabilecek atıl kapasite kalmasını sağlamıştır. Bu durumda en düşük maliyeti RM yöntemi sunarken, gereksiz yere yüksek hat hızlı ışık yolları kuran MG yöntemi iletim maliyetini arttırmaktadır. Ancak, maliyet dezavantajına rağmen, ışık yollarının tüm potansiyel kapasitesini kullanıma açan yüksek hat hızları ile

kaynak kullanımı daha etkin hale geldiği için MG ve SP yöntemleri en düşük BBR değerlerini sunmaktadırlar. Bu durumda daha düşük maliyetle çalışan SP yöntemleri MG yöntemine göre daha üstün performans sergilemektedir.



8. YORUMLAR, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tezinde, MLR WDM optik iletim ağlarında kalımlı yönlendirme, hat hızı ve dalgaboyu atama (SRRWA) problemi üzerinde çalışılmıştır. Problemin çözümüne katkı sağlamak için geliştirilen yöntemlerle iletim maliyetinin ve trafik engelleme oranının azaltılması amaçlanmıştır.

Yapılan çalışmalarda, kalımlılık sağlamak için, bağlantı bazında (*protection-at-connection-PAC*) ve ışıkyolu bazında (*protection-at-lightpath-PAL*) adanmış (*dedicated-DB*) ve paylaşılan (*shared-SB*) yol koruma yöntemleri uygulanmıştır. PAL yönteminin yedek yol paylaşımı şansını arttırdığı görülmüştür. Yönlendirme için alternatifli sabit yönlendirme (*fixed alternate routing*) ve uyarlamalı yönlendirme (*adaptive routing*) yöntemleri ve dalgaboyu atama için ilk uygun dalga boyu atama (*first fit wavelength assignment-FF*) sezgisel yaklaşımı kullanılmıştır. Uyarlamalı yönlendirme yönteminin, ağın durumunu göz önünde bulundurması sebebiyle daha etkin sonuçlar verdiği görülmüştür. FF dalgaboyu atama yönteminin basit bir sezgisel yaklaşım olmasına rağmen etkin sonuçlar verdiği görülmüştür. Çalışmalarda, dinamik, dinamik artımlı ve statik trafik modelleri ele alınmıştır. Hat hızı atama problemi için etkin iletim mesafesi kısıtı ve hat uzunluğuna bağlı sezgisel bir yaklaşım kullanılmıştır. SLR ağlar ile yapılan karşılaştırmalarda, MLR ağların sunduğu performans kazanımları incelenmiş; MLR ağların iletim maliyetini düşürürken, kalımlılık olanaklarını arttırdığı raporlanmıştır (Algin and Tunali 2013). Yapılan çalışmalar MLR özellikli WDM optik ağlarda geliştirilmiştir. Performans ölçütleri olarak ağın iletim maliyeti, servis sağlanan trafik miktarı, yedek yol paylaşım oranı ve ışıkyolu kullanım oranı göz önünde tutulmuştur.

Tez kapsamında trafik isteklerine ait değerlerin bir dağılıma göre modellenmesi üzerinde çalışılmıştır. Geliştirilen algoritmada, trafik istekleri geliş aralıkları Poisson dağılıma, hat tutma sürelerinin üstel dağılıma, bant genişliği istekleri ise üniform dağılıma uygun olarak modellenmiştir. Bu modellerin kullanılması ile bir senaryo için farklı ağlarda, farklı trafik istekleri ile aynı konfigürasyonlara sahip birden çok testin gerçekleştirilmesi mümkün olmuştur. Böylece bir senaryonun performansı için yapılan tüm testlerin sonuçları ortak olarak ele alınmış ve değerlendirmelerde veriye görelilikten uzaklaşmıştır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda SRRWA probleminin farklı kısımlarına öneriler getirilmiştir. Yapılan ilk çalışmada SRRWA probleminin kaynak seçimi aşamasına çözüm olacak, çok hedefli (*multi objective*) eniyileme için çok seviyeli

programlama (*multi level programming*) yöntemi olan *optimal kaynak atama* (OPT) yöntemi geliştirilmiştir (Algin and Tunali 2017a). OPT yönteminin geliştirilmesindeki amaç, bir trafik isteğine kaynak ataması yapılırken, hem o trafiğin ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılamak hem de daha sonra gelecek trafik istekleri için ağ kaynaklarının kullanımını en iyileştirmektir. Yöntem uyarınca, bir trafik isteği için bulunan alternatif kaynakların performans değerlendirmeleri, sahip oldukları hat hızı, maliyet, vb. özellikler göz önünde tutularak yapılmakta, aralarından en etkin olanı seçilmektedir.

PAL paylaşılan yedek yol koruma yöntemi kullanan SRRWA algoritması üzerine uyarlanan OPT yöntemi, çeşitli sezgisel yaklaşımlar kullanılarak zenginleştirilmiştir. Sezgisel yaklaşımların ilki, yedek iletme ayrılan kapasitenin (SB_capacity) seçilmesi politikasıdır. Geliştirilen politikalar; i. sabit paylaşım kapasitesi (fixed_SB_cap), ii. iri hassasiyetli değişken paylaşım kapasitesi (CGS_SB_cap) ve iii. ince hassasiyetli değişken paylaşım kapasitesi (FGS_SB_cap) politikalarıdır. Sezgisel yaklaşımların ikincisi yol seçimi aşamasında kullanılmıştır. OPT yönteminin bulduğu alternatif kaynaklar arasında seçim yapılırken kullanılan sezgisel yaklaşımlar; uygun yollar arasından i. en az kullanılanı (*least used path first-LU*) seçen ve ii. en düşük maliyete (*least cost path first-LC*) sahip olanı seçen yaklaşımlardır.

