

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

IP ağlarında bağlantı ya da düğüm arızaları meydana gelmesi durumunda dahi, gerçek zamanlı servislerin zaman gereksinimlerinin karşılanabilmesi için önerilen IP Hızlı Yeniden Yönlendirme (IP Fast Re Route-IPFRR) teknolojileri aktif bir araştırma alanıdır. Bu tez çalışmasında, IPFRR tekniklerinden biri olan Çoklu Yönlendirme Konfigürasyonları (Multiple Routing Configurations-MRC) yöntemini iyileştirmeye yönelik bir yaklaşım sunulmaktadır. Sunulan yaklaşım, MRC'nin başarımını arttırmak amacıyla ağ çizgesini bölümlenmeye karşı sağlamlaştıran bir çizge büyütme yaklaşımını esas almaktadır. Önerilen yaklaşım, gerçek ve sentetik ağlar üzerinde test edilmiş ve MRC'nin başarımını önemli oranda arttırdığı gözlemlenmiştir.

Çalışmalarım süresince bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyerek önerileriyle bana yol gösteren değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Selçuk CEVHER'e teşekkürlerimi borç bilir ve şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince sabır ve destekleriyle yanımda olan aileme şükran ve saygılarımı sunarım.

Mustafa TOPSAKAL

Trabzon 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çoklu Yönlendirme Konfigürasyonlarının Çizge Büyütme Yaklaşımı ile İyileştirilmesi ve Performans Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Selçuk CEVHER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/05/2020

Mustafa TOPSAKAL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	13
1.1. Giriş	13
1.2. IPFRR Teknolojileri	14
1.3. Çoklu Yönlendirme Konfigürasyonları	15
1.4. Çizge Sağlamlığı	19
1.5. Araştırma Hedefi ve Katkılar	22
2. LİTERATÜR TARAMASI	24
2.1. Çoklu Yönlendirme Konfigürasyonları	24
2.2. Diğer IPFRR Teknikleri	25
2.3. Çizge Büyütme	26
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME	28
3.1. MRC Performans Analizi için Otomasyon Aracı.....	28
3.2. Çizge Büyütme Yaklaşımı ile MRC Performansının İyileştirilmesi	29
3.2.1. Çizge Büyütme Yaklaşımı.....	29
3.2.2. Sentetik Ağlar İçin Performans Analizi.....	32
3.2.2.1. Heterojenlik Yaklaşımı.....	34
3.2.2.2. Rastgele Yaklaşım	41
3.2.2.3. Kümelenme Katsayısı Yaklaşımı	46
3.2.2.4. Değerlendirme	52
3.2.3. Gerçek Dünya Ağları İçin Performans Analizi	55
3.3. Çizge Sağlamlık Ölçütlerine Dayalı Akıllı ST Seçiminin Performans Analizi.....	56

4. SONUÇLAR.....	60
5. ÖNERİLER	61
6. KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ÇOKLU YÖNLENDİRME KONFIGÜRASYONLARININ ÇİZGE BÜYÜTME
YAKLAŞIMI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ VE PERFORMANS ANALİZİ

Mustafa TOPSAKAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk CEVHER
2020, 66 Sayfa

IP ağlarındaki gerçek-zamanlı trafik akışlarının, ağ bileşenlerinin arızalanması durumunda dahi kesintisiz iletimi, katı zaman gereksinimlerinin karşılanabilmesi açısından oldukça önemlidir. Çoklu Yönlendirme Konfigürasyonları (Multiple Routing Configurations-MRC), bir ağdaki bağlantı/düğüm arızalarına karşı etkin bir şekilde alternatif güzergahlar temin edebilen bir tekniktir. Bu teknik, fiziksel topoloji ile aynı çizgeye sahip, bağlantı ağırlıkları akıllıca seçilen ve farklı arıza senaryoları için koruma sağlayan sanal topolojiler (ST) oluşturarak, her bir ST için ayrı bir yönlendirme tablosunu ön etkin bir şekilde hesaplar. Bir arıza tespit edilmesi durumunda, arızadan etkilenen trafikler arızaya karşı koruma sağlayan yönlendirme tablosu kullanılarak iletmeye başlanır.

MRC tarafından üretilecek ST adedinin ağ yöneticisi tarafından büyük seçilmesi, algoritmanın başarılı bir şekilde sonlanma ihtimalini arttırırken, hesaplama karmaşıklığını ve tüketilen ağ kaynaklarının miktarını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, üretilecek ST sayısının küçük seçilmesi durumunda dahi MRC'nin başarımının sağlanabilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, yeni bağlantıları fiziksel topoloji çizgesine akıllıca ekleyerek çizgenin bağlantısallığını arttıran ve böylelikle MRC'nin performansını belirgin bir şekilde iyileştiren bir çizge büyütme yaklaşımı sunulmaktadır. Sentetik ve gerçek ağ topolojileri kullanılarak yapılan performans analizi, önerilen yaklaşımın MRC performansı üzerinde belirgin bir iyileşme sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: IP hızlı yeniden yönlendirme, Çoklu yönlendirme konfigürasyonları, Çizge büyütme