OPT yönteminin üçüncü sezgisel yaklaşımı, kullanılan yol kurma yöntemlerinin seçilme önceliklerini belirleme aşamasını hedef almaktadır. Yol kurma yöntemlerinin seçilme önceliklerinin maliyeti ve trafik engelleme oranını etkiledikleri görülmüştür. Bu amaçla bir trafiğe servis sağlarken kullanılabilecek yol kurma yöntemleri olan i. tek zıplamalı trafik tımarlama (SHTG), ii. çok zıplamalı trafik tımarlama (MHTG), iii. tek zıplamalı yeni yol kurulumu (SHnew), iv. çok zıplamalı yeni yol kurulumu (MHnew) v. tek zıplamalı paylaşılan yedek yol kurulumu (SHSB), vi. çok zıplamalı paylaşılan yedek yol kurulumu (MHSB) yöntemlerini farklı önceliklerle seçen yaklaşımlar geliştirilmiştir.

OPT yönteminde, anılan bu yaklaşımların çeşitli kombinasyonlarda birarada kullanımları ile, kaynak kullanımını iyileştiren ve paylaşım etkinliğini artıran yöntemler elde edilmiştir. Yöntemlere ait iletim maliyetleri, trafik engelleme oranları, kaynak kullanım performansları ve paylaşım kazançları raporlanmıştır. Sonuçlara bakılarak, farklı ağ tiplerinde farklı yaklaşımların öne çıktığı görülmüştür. Yöntemlerin performans farklılığında en önemli rolün, trafik desenine ve iletim ağlarının hat uzunluklarına ait olduğu görülmüştür. EON ağı gibi kısa hat

uzunluklarına sahip ağlarda trafik tımarlama tekniğine ağırlık veren yöntemlerin daha yüksek performans sergilediği görülmüştür. NSF ağı gibi uzun hatlara sahip ağlarda ise çok zıplamalı yol kurulumlarının, kaynakları hızla tükettiği ve trafik engellemeye sebep olduğu raporlanmıştır. Önerilen yöntemlerin, ağı yapısına ve trafik modeline uygun olarak seçilmesi etkin sonuçlar vermektedir (Algin and Tunalı 2017a).

Tez kapsamında yapılan ikinci çalışmada, iletim ağlarındaki gün içinde değişen trafik yoğunluklarını göz önünde tutarak, ışıkyollarına bu yoğunluğa göre hat hızı ataması yapan *dinamik hat hızı atama* (DYN) yöntemi geliştirilmiştir. Omurga ağlarda, kullanıcılar arasındaki trafik desenlerinin günlük bazda tekrarlanması ve bazı zaman dilimlerinde yoğun trafik istekleri oluşurken bazı zamanlarda ağı daha sakin olması, trafik yoğunluğu dilimlerinin oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Kurulacak ışıkyollarında kullanılacak hat hızına karar verirken, oluşturulan bu yoğunluk dilimlerini dikkate almak kaynak kullanımını etkinleştirmektedir. DYN yöntemi, trafik yoğunluğunun düşük olduğu dilimlerde kaynak israfını önlemek için RM, yüksek olduğu dilimlerde tımarlamayı arttırmak için MG, orta yoğunluklu süreçlerde de OPT yöntemlerini dinamik olarak seçerek hat hızı seçimi yapmakta, ve toplam iletim maliyetini en iyileştirmeye çalışmaktadır. Bu çalışma, PAL adanmış ve paylaşılan yedek koruma yöntemlerini kullanan SRRWA algoritması üzerine uyarlanmıştır (Algin and Tunalı 2017b).

Üçüncü çalışmada, ışıkyolu kurulumu aşamasında kullanılan hat hızı atama politikaları incelenmiştir. Kullanılacak hat hızı atama yöntemine ağı tasarımı sırasında karar verilmesi keskin bir kısıttır. Oluşan trafik isteklerine göre dinamik olarak hat hızı ataması yapılması daha esnek bir çözüm sunmakta ve kaynak kullanımını etkinleştirmektedir. Bu amaçla, SecondPass (SP) yöntemi geliştirilmiş, RM ve MG yöntemleri ile karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Öğrenme kullanan SPL ve SP+L versiyonları ile birlikte SP yöntemi, klasik hat hızı atama yöntemlerine göre etkin bir maliyet ve servis sağlama oranı sunmuştur (Algin and Tunalı 2015).