Master Thesis

SUMMARY

ENHANCEMENT OF MULTIPLE ROUTING CONFIGURATIONS BASED ON
GRAPH AUGMENTATION APPROACH AND ITS PERFORMANCE ANALYSIS

Mustafa TOPSAKAL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Computer Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Selçuk Cevher
2020, 66 Pages

The seamless transmission of real-time traffic flows in IP networks in case of network failures is of great importance to meet the stringent timing requirements. Multiple Routing Configurations (MRC) is a mechanism which efficiently provides alternative routes against link/node failures in a network. This mechanism creates virtual topologies (VT) which have the same graph as the physical topology, whose link weights are intelligently selected and which provide protection for different failure scenarios, and then computes a separate routing table for each VT. When a failure is detected, the affected traffic flows is started to be transmitted using the routing table that provides protection against the failure.

The selection of a large quantity by the network operator as the number of VTs to be generated by MRC increases the probability of a successful termination of the algorithm, while negatively affecting the computational complexity and the amount of network resources to be consumed. Thus, ensuring the success of MRC even if the number of VTs to be generated is selected to be a small quantity is crucial. In this thesis, a graph augmentation approach enhancing the graph connectivity by intelligently adding new links to the physical topology graph, and hence significantly improving the performance of MRC is presented. The performance analysis realized by using synthetic and real network topologies shows that the proposed approach significantly enhances the performance of MRC.

Key Words: IP fast re-route, Multiple routing configurations, Graph augmentation

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. LSR Protokollerine ait yakınsama süresi	13
Şekil 1.2. Örnek fiziksel topoloji.....	16
Şekil 1.3. ST'lerin başlangıç yapısı.....	17
Şekil 1.4. ST üretimi için MRC operasyonu (Adım 1-9)	18
Şekil 1.5. ST üretimi için MRC operasyonu (Adım 10-11)	19
Şekil 1.6. Çizge büyütme işlemi ile bir çizgenin tam bağlı hale getirilmesi	22
Şekil 3.1. Otomasyon adımları	28
Şekil 3.2. Tümleyen çizgenin hesaplanması.....	30
Şekil 3.3. Algoritma 1 tarafından hesaplanan örnek ST'ler.....	31
Şekil 3.4. $P7$ için küçük ölçekli çizge büyütme	53
Şekil 3.5. $P1$ için küçük ölçekli çizge büyütme	54
Şekil 3.6. $j = 25$ için ölçütlerin IP oranları	54
Şekil 3.7. BT North America ağı.....	55

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Çizge büyütme algoritması.....	29
Tablo 3.2. Tümleyen bağlantılar ve HT değerleri	31
Tablo 3.3. Topoloji havuzları	33
Tablo 3.4. Ortalama çizge büyütme maliyeti (%)	34
Tablo 3.5. HT ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait performans sonuçları ..	35
Tablo 3.6. HT ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait standart sapmalar	36
Tablo 3.7. HT ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait güven aralıkları	37
Tablo 3.8. HT ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait performans sonuçları ..	38
Tablo 3.9. HT ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait standart sapmalar.....	39
Tablo 3.10. HT ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait güven aralıkları.....	40
Tablo 3.11. R ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait performans sonuçları ...	41
Tablo 3.12. R ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait standart sapmalar.....	42
Tablo 3.13. R ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait güven aralıkları.....	43
Tablo 3.14. R ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait performans sonuçları ...	44
Tablo 3.15. R ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait standart sapmalar.....	45
Tablo 3.16. R ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait güven aralıkları	46
Tablo 3.17. CC ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait performans sonuçları .	47
Tablo 3.18. CC ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait standart sapmalar.....	48
Tablo 3.19. CC ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait güven aralıkları.....	49
Tablo 3.20. CC ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait performans sonuçları .	50
Tablo 3.21. CC ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait standart sapmalar.....	51
Tablo 3.22. CC ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait güven aralıkları.....	52
Tablo 3.23. Gerçek dünya ağları için HT ölçütüne dayalı performans sonuçları.....	56
Tablo 3.24. Topoloji havuzları	57
Tablo 3.25. GLP için çizge sağlamlık ölçütlerine dayalı akıllı ST seçimi	58
Tablo 3.26. Waxman ve BA için çizge sağlamlık ölçütlerine dayalı akıllı ST seçimi	59