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akademi, Turkcell.** 2011. “Kalımlılık.” Retrieved December 8, 2011 (<http://turkcellakademi.bilisimsozlugu.net/Sonuc.aspx?q=kalımlılık>).
- Algin, G. B. and E. T. Tunali.** 2013. “Dedicated Path Protection in Mixed-Line-Rate Optical WDM Networks.” Pp. 1–4 in *2013 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. IEEE. Retrieved (<http://ieeexplore.ieee.org/document/6531303/>).
- Algin, Gul Boztok and E.Turhan Tunali.** 2015. “A Cost Efficient Line Rate Assignment Strategy for MLR WDM Optical Networks.” Pp. 80–85 in *2015 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. IEEE. Retrieved (<http://ieeexplore.ieee.org/document/7127278/>).
- Algin, Gul Boztok and E.Turhan Tunali.** 2017a. “A Comparative Path Establishment Study on Routing Performance of MLR WDM Optical Networks.” *Submitted to Optical Switching and Networking*.
- Algin, Gul Boztok and E.Turhan Tunali.** 2017b. “A Dynamic Line Rate Assignment Strategy for MLR WDM Optical Networks.” in *IEEE Int. Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*.
- Anand, V., S. Chauhan, and C. Qiao.** 2002. *Sub-Path Protection: A New Framework for Optical Layer Survivability and Its Quantitative Evaluation*.
- Andrei, Dragos, Massimo Tornatore, Dipak Ghosal, Charles U. Martel, and Biswanath Mukherjee.** 2008. “On-Demand Provisioning of Data-Aggregation Requests over WDM Mesh Networks.” Pp. 2653–57 in *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/4698284/>).
- Bala, K., G. Ellinas, M. Post, J. Wei, and N. Antoniadis.** 1996. “Towards Hitless Reconfiguration in WDM Optical Networks for ATM Transport.” *Proceedings of GLOBECOM'96. 1996 IEEE Global Telecommunications Conference* 1:316–20. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/594381/>).
- Banerjee, D. and B. Mukherjee.** 1996. “A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks.” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 14(5):903–8. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/510913/>).
- Banerjee, D. and B. Mukherjee.** 2000. “Wavelength-Routed Optical Networks: Linear Formulation, Resource Budgeting Tradeoffs, and a Reconfiguration Study.” *IEEE/ACM Transactions on Networking* 8(5):598–607. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/879346/>).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Batayneh, Marwan, Dominic A. Schupke, Marco Hoffmann, Andreas Kirstaedter, and Biswanath Mukherjee.** 2011. "On Routing and Transmission-Range Determination of Multi-Bit-Rate Signals over Mixed-Line-Rate WDM Optical Networks for Carrier Ethernet." Pp. 1304–16 in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 19.
- Bhandari, Ramesh.** 1999. *Survivable Networks : Algorithms for Diverse Routing*. Kluwer Academic Publishers.
- Biswanath Mukherjee.** 1997. *Optical Communication Networks*. McGraw-Hill.
- Black, Paul E. and Vreda Pieterse.** 2008. "All Simple Paths." *Dictionary of Algorithms and Data Structures*. Retrieved November 24, 2015 (<http://www.nist.gov/dads/HTML/allSimplePaths.html>).
- Bonenfant, P. A.** n.d. "Optical Layer Survivability: A Comprehensive Approach." Pp. 270–71 in *OFC '98. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Technical Digest. Conference Edition. 1998 OSA Technical Digest Series Vol.2 (IEEE Cat. No.98CH36177)*. Opt. Soc. America. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/657389/>).
- Cavdar, Cicek, Massimo Tornatore, Feza Buzluca, and Biswanath Mukherjee.** 2010. "Shared-Path Protection with Delay Tolerance (SDT) in Optical WDM Mesh Networks." *Journal of Lightwave Technology* 28(14):2068–76.
- Cavdar, Cicek, Aysegul Gencata Yayimli, and Biswanath Mukherjee.** 2008. "Multi-Layer Resilient Design for Layer-1 VPNs." Pp. 1–3 in *OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4528741>).
- Chan, Vincent W. S., Guy Weichenberg, and Muriel Medard.** 2006. "Optical Flow Switching." Pp. 1–8 in *2006 3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems*. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/4374332/>).
- Charbonneau, Neal, Arush Gadkar, Bharath H. Ramaprasad, and Vinod M. Vokkarane.** 2012. "Dynamic Circuit Provisioning in All-Optical WDM Networks Using Lightpath Switching." *Optical Switching and Networking* 9(2):179–90. Retrieved October 24, 2017 (<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.299.6365&rep=rep1&type=pdf>).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chlamtac, I., A. Ganz, and G. Karmi.** 1992. "Lightpath Communications: An Approach to High Bandwidth Optical WAN's." *IEEE Transactions on Communications* 40(7):1171–82. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/153361/>).
- Chowdhury, P. et al.** 2011. "Mixed-Line-Rate (MLR) Optical Network Design Considering Heterogeneous Fiber Dispersion Maps." in *European Conference and Exposition on Optical Communications (ECOC)*.
- Cinkler, Tibor, Réka Kosznai, Péter Soproni, and K. Nemeth.** 2013. "GSP, the Generalised Shared Protection." Pp. 195–202 in *2013 9th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*.
- Corut Ergin, Fatma, Elif Kaldırım, Ayşegül Yayimlı, and A.Şima Uyar.** 2010. "Ensuring Resilience in Optical WDM Networks With Nature-Inspired Heuristics." *Journal of Optical Communications and Networking* 2(8):642. Retrieved October 24, 2017 (<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=jocn-2-8-642>).
- Crochat, O., J. Y. Le Boudec, and O. Gerstel.** 2000. "Protection Interoperability for WDM Optical Networks." *IEEE/ACM Transactions on Networking* 8(3):384–95. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/851984/>).
- Dijkstra, E. W.** 1959. "A Note on Two Problems in Connexion with Graphs." *Numerische Mathematik* 1(1):269–71. Retrieved October 24, 2017 (<http://link.springer.com/10.1007/BF01386390>).
- Dikbiyik, Ferhat, Massimo Tornatore, and Biswanath Mukherjee.** 2014. "Exploiting Excess Capacity for Survivable Traffic Grooming in Optical Backbone Networks." *Journal of Optical Communications and Networking* 6(2):127. Retrieved October 24, 2017 (<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=jocn-6-2-127>).
- Gao, Chengyi et al.** 2011. "Survivable Impairment-Aware Traffic Grooming and Regenerator Placement with Dedicated Connection Level Protection." Pp. 1–5 in *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/5963263/>).
- Gencata, Aysegül.** 2003. "Topology and Bandwidth Adaptation in Optical WDM Backbone Networks with Dynamic Traffic." ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY. Retrieved October 24, 2017 (<http://web.itu.edu.tr/gencata/pubs/AGthesis.pdf>).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gerstel, O. and R. Ramaswami.** 2000a. "Optical Layer Survivability-an Implementation Perspective." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 18(10):1885–99. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/887910/>).
- Gerstel, O. and R. Ramaswami.** 2000b. "Optical Layer Survivability: A Services Perspective." *IEEE Communications Magazine* 38(3):104–13. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/825647/>).
- Gerstel, O., R. Ramaswami, and G. H. Sasaki.** 1998. "Fault Tolerant Multiwavelength Optical Rings with Limited Wavelength Conversion." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 16(7):1166–78. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/725187/>).
- Ghani, N., S. Dixit, and Ti-Shiang Wang.** 2000. "On IP-over-WDM Integration." *IEEE Communications Magazine* 38(3):72–84. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/825644/>).
- Harai, H., M. Murata, and H. Miyahara.** 1997. "Performance of Alternate Routing Methods in All-Optical Switching Networks." *Proceedings of INFOCOM '97* 2:516–24. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/644501/>).
- He, Eric, Xi Wang, and Jason Leigh.** 2006. "A Flexible Advance Reservation Model for Multi-Domain WDM Optical Networks." Pp. 1–10 in *2006 3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems*. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/4374310/>).
- Huang, Sheng, Charles U. Martel, and Biswanath Mukherjee.** 2011. "Survivable Multipath Provisioning With Differential Delay Constraint in Telecom Mesh Networks." *IEEE/ACM Transactions on Networking* 19(3):657–69. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/5607334/>).
- Jaekel, A. and Y. Chen.** 2007. "Demand Allocation without Wavelength Conversion under a Sliding Scheduled Traffic Model." Pp. 495–503 in *Proceedings of the 4th International Conference on Broadband Communications, Networks, Systems, BroadNets*. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/4550474/>).
- Karasan, E. and E. Goldstein.** 1998. "Optical Restoration at the Wavelength-Multiplex Section Level in WDM Mesh Networks." *IEEE Photonics Technology Letters* 10(9):1343–45. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/705637/>).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kit-Man Chan and T. P. Yum.** n.d. "Analysis of Least Congested Path Routing in WDM Lightwave Networks." Pp. 962–69 in *Proceedings of INFOCOM '94 Conference on Computer Communications*. IEEE Comput. Soc. Press. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/337640/>).
- Kocak, O., C. Cavdar, A. Gengata, and F. Buzluca.** 2004. "An Efficient Heuristic for Virtual Topology Reconfiguration in Optical WDM Networks." Pp. 611–14 in *The 6th International Conference on Advanced Communication Technology, 2004.*, vol. 2. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/1292942/>).
- Kuri, Josué, Nicolas Puech, Maurice Gagnaire, Emmanuel Dotaro, and Richard Douville.** 2003. "Routing and Wavelength Assignment of Scheduled Lightpath Demands." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 21(8):1231–40. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/1234417/>).
- Labourdette, J. F. P., G. W. Hart, and A. S. Acampora.** 1994. "Branch-Exchange Sequences for Reconfiguration of Lightwave Networks." *IEEE Transactions on Communications* 42(10):2822–32. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/328952/>).
- Lei Song and B. Mukherjee.** 2008. "On the Study of Multiple Backups and Primary-Backup Link Sharing for Dynamic Service Provisioning in Survivable WDM Mesh Networks." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 26(6):84–91. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/4588336/>).
- Li, Ling and Arun K. Somani.** 1999. "Dynamic Wavelength Routing Using Congestion and Neighborhood Information." *IEEE/ACM Transactions on Networking* 7(5):779–86. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/803390/>).
- Li, Tianjian and Bin Wang.** 2006. "Approximating Optimal Survivable Scheduled Service Provisioning in WDM Optical Networks with Iterative Survivable Routing." Pp. 1–10 in *2006 3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, BROADNETS 2006*. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/4374348/>).
- Limal, E., S. L. Danielsen, and K. E. Stubkjaer.** 1998. "Capacity Utilization in Resilient Wavelength-Routed Optical Networks Using Link Restoration." Pp. 297–98 in *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998. OFC '98., Technical Digest*. Opt. Soc. America. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/657415/>).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Liu, Menglin, Massimo Tornatore, and Biswanath Mukherjee.** 2010. “New and Improved Strategies for Optical Protection in Mixed-Line-Rate WDM Networks.” in *Optical Fiber Communication Conference (OFC/NFOEC)*. IEEE.
- Liu, Menglin, Massimo Tornatore, and Biswanath Mukherjee.** 2011a. “Efficient Shared Subconnection Protection in Mixed-Line-Rate Optical WDM Networks.” *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference* 1–3.
- Liu, Menglin, Massimo Tornatore, and Biswanath Mukherjee.** 2011b. “New Strategies for Connection Protection in Mixed-Line-Rate Optical WDM Networks.” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* 3(8):641–50.
- Liu, Menglin, Massimo Tornatore, and Biswanath Mukherjee.** 2013. “Efficient Shared Subconnection Protection in Mixed-Line-Rate Optical WDM Networks.” *Journal of Optical Communications and Networking* 5(11):1227. Retrieved August 24, 2017 (<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=jocn-5-11-1227>).
- Medard, M., S. G. Finn, R. A. Barry, and R. G. Gallager.** 1999. “Redundant Trees for Preplanned Recovery in Arbitrary Vertex-Redundant or Edge-Redundant Graphs.” *IEEE/ACM Transactions on Networking* 7(5):641–52. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/803380/>).
- Modiano, E. and A. Narula-Tam.** 2002. “Survivable Lightpath Routing: A New Approach to the Design of WDM-Based Networks.” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 20(4):800–809. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/1003045/>).
- Mohan, G., C. Siva Ram Murthy, and A. K. Somani.** 2001. “Efficient Algorithms for Routing Dependable Connections in WDM Optical Networks.” *IEEE/ACM Transactions on Networking* 9(5):553–66. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/958325/>).
- Morea, Annalisa, Jordi Perello, Salvatore Spadaro, Dominique Verchere, and Martin Vigoureux.** 2013. “Protocol Enhancements for ‘Greening’ Optical Networks.” *Bell Labs Technical Journal* 18(3):211–30. Retrieved August 23, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6772717>).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Morris, R. and Dong Lin.** 2000. "Variance of Aggregated Web Traffic." Pp. 360–66 in *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, vol. 1. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/832206/>).
- Mukherjee, Biswanath.** 2011. "Issues and Challenges in Optical Network Design." in *European Conference and Exposition on Optical Communications (ECOC)*.
- Mukherjee, Biswanath.** 2006. *Optical WDM Networks*. Springer.
- Musumeci, Francesco, Massimo Tornatore, and Achille Pattavina.** 2012. "A Power Consumption Analysis for IP-Over-WDM Core Network Architectures." *Journal of Optical Communications and Networking* 4(2):108. Retrieved October 24, 2017 (<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=jocn-4-2-108>).
- Nag, Avishek and Massimo Tornatore.** 2008. "Transparent Optical Network Design with Mixed Line Rates." in *2008 2nd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems, ANTS 2008*.
- Nag, Avishek and Massimo Tornatore.** 2009. "Transparent vs. Translucent Optical Network Design with Mixed Line Rates." Pp. 7–9 in *Conference on Optical Fiber Communication*. Washington, D.C.: OSA. Retrieved October 24, 2017 (<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-2009-OWI7>).
- Ou, C. S. et al.** 2004. "Subpath Protection for Scalability and Fast Recovery in Optical WDM Mesh Networks." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 22(9):1859–75. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/1355982/>).