SEMBOLLER DİZİNİ

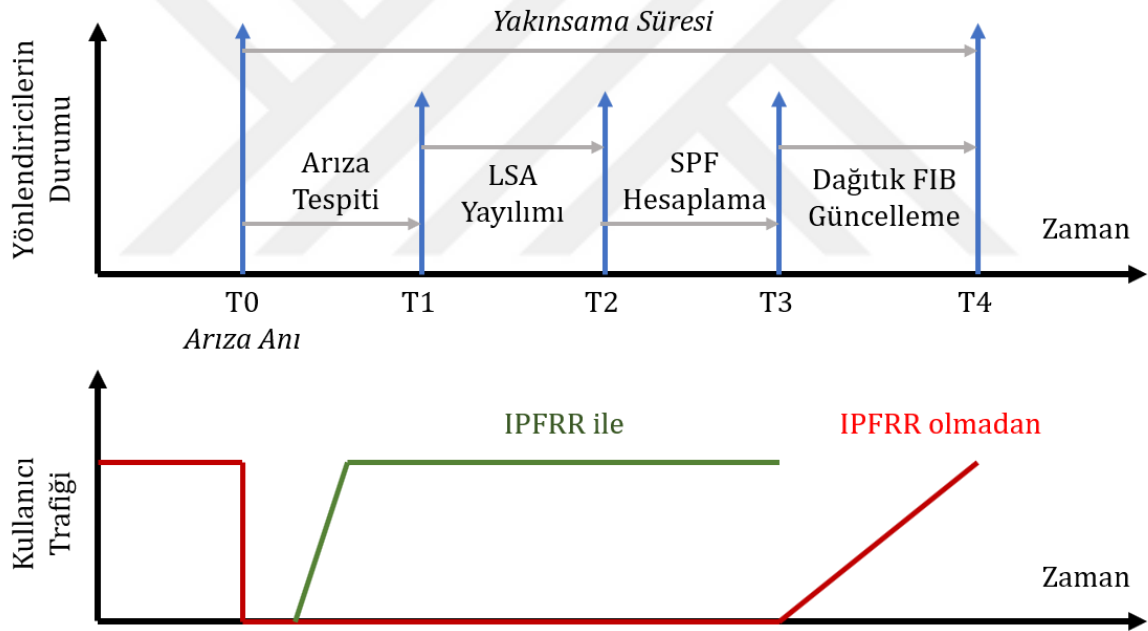
ARC	Uygun Yönlendirme Yapılandırmaları (Available Routing Constructs)
BA	Barabasi Albert
BRITE	Boston Üniversitesi Karakteristik İnternet Topolojisi Üreteci (Boston University Representative Internet Topology Generator)
C	Maliyet (Cost)
CC	Kümelene Katsayısı (Clustering Coefficient)
E	Verimlilik (Efficiency)
EC	Kenar Bağlantısallığı (Edge Connectivity)
G	Çizge (Graph)
GLP	Genelleştirilmiş Doğrusal Tercih (Generalized Linear Preference)
HM	Komut Çizelgesi (HashMap)
HT	Heterojenlik (Heterogeneity)
IETF	İnternet Mühendisliği Görev Gücü (Internet Engineering Task Force)
IP	İyileşme Yüzdesi (Improvement Percentage)
IPFRR	IP Hızlı Yeniden Yönlendirme (IP Fast Re-Route)
IS-IS	Orta Seviyeden Orta Seviyeye Sistem (Intermediate System to Intermediate System)
İS	İzolasyon Sıralaması (Isolation List)
L	Ortalama Yol Uzunluğu (Average Path Length)
LFA	Döngüsüz Alternatif Yollar (Loop Free Alternates)
LL	Alt Sınır (Lower Limit)
MHRPS	Çoklu Atlama Onarım Yolları (Multi-Hop Repair Paths)
MRC	Çoklu Yönlendirme Konfigürasyonları (Multiple Routing Configurations)
MRT	Maksimal Fazlalık Ağaçları (Maximally Redundant Trees)
MTIPFRR	Çoklu Topoloji Yönlendirmesine Dayalı IP Hızlı Yeniden Yönlendirme (Multi Topology Routing based IPFRR)
MTR	Çoklu Topoloji Yönlendirmesi (Multiple Topology Routing)
N	Üretilen ST Adedi (Number of VT to be Produced)
OSPF	İlk Açık Yöne Öncelik (Open Shortest Path First)
P	Havuz (Pool)
R	Rastgele (Random)

RTGWG	Yönlendirme Alanı Çalışma Grubu (Routing Area Working Group)
SDN	Yazılım Tanımlı Ağlar (Software Defined Network)
ST	Sanal Topoloji (Virtual Topology)
UL	Üst Sınır (Upper Limit)
VC	Köşe Bağlantısallığı (Vertex Connectivity)
$\overline{\min_{ST}}$	Minimum ST Sayısının Ortalaması (Average of Minimum VT Number)
CC_v	V Düzümüne Ait Kümelenme Katsayısı (Clustering Coefficient of Node V)
d_{\min}	Topolojiye Ait En Düşük Düzüm Derecesi (Minimum Node Degree of Topology)
d_v	V Düzümünün Derecesi (The Degree of Node V)
N_v	V Düzümünün Komşuları Arasındaki Bağlantı Sayısı (Number of Connections Between Neighbors of Node V)
μ_d	Düzüm Derecelerinin Ortalaması (Average of Node Degrees)
σ_d	Düzüm Derece Dağılımlarının Standart Sapması (Standard Deviation of Node Degree Distributions)
$ \overline{E} $	Ortalama Kenar Sayısı (Average Number of Edges)
$ \overline{V} $	Ortalama Köşe Sayısı (Average Number of Vertex)
j	Eklenen Bağlantı Sayısı (Number of Links Added)
m	Düzüm Başına Bağlantı Sayısı (Number of Links Per Node)
B	Beta
σ	Standart Sapma (Standard Deviation)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

IP ağlarındaki gerçek-zamanlı trafik akışlarının ağ bileşenlerinin arızalanması durumunda dahi kesintisiz iletimi, ağ servislerinin zaman gereksinimlerinin karşılanabilmesi açısından oldukça önemlidir. Ağda bir arıza meydana gelmesi durumunda, ağdaki her bir yönlendiricinin arızayı algılaması, iletim güzergahlarını yeniden hesaplaması ve yönlendirme tablolarını güncellemeleri gereklidir. Yakınsama (*convergence*) olarak isimlendirilen bu süreç, ağda kullanılan yönlendirme protokolüne ve ağın büyüklüğüne bağlı olarak birkaç milisaniyeden onlarca saniyeye kadar sürebilmektedir [1].



Şekil 1.1. LSR Protokollerine ait yakınsama süresi

Bağlantı Durumu Yönlendirme (LSR) Protokolüne ait yakınsama süresine etki eden bileşenler Şekil 1.1'de gösterilmektedir. LSR protokolünü koştan her bir düğüm ağa ait topoloji çizge bilgisine sahiptir. Ağda bir arıza meydana geldiğinde bu arızanın algılanması, arıza bilgisinin arızayı tespit eden düğüm tarafından ağdaki diğer tüm düğümlerle paylaşılması, arıza bilgisini alan düğümlerin en kısa yol ağacını (*shortest path tree*) yeniden hesaplaması ve tüm düğümlerin yönlendirme tablolarını güncellemesi uzun bir yakınsama

süresine neden olmaktadır. Gerçek zamanlı uygulamalar için mevcut LSR yönlendirme protokollerinin yavaş bir yeniden yakınsama sürecine sahip olması, iletim döngüsü barındırmayan ve hızlı yakınsama sağlayan IP Hızlı Yeniden Yönlendirme (IP Fast Re-Route-IPFRR) teknolojilerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur [2]. IPFRR teknolojileri, birincil güzergahların arızalanması durumunda kullanılacak alternatif güzergahları LSR protokolleri tarafından oluşturulan çizge bilgisini dikkate alarak arıza meydana gelmeden önce ön etkin bir şekilde hesaplar. Arıza tespiti durumunda ise önceden hesaplanan alternatif güzergahları otomatik olarak devreye alarak arıza onarım süresini en aza indirmeye çalışır [3]. Bu esnada, arka planda ağda kullanılan yönlendirme protokolüne ait yakınsama süreci devam eder. Yakınsama süreci tamamlandıktan sonra IPFRR mekanizmasının hesapladığı alternatif iletim güzergahları yerine, yakınsama sonucunda yönlendirme protokolünün hesapladığı güzergâhlar kullanılmaya başlanır [4]. Ön etkin alternatif güzergâh hesaplama ve tüm muhtemel tekli arıza senaryoları için alternatif güzergâh temin edebilme (*arıza kapsamı-failure coverage*) gibi özellikler, veri iletimlerinin onarımı için IPFRR tekniklerinin kullanılmasını cazip hale getirmektedir [5].

1.2. IPFRR Teknolojileri

IP ağlarında gerçek zamanlı haberleşmede meydana gelebilecek arızalara karşın IP Hızlı Yeniden Yönlendirme (IPFRR) teknolojileri servis kesinti süresini milisaniyeler düzeyine kadar indirgeyebilmektedir [1][3][5]. Internet Mühendisliği Görev Gücü'nün (IETF) Yönlendirme Çalışma Grubu (RTGWG) IPFRR çerçevesini [3] ve Döngüsüz Alternatif Yolları [6] (Loop Free Alternates-LFA) standardize etmiştir. LFA teknolojisinde kullanılan alternatif güzergahlar önceden hesaplanmakta ve arıza bilgisinin ağdaki diğer yönlendiricilere yayılımı için ilave bir sinyalizasyona ihtiyaç duyulmamaktadır. LFA tekniğinin gerçekleşmesi daha kolay olsa da tüm tekli bağlantı arızaları için arıza kapsamı sağlayamamaktadır. Not-via [7] ve Çoklu Atlama Onarım Yolları (Multi-Hop Repair Paths) [8][9][10] diğer IPFRR tekniklerinden bazılarıdır.