- Ou, Canhui et al.** 2003. "Traffic Grooming for Survivable WDM Networks – Dedicated Protection." *Journal of Optical Networking* 3(1):50–74.
- Ou, Canhui and Biswanath. Mukherjee.** 2005. *Survivable Optical WDM Networks*. Springer.
- Paschotta, Rüdiger.** 2017. "Optical Fiber Communication." Retrieved September 27, 2017 (http://www.rp-photonics.com/optical_fiber_communications.html).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pin-Han Ho and H. T. Mouftah.** 2002. “A Framework for Service-Guaranteed Shared Protection in WDM Mesh Networks.” *IEEE Communications Magazine* 40(2):97–103. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/983914/>).
- Preshing, Jeff.** 2011. “How to Generate Random Timings for a Poisson Process.” Retrieved June 1, 2017 (<http://preshing.com/20111007/how-to-generate-random-timings-for-a-poisson-process/>).
- Ramamurthy, B. and A. Ramakrishnan.** 2000. “Virtual Topology Reconfiguration of Wavelength-Routed Optical WDM Networks.” Pp. 1269–75 in *Globecom '00 - IEEE. Global Telecommunications Conference. Conference Record (Cat. No.00CH37137)*, vol. 2. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/891340/>).
- Ramamurthy, S.** 1998. “Optical Design of WDM Network Architectures.” University of California, Davis.
- Ramamurthy, S. and Biswanath Mukherjee.** 1998. “Fixed-Alternate Routing and Wavelength Conversion in Wavelength-Routed Optical Networks 1 Introduction : Wavelength Routing , Wavelength Conversion , and Alternate Routing.” in *IEEE GLOBECOM*. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/775940/>).
- Ramamurthy, S. and Biswanath Mukherjee.** 1999a. “Survivable WDM Mesh Networks, Part I - Protection.” Pp. 744–51 in *Proceedings - IEEE INFOCOM*, vol. 2. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/751461/>).
- Ramamurthy, S. and Biswanath Mukherjee.** 1999b. “Survivable WDM Mesh Networks, Part II-Restoration.” Pp. 2023–30 in *1999 IEEE International Conference on Communications (Cat. No. 99CH36311)*. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/765615/>).
- Ramaswami, R. and K. N. Sivarajan.** 1996. “Design of Logical Topologies for Wavelength-Routed Optical Networks.” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 14(5):840–51. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/510907/>).
- Ramesh, T. K., Sandeep Kumar Konda, and P. R. Vaya.** 2012. “Survivable Traffic Grooming RWA Protocol for WDM Networks.” Pp. 334–40 in *Procedia Engineering*, vol. 30. Elsevier. Retrieved October 24, 2017 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581200879X>).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rival, Olivier, Gustavo Villares, and Annalisa Morea.** 2011. "Impact of Inter-Channel Nonlinearities on the Planning of 25-40-100 Gb/s Elastic Optical Networks." *Journal of Lightwave Technology* 29(9):1326–34. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/5706330/>).
- Sahasrabuddhe, L., S. Ramamurthy, and B. Mukherjee.** 2002. "Fault Management in IP-over-WDM Networks: WDM Protection versus IP Restoration." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 20(1):21–33. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/974659/>).
- Sambo, Nicola et al.** 2011. "Modeling and Distributed Provisioning in 10–40–100-Gb/s Multirate Wavelength Switched Optical Networks." *Journal of Lightwave Technology* 29(9):1248–57. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/5722966/>).
- Shen, Gangxiang, Yue Wei, and Sanjay K. Bose.** 2014. "Optimal Design for Shared Backup Path Protected Elastic Optical Networks under Single-Link Failure." *Journal of Optical Communications and Networking* 6(7):649–59.
- Shen, L., X. Yang, A. Todimala, and B. Ramamurthy.** 2007. "A Two-Phase Approach for Dynamic Lightpath Scheduling in WDM Optical Networks." Pp. 2412–17 in *2007 IEEE International Conference on Communications*. IEEE. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/4289076/>).
- Shepherd, F. B. and A. Vetta.** 2004. "Lighting Fibers in a Dark Network." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 22(9):1583–88. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/1355959/>).
- Simmons, Jane M.** 2008. *Optical Network Design and Planning*. Retrieved (<http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-0-387-76476-4>).
- Stern, Thomas E., Georgios Ellinas, and Krishna Bala.** 2009. *Multiwavelength Optical Networks : Architectures, Design, and Control*. Cambridge.
- Subramaniam, S. and Dongyun Zhou.** 2000. "Survivability in Optical Networks." *IEEE Network* 14(6):16–23. Retrieved (<http://ieeexplore.ieee.org/document/885666/>).
- Tanwir, Savera, Lina Battestilli, Harry Perros, and Gigi Karmous-Edwards.** 2008. "Dynamic Scheduling of Network Resources with Advance Reservations in Optical Grids." Pp. 79–105 in *International Journal of Network Management*, vol. 18. John Wiley & Sons, Ltd. Retrieved October 24, 2017 (<http://doi.wiley.com/10.1002/nem.680>).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Thompson, K., G. J. Miller, and R. Wilder.** 1997. "Wide-Area Internet Traffic Patterns and Characteristics." *IEEE Network* 11(6):10–23. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/642356/>).
- Tkach, Robert W.** 2010. "Scaling Optical Communications for the next Decade and beyond." *Bell Labs Technical Journal* 14(4):3–9. Retrieved (<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6770233>).
- Vadrevu, Chaitanya S., Rui Wang, Massimo Tornatore, Charles U. Martel, and Biswanath Mukherjee.** 2012. "Survivable Provisioning in Mixed-Line-Rate Networks Using Multipath Routing - OSA Technical Digest." *Optical Fiber Communication Conference* (c):OTh4B.3. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/6191963/>).
- Valcarengi, L. and A. Fumagalli.** 2000. "IP Restoration vs. WDM Protection: Is There an Optimal Choice?" *IEEE Network* 14(6):34–41. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/885668/>).
- Varvarigos, Emmanouel (Manos), Konstantinos Christodouloupoulos, and Konstantinos Manousakis.** 2011. "Reach Adapting Algorithms for Mixed Line Rate WDM Transport Networks." *Journal of Lightwave Technology, Vol. 29, Issue 21, Pp. 3350-3363* 29(21):3350–63. Retrieved October 24, 2017 (<https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?uri=jlt-29-21-3350>).
- Wang, Xu, Maite Brandt-Pearce, and Suresh Subramaniam.** 2012. "Grooming and RWA in Translucent Dynamic Mixed-Line-Rate WDM Networks With Impairments - OSA Technical Digest." *Optical Fiber Communication Conference* OTh1A.7. Retrieved (<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2012-OTh1A.7>).
- Weichenberg, Guy, V. Chan, and M. Medard.** 2009. "Design and Analysis of Optical Flow-Switched Networks." *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* 1(3):B81–97. Retrieved October 24, 2017 (<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=jocn-1-3-B81>).
- Weichenberg, Guy, Vincent W. S. Chan, and Muriel Medard.** 2007. "On the Capacity of Optical Networks: A Framework for Comparing Different Transport Architectures." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 25(6):84–101. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/4285334/>).
- Wikipedia.** 2011a. "Fiber Optic Communication." Retrieved December 8, 2011 (http://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic_communication).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Wikipedia. 2011b. "Optical Fiber." Retrieved December 8, 2011 (http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber).

Xavier, A. V. S., R. C. A. Almeida Jr., D. A. R. Chaves, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho. 2016. "Power Series-Based Algorithm for Dedicated Protection in WDM Optical Networks." *Photonic Network Communications* 32(1):40–53.

Yao, Wang, Gokhan Sahin, Mengke Li, and Byrav Ramamurthy. 2009. "Analysis of Multi-Hop Traffic Grooming in WDM Mesh Networks." *Optical Switching and Networking* 6(1):64–75. Retrieved October 24, 2017 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427708000507>).

Yayimli, Aysegül Gençata. 2009. "Selective Survivability with Disjoint Nodes and Disjoint Lightpaths for Layer 1 VPN." *Optical Switching and Networking* 6(1):3–9. Retrieved October 24, 2017 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157342770800043X>).

Zang, H., J. P. Jue, and B. Mukherjee. 2000. "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength- Routed Optical WDM Networks." *Optical Networks Magazine* 1(January):47–60. Retrieved (<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.127.5171&rep=rep1&type=pdf>).

Zang, H. and Biswanath Mukherjee. 2001. "Connection Management for Survivable Wavelength-Routed WDM Mesh Networks." *SPIE Optical Networks Magazine* 2(4):17–28.

Zhang, Jing and Biswanath Mukherjee. 2004. "A Review of Fault Management in WDM Mesh Networks: Basic Concepts and Research Challenges." *IEEE Network* 18(2):41–48. Retrieved October 24, 2017 (<http://ieeexplore.ieee.org/document/1276610/>).



ÖZGEÇMİŞ**Gül BOZTOK ALGIN**

Adres: Ege Üniversitesi Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü, 35100, Bornova / İzmir

Telefon: (+90) 505 821 55 56

E-posta: gulboztok@gmail.com

Kişisel Bilgiler

Milliyeti: Türkiye Cumhuriyeti

Doğum Yeri ve Tarihi: İzmir, 26.12.1980

Eğitim Durumu

Doktora: 2007-2017, Ege Üniversitesi, Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü (Not Ort. 3.56/4.00)

Yüksek Lisans: 2004-2007, Ege Üniversitesi, Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü (Not Ort. 3.48/4.00)

Lisans: 1999-2004, Dokuz Eylül Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü (İngilizce) (Not Ort. 2.81/4.00)

Lise: 1992-1999, İzmir Özel Tevfik Fikret Lisesi / Fen Lisesi (Fransızca) (Not Ort. 4.61/5.00).

Yabancı Dil

Türkçe: Anadil

Fransızca: İyi derecede

İngilizce: İyi derecede (86.25, 2007 ÜDS)

Projeler

Kurum İçi Belge Dolaşımının Dijital Ortama Taşınması, Dijital Olarak İmzalanması, şifreli Olarak Korunması Ve Arşivlenmesi, 2006, 08-UBE-001 (BAP)

Kablosuz Yerel Ağlarda Hassas Bant Genişliği Ölçüm Tekniklerinin Geliştirilmesi, 2005, 05-UBE-001 (BAP)

Uzaktan Eğitimde Moodle Platformunun Kullanımının Araştırılması, 2011, 11-UBE-001 (BAP)

Yayınlar

Boztok Algin, G. and Tunali, E. T., 2017. A Comparative Path Establishment Study on Routing Performance of WDM MLR Optical Networks, *submitted*.

Boztok Algin, G. and Tunali, E. T., 2018. A Study on Line Rate Neighboring for MLR WDM Optical Networks, accepted for *2nd International Conference on Engineering Technology and Innovation (ICETI)*, Budapest, Hungary.

Boztok Algin, G. and Tunali, E. T., 2017. A Dynamic Line Rate Assignment Strategy for MLR WDM Optical Networks, *5th International Black Sea Conference on Communications and Networks (BlackSeaCom)*, İstanbul, Türkiye.