Çoklu Topoloji Yönlendirmesi (Multiple Topology Routing-MTR), ağdaki her bir yönlendiricinin birden fazla yönlendirme tablosu kullanabilmesine imkân veren ve böylelikle trafik mühendisliği için esneklik sağlayan bir ağ yönetim konseptidir [11]. Birden fazla yönlendirme tablosu yardımıyla, farklı trafik sınıfları için farklı iletim güzergahları kullanılarak, trafik yükü ağdaki bağlantılar arasında adil bir şekilde dağıtılabilir. MTR,

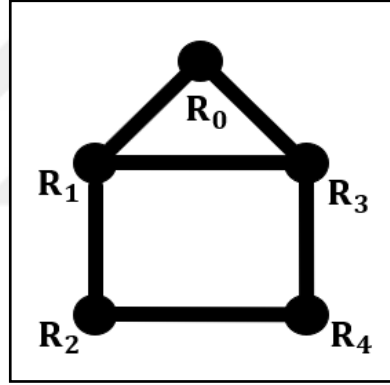
yönlendirme tabloları oluşturmak için sanal topolojileri (ST) kullanır ve IETF tarafından OSPF ve IS-IS (Intermediate System to Intermediate System) protokollerinin uzantıları olarak standardize edilmiştir [12][13]. MTR'ye dayalı IPFRR (MT-IPFRR) [14][15] alternatif güzergahlar oluşturmak için ST'ler kullanmaktadır. Her bir ST, fiziksel topoloji ile aynı çizgeye sahiptir fakat bağlantı ağırlıkları akıllıca seçilir. Böylelikle, ağdaki belli arıza senaryoları için, arıza meydana geldiğinde kullanılacak alternatif güzergahlar ilgili ST tarafından temin edilmiş olur. Her bir ST için ayrı bir yönlendirme tablosu hesaplanır. Bir yönlendiricinin komşu bağlantılardan birinin arızalandığını tespit etmesi durumunda, arızadan etkilenen trafikler arızaya karşı koruma sağlayan yönlendirme tablosu kullanılarak iletmeye başlanır. Yeniden yönlendirilen trafik akışları, devreye alınan yönlendirme tablosunun kimlik bilgisi ile işaretlenir ve böylelikle yeni güzergâh üzerindeki diğer yönlendiriciler arızaya dair bilgilendirilmiş olur. Çoklu Yönlendirme Konfigürasyonları (Multiple Routing Configurations-MRC) [16] ve Maksimal Fazlalık Ağaçları (Maximally Redundant Trees-MRT) [17][18] tam arıza kapsamı sağlayan MT-IPFRR teknikleridir. Bununla birlikte, MRC yöntemi MRT'ye göre çok daha kısa alternatif güzergâh uzunlukları sunmaktadır [19].

1.3. Çoklu Yönlendirme Konfigürasyonları

MRC algoritması, 2-bağlı topolojilerdeki tüm tekli bağlantı/düğüm arızalarına karşı alternatif güzergahlar sağlayabilen bir IPFRR yöntemidir. Bu algoritma, toplam adedinin ağ planlayıcısı tarafından belirlendiği, fiziksel topoloji ile aynı çizgeye sahip, bağlantı ağırlıklarının ise akıllıca seçildiği ST'ler oluşturur. MRC, bir ST'deki herhangi bir bağlantının ağırlığını, fiziksel topoloji ile aynı olacak şekilde, sonsuz ya da yeterince yüksek olmak üzere üç farklı şekilde belirleyebilir [16]. Ağırlığı sonsuz ve yeterince büyük seçilen bağlantıya, sırasıyla *izole* ve *sınırlı* (restricted) bağlantı adı verilir. İzole bağlantılar, ST'ye karşılık düşen en kısa yol ağacının bir parçası olamayacağından ilgili ST kullanılarak hesaplanacak iletim güzergahlarında içerilmezler ve dolayısıyla hiçbir trafik iletiminde kullanılmazlar. Sınırlı bir bağlantı ise, yalnızca hedefi ya da kaynağının komşusu olduğu düğümler olan trafiklerin iletiminde kullanılır. ST'deki herhangi bir düğümü izole etmek için, düğüme bağlı bağlantılardan biri sınırlı bir bağlantı olarak belirlenirken, geriye kalan bağlantılar sınırlı bağlantı ile aynı ya da daha büyük bir ağırlığa sahip olacak şekilde