Boztok Algin, G. and Tunali, E. T., 2015. A Cost Efficient Line Rate Assignment Strategy for MLR WDM Optical Networks, *19th International Conference on Optical Networks Design and Modeling (ONDM)*, Pisa, Italy.

Kışla, T., Karaoğlu, B., Boztok Algin, G. and Candemir, C., 2014. Harmanlanmış Öğrenme Ortamında Moodle Platformunun Kullanılması ile ilgili Paydaş Görüşlerinin İncelenmesi, (in Turkish), *Eğitim ve Öğretim Araştırmaları Dergisi (Journal of Research in Education and Teaching)*, Cilt: 3 Sayı: 4 Makale No:15 sayfa: 154-167, 2014, ISSN: 2146-9199.

Kışla, T., Karaoğlu, B., Boztok Algin, G. and Candemir, C., 2014. Harmanlanmış Öğrenme Ortamında Moodle Platformunun Kullanılması ile İlgili Paydaş Görüşlerinin İncelenmesi, (in Turkish), *World Conference on Educational and Instructional Studies (WCEIS)*, Antalya, Türkiye.

Karaoğlu, B., Candemir, C., Haytaoglu, E., Boztok Algin, G. and Demirci, S., 2014. Using Twitter as a Diagnostic Teaching and Learning Assessment Tool, *25th Annual Conference of European Association for Education in Electrical and Information Engineering (EAEEIE)*, İzmir, TÜRKİYE, pp.73-76; doi:10.1109/EAEEIE.2014.6879390.

Boztok Algin, G. and Tunali, E. T., 2013. Dedicated path protection in mixed-line-rate optical WDM networks, (in Turkish), *21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Girne, KKTC, pp. 1-4; doi:10.1109/SIU.2013.6531303.

Boztok Algin, G. and Tunali, E. T., 2011. Scalable Video Encryption of H.264 SVC Codec, *Journal of Visual Communication and Image Representation* volume.22 issue.4 pages.353-364; doi:10.1016/j.jvcir.2011.02.005.

Boztok Algin, G. and Tunali, E. T., 2007. Kodlanmış Video Verisinin Gizlilik Gereksinimleri ve Video Şifreleme Algoritmaları, (in Turkish) *In proceedings of the Academic Informatics*, Kütahya, Türkiye, pp. 87-94.



EKLER

Ek 1 Türkçe - İngilizce Kullanılan Terimler Sözlüğü

Ek 2 Tüm Yalın Yollar Algoritması

Ek 3 Alarm ve Signal Yapısının Koddaki Yerine Ait Taslak Kod



Ek 1 Türkçe - İngilizce Kullanılan Terimler Sözlüğü

Türkçe Sözcük	İngilizce Karşılığı
Adanmış	Dedicated
Ağ katmanı	Network Layer
Ağaç	Tree
Ağırlıklı çizge	Weighted graph
Akım anahtarlama	Flow switching
Almaç	Receiver
Almaç-göndermeç	Transponder
Alt bağlantı	Subconnection
Alt yol koruması	Sub-path protection
Alternatifli sabit yönlendirme	Fixed alternate routing
Althız trafik	Subrate traffic
Anahtarlayıcı	Switch
Artımlı	Incremental
Ata, ebeveyn	Parent
Atım	Pulse
Bağlantı noktası	Port
Birleştirme	Aggregation
Birleştirme	Concatenation
Bozunma	Degradation
Bölgesel ağ	Regional Network
Çift yönlü iletim yapabilen	Bidirectional
Çizge renklendirme	Graph Coloring
Çoğullayıcı	Multiplexer
Çoğul-mod fiber	Multi-mode Fiber
Çoğuşma	Burst
Çok hedefli eniyileme	Multi Objective Opt.
Çok seviyeli programlama	Multi Level Programming
Çoklu yol	Multipath

Dağılım	Dispersion
Dalgaboyu	Wavelength
Dalgaboyu servisi	Wavelength services
Devre anahtarlama	Circuit Switching
Döngü	Loop
Dönüştürme	Conversion
Düğüm	Node
Düğüm derecesi	Nodal degree
En iyileme	Optimization
Erişim ağı	Access Network
Eşik değeri	Threshold
Etiket anahtarlama	Label switching
Evrimsel algoritma	Evolutionary Algorithm
Fiziksel topoloji	Physical Topology
Gecikme	Delay
Geri dönmeli	Reverting
Geri dönmesiz	Non-reverting
Girişim	Crosstalk
Göndermeç	Transmitter
Halka topolojisi	Ring Topology
Hat	Link
Hat hızı	Line rate
Hat hızından yüksek trafik	Over rate traffic
Hat tutma süresi	Holding time
Hat-ayrık	Link-disjoint, edge-disjoint
Hattı gizlice dinlemek	Wiretapping, Fiber-tapping
Işıkyolu	Lightpath
Izgara ağı	Mesh Network
İçsel yansıma	Internal Reflection

İletim mesafesi	Transmission Range
İlişkilendirmek	Mapping
İlk uygun	First fit
Kalımlılık, Kalıcılık yeteneği, Bağışıklık	Survivability
Karınca kolonisi en iyileme	Ant Colony Optimization
Karma hat hızlı	Mixed line rate
Kaynak atama	Provisioning
Kenar	Edge
Kentsel alan ağları	Metropolitan area network
Kesi kümesi	Cut set
Kırılma	Refraction
Kısıt	Constraint
Kısmi koruma	Partial protection
Koruma	Protection
Kök	Root
Kullanımda olan, meşgul	Busy
Lif	Fiber
Maliyet	Cost
Maliyet indirimi	Volume discount
NP-tam	NP-Complete
Omurga ağ	Backbone
Onarma	Restoration
Ödünleşim	Trade off
Özbenzeş	Self-similar
Paket anahtarlama	Packet Switching
Paylaşılan	Shared
Reddetme	Blocking
Sanal topoloji	Virtual Topology

Saydam, yenileyici kullanmayan ağ	Transparent network
Sayısal olarak kontrol edilemeyen	Computationally intractable
Sezgisel	Heuristic
Sinyal erişim mesafesi	Signal reach
Sinyal zayıflaması	Impairment
Tam hat hızında trafik	Line rate traffic
Tampon bellek	Buffer
Tekil hat hızlı	Single line rate
Tekil-mod fiber	Single-mode Fiber
Tekrarlayıcı	Repeater
Tersiner Çoğullama	Inverse Multiplexing
Tıkanmayı önleyici	Non-blocking
Toparlanma	Recovery
Trafik isteği	Traffic request
Trafik tımarlama	Traffic grooming
Tüm yalın yollar	All Simple Paths
Uçtan uca optik iletim	Optical bypass
Uyarlama	Adaptation
Uyarlamalı yönlendirme	Adaptive Routing
Üniform	Uniform
Üstel	Exponential
Veri hızı	Data rate
Yalın yol	Simple path
Yaprak	Leaf
Yaptırım	Penalty
Yararlanırlık	Availability
Yarı saydam ağ	Translucent network
Yedekli	Redundant
Yeniden yapılanma	Reconfiguration

Yenileyici	Regenerator
Yerel alan ağı	Ethernet
Yol	Path
Yönlendirici	Router
Yönlendirme	Routing
Yük	Load
Yük dengeleme	Load balancing
Yükselteç	Amplifier
Yükseltme	Amplification
Zamanlanmamış	Unscheduled
Zamanlanmış	Scheduled
Zayıflama	Attenuation
Zıplama	Hop

Ek 2 Tüm Yalın Yollar Algoritması

Algoritma 2 Tüm yalın yollar algoritması

verilen. Ağ komşuluk bilgisi, düğüm sayısı (#nodes), kaynak-hedef (s, d) düğümler
çıktılar. (s, d) düğüm ikilisi arasındaki yalın yollar listesi (alternative_paths[s][d][[]])
current_node=s; n_index, n_last_explored, already_on_path, temp_parent=0;

```

1  if (s == d) continue;
2  alt_index = 0;
3  nodes[n_index].node_id = s;
4  nodes[n_index].parent_id = s;
5  nodes[n_index].in_use = n_index;
6  while(1)
7      if (has_adjacent(current_node) == 1)
8          for (i=1; i<=#nodes; i++)
9              if ((current_node != i)&&(is_adjacent(current_node,i) == 1))
10                 temp_parent = nodes_last_explored;
11                 already_on_path = check(i);
12                 if (already_on_path == 1) continue;
13                 nodes[n_index++].node_id = i;
14                 nodes[n_index].parent_id = nodes[n_last_explored].node_id;
15                 nodes[n_index].in_use = n_last_explored;
16                 if (nodes[n_index].node_id == d) dest_found = 1;
17             end if
18         end for
19     end if
18     n_last_explored++;
19     current_node = nodes[n_last_explored].node_id;
20     if (n_last_explored == n_index+1) break;
21 end while
22 for (j=n_index; j>=0; j--)
23     n_last_explored = j;
24     if (nodes[n_last_explored].node_id == d)
25         p_index=0;
26         while(1)
27             path_in_reverse_order[++p_index] = nodes[n_last_explored].node_id;
28             if (nodes[n_last_explored].node_id == nodes[n_last_explored].parent_id)
29                 break;
30             n_last_explored = nodes[n_last_explored].in_use;
31         end while
32         copy_path(alternative_paths[s][d][++alt_index][], path_in_reverse_order[]);
33     end if
34 end for

```

Ek 3 Alarm ve Signal Yapısının Koddaki Yerine Ait Taslak Kod

Algoritma 4 Alarm ve Signal yapılarının SRRWA algoritmasında kullanımı

```

...
#include <pthread.h>
#include <signal.h>
#include <unistd.h>
...
#define N_MAX_DURATION 150
#define N_CONNECTIONS 2000
...
static int connections_tbr[N_CONNECTIONS]; //bir sonraki seferde sonlanacak bağl. listesi
int n_connections_tbr = 0; // bir sonraki seferde sonlanacak bağlantı sayısı
volatile int timer_stop = 1; // alarm koşulu
int timer_counter = 0; // benzetim zaman
int time_tick = 2; // alarm(time_tick).sn cinsinden
int time_line[N_MAX_DURATION+1000][N_CONNECTIONS];
pthread_mutex_t mutex_timer = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
...
...
void sigalrm_handler(int sig){
    int i;
    timer_stop = 1;
    pthread_mutex_lock(&mutex_timer);
    timer_counter++;
    if(time_line[timer_counter][0] > 0)
        for (i=1; i <= time_line[timer_counter][0]; i++)
            n_connections_tbr++;
            connections_tbr[n_connections_tbr] = time_line[timer_counter][i];
        end for
    end if
    pthread_mutex_unlock(&mutex_timer);
}
...
...
int main(int argc, char** argv){
    ...
    struct sigaction sact;
    ...
    sigemptyset( &sact.sa_mask);
    sact.sa_flags = 0;
    sact.sa_handler = sigalrm_handler;
    sigaction(SIGALRM, &sact, NULL);
    ...
    ...
    while(1)
        if (timer_stop)
            timer_stop = 0;
            if (connections_to_be_removed_exist() == 1)
                for (k = 1; k <= n_connections_tbr; k++)
                    remove_connection(&connections[connections_tbr[k]]);
                    n_connections_tbr--;
                end for
            alarm(time_tick);
            if (timer_counter == N_MAX_DURATION) break;
        end if
        ...
        if (timer_counter < (int)traffic_matrice[j].arrival_time) continue;
        ...
        //Trafik isteklerini işle..

```

```
if (connection_established() == 1)
    ...
    pthread_mutex_lock(&mutex_timer);
    connections[i].arrival_time = timer_counter;
    time_line[timer_counter + connections[i].holding_time][0]++;
    time_line[timer_counter + connections[i].holding_time][] =
        connections[i].connection_id;
    pthread_mutex_unlock(&mutex_timer);
    ...
end if
...
end while
...
return 0;
}
```