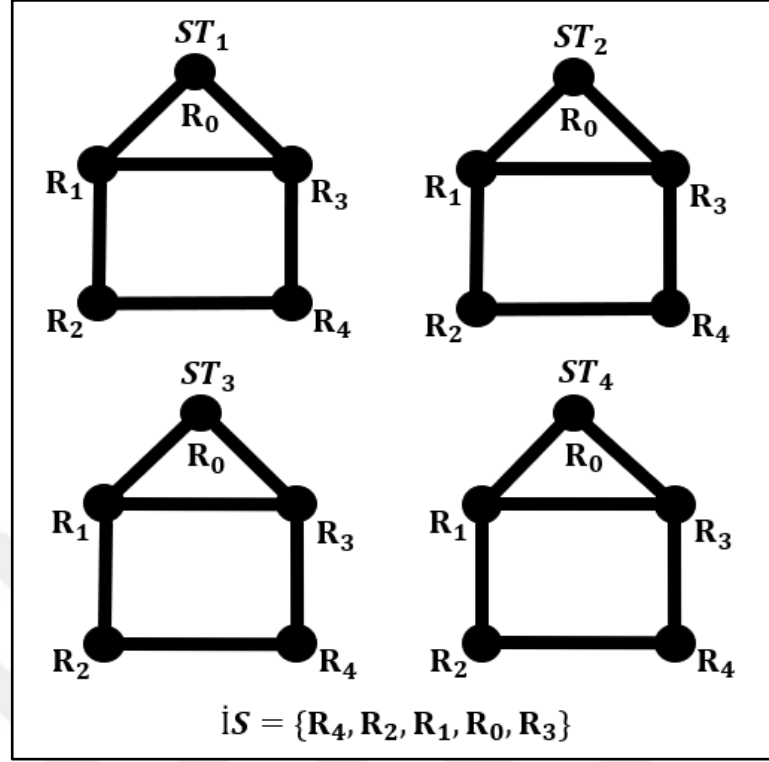
ayarlanır. İzole düğümler, komşu bağlantı ağırlıklarının akıllıca seçimi sayesinde trafik iletimlerinde ara (*relay*) düğüm olarak kullanılmazlar.

Bir ST'deki izole edilmemiş düğümler/bağlantılar ve sınırlandırılmamış bağlantılar ST'nin *omurgası* olarak adlandırılır. Bir ST'nin trafik iletimi için seçilmesi durumundaki iletimler, ST'ye ait omurga üzerindeki bağlantı ve düğümler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu nedenle MRC, her bir ST'yi omurgası *bağlı* (connected) olacak şekilde üretir. Bu özelliğin garanti edilememesi durumunda, MRC başarısız bir şekilde sonlanır. Böyle bir durumda, üretilecek ST adeti ağ planlayıcısı tarafından daha yüksek bir değere ayarlanmalı ve MRC algoritması yeniden başlatılmalıdır [16]. Bir fiziksel topolojinin bağlantısalılığının (*connectivity*) fazla oluşu, üretilecek ST'lerin omurgalarının bağlı olma olasılığını yükselteceğinden, ST sayısının daha küçük seçildiği durumlarda bile MRC'nin başarılı bir şekilde sonlanmasına imkân verebilir [20].



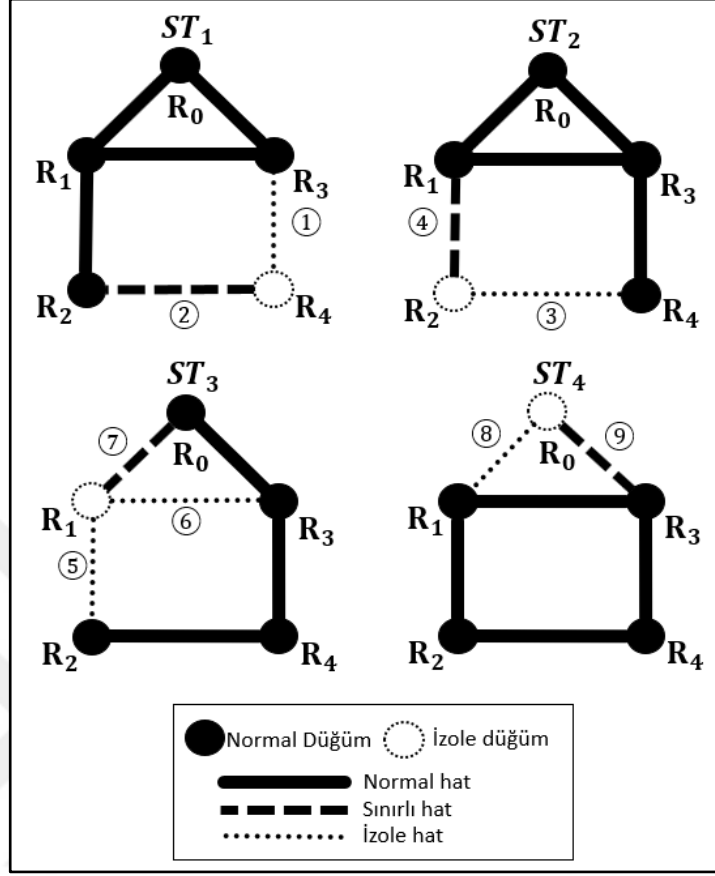
Şekil 1.2. Örnek fiziksel topoloji

Şekil 1.2, 5 düğüm ve 6 bağlantıdan oluşan örnek bir fiziksel topolojiyi göstermektedir. Örneğin, ağ planlayıcısı tarafından üretilecek toplam ST adedi 4 olarak seçildiğinde MRC başarılı olarak sonlanmakta ve Şekil 1.5'te nihai bağlantı ağırlıkları gösterilen ST'leri toplam 11 adet işlem adımı sonucunda üretmektedir. MRC algoritması, başlangıçta fiziksel topoloji ile aynı çizge ve bağlantı ağırlıklarına sahip 4 adet ST oluşturur (Şekil 1.3). Şekil 1.4 ve Şekil 1.5, başarılı bir şekilde oluşturulan 4 adet ST'nin üretiminde uygulanan 11 adet işlem adımını göstermektedir. Bu adımların uygulanmasında takip edilen düğüm izolasyon sırası (İS) $\{R_4, R_2, R_1, R_0, R_3\}$ şeklindedir. Bu sıralama, MRC tarafından rastgele bir şekilde belirlenir.



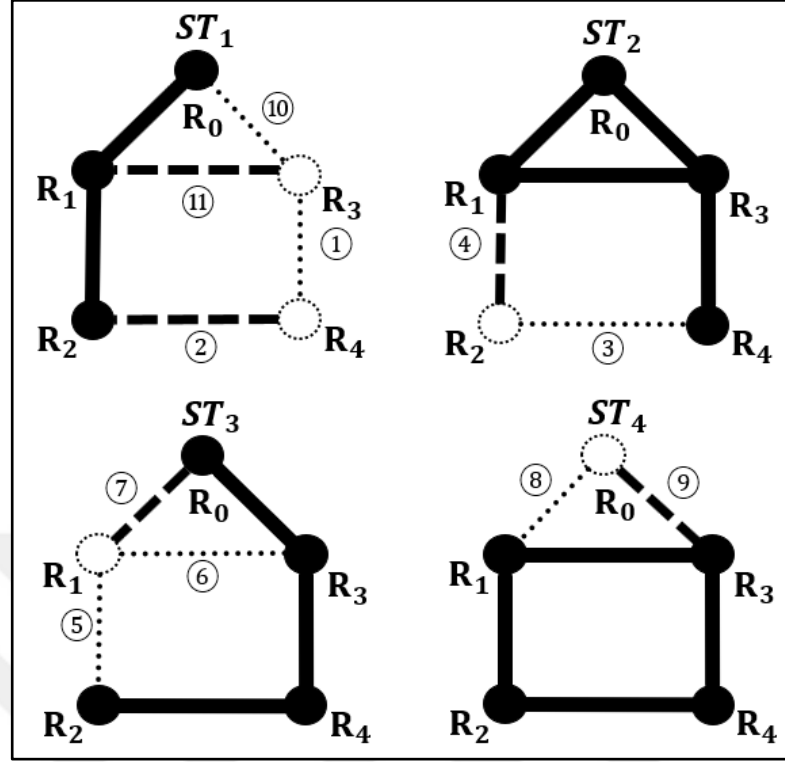
Şekil 1.3. ST'lerin başlangıç yapısı

Şekil 1.4, ST'lerin bağlantı ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılan 1-9 numaralı işlem adımlarını göstermektedir. Öncelikle, rastgele bir şekilde belirlenen R_4 düğümü ST_1 'de izole edilir. Bu amaçla, $(R_4 - R_3)$ ve $(R_4 - R_2)$ bağlantılarının ağırlıkları adım 1 ve 2'de rastgele bir şekilde sırasıyla sonsuz ve sınırlı olarak belirlenir. Bir düğümüne komşu olan tüm bağlantı ağırlıklarının sonsuz seçilmesi ilgili düğümü erişilemez kılacağından, $(R_4 - R_2)$ bağlantı ağırlığının sonsuz yerine kısıtlı olarak seçildiğine dikkat edilmelidir. MRC, bir sonraki düğümü farklı bir ST'de izole etmeye çalışır. Bunun nedeni, ST başına izole edilen düğüm sayısını mümkün oldukça dengeli tutmaktır. Bu sayede, her bir ST'nin güzergâh çeşitliliği makul sınırlar içerisinde tutularak alternatif güzergahların uzunlukları kısaltılmış olur. Adım 2'de kısıtlı olarak belirlenen $(R_4 - R_2)$ bağlantısının R_2 uzak ucu, ST_2 'de izole edilmek için seçilir [16]. Adım 3 ve 4'te, $(R_2 - R_4)$ ve $(R_2 - R_1)$ bağlantı ağırlıkları sırasıyla sonsuz ve sınırlı bir değere ayarlanarak R_2 'nin izolasyonu tamamlanır. Benzer bir şekilde, adım 5,6,7 sayesinde R_1 düğümü ST_3 'de ve adım 8,9 ile R_0 düğümü ST_4 'de izole edilir.



Şekil 1.4. ST üretimi için MRC operasyonu (Adım 1-9)

Şekil 1.5, 10 ve 11 numaralı adımları göstermektedir. Adım 10 ve 11’de, $(R_3 - R_0)$ ve $(R_3 - R_1)$ bağlantıları, sırasıyla ST_1 ’de izole edilir ve kısıtlanır. Böylelikle, ST’lerin üretimi tamamlanmış olur. Şekilde görüldüğü gibi, fiziksel topolojideki her bir düğüm ve bağlantı sadece bir ST’de izole edilmiştir, koyu çizgilerle gösterilen her bir omurga bağlıdır ve omurga ile her bir izole düğüm arasında sınırlı bir bağlantı mevcuttur [16]. Örneğin, $(R_3 - R_0)$ ve $(R_3 - R_4)$ bağlantıları yalnızca ST_1 ’de izole edilmiştir ve ST_1 seçilerek gerçekleştirilen herhangi bir trafik iletiminde kullanılmamaktadır. ST_1 ’deki $(R_1 - R_3)$ ve $(R_2 - R_4)$ sınırlı bağlantıları, yalnızca sırasıyla R_3 ve R_4 kaynaklı veya bu düğümleri hedefleyen trafiği iletmek için kullanılırlar. $(R_3 - R_0)$ bağlantısının arızalanması durumunda, arıza onarımı için $(R_3 - R_0)$ bağlantısını izole eden ST_1 seçilir ve R_3 kaynaklı trafik $(R_1 - R_3)$ bağlantısı kullanılarak iletmeye başlanır. ST adedinin 4’ten küçük seçilmesi durumunda MRC algoritmasının başarısız olarak sonlanacağına dikkat edilmelidir.



Şekil 1.5. ST üretimi için MRC operasyonu (Adım 10-11)

1.4. Çizge Sağlamlığı

Sağlamlık (*robustness*), bir ağdaki düğüm ya da bağlantı gibi bileşenlerin arızalanması durumunda dahi ağın operasyonuna sağlıklı bir şekilde devam edebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır [21]. Bir ağ topolojisinin bölümlenmeye (*partitioning*) karşı ne kadar dirençli olduğu o ağın sağlamlık derecesinin bir göstergesidir. Bölümlenme, bağlı bir çizgeden belli bir sayıda bağlantı ya da düğümün çıkarılması durumunda çizgenin bağlı olması özelliğini kaybetmesidir [20]. Bir ağın yüksek güzergâh çeşitliliğine sahip olması ilgili ağın sağlamlığına işaret etse de [22], sağlamlığın nicel olarak ifade edilmesi gerekir. Bu amaçla, ağın sağlamlığını temsil eden çeşitli matematiksel ölçütler kullanılmaktadır.

Heterojenlik ölçütü bir topolojinin yüksek dereceli merkezi (*hub*) düğümlere sahip olma eğilimini ifade etmektedir [23]. Bir topolojinin *HT* değerinin düşük olması, ağın bölümlenmeye karşı daha dirençli olduğu anlamına gelebilir [20]. Heterojenlik ölçütü aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$HT = \sigma_d / \mu_d \quad (1)$$

(1)'deki σ_d ve μ_d , sırasıyla düğümlerin derece dağılımlarının (d) standart sapmasını ve ortalamasını temsil etmektedir. Şekil 1.2.'de gösterilen örnek fiziksel topolojideki düğüm dereceleri dikkate alındığında $\mu_d = (2 + 3 + 2 + 3 + 2)/5 = 2.4$ olmaktadır. Düğümlerin derece dağılımlarının varyans değeri $(3 \times (2 - 2.4)^2 + 2 \times (3 - 2.4)^2)/5 = 0.24$ ve dolayısıyla $\sigma_d = \sqrt{0.24} = 0.489$ olarak elde edilmektedir. Böylelikle örnek topolojinin HT değeri $0.489/2.4 = 0.204$ olarak bulunmaktadır.

Topolojideki bir düğüme ait kümelenme katsayısı (*Clustering Coefficient-CC*) ölçüt değeri, komşular arasındaki bağlantısallığının seviyesini ölçer. Bir topoloji çizgesine ait yüksek CC değeri, çizgenin yüksek güzergâh çeşitliliğine sahip olduğunu işaret ettiğinden çizgenin bölümlenmeye karşı sağlamlığının bir göstergesidir. Bir topolojideki herhangi bir v düğümü için CC değeri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [24]:

$$CC_v = 2 N_v / d_v (d_v - 1) \quad (2)$$

(2)'deki CC_v , v düğüme ait CC değerini, N_v ve d_v sırasıyla v düğümünün komşularının aralarındaki bağlantı sayısını ve v düğümünün derecesini temsil etmektedir. Topolojiye ait kümelenme katsayısı ise tüm düğümlerin kümelenme katsayısı değerlerinin ortalamasıdır:

$$CC = \frac{1}{|V|} \sum_{v \in V} CC_v \quad (3)$$

(3)'teki V ve $|V|$ sırasıyla çizgeye ait düğümler kümesini ve çizgedeki düğümlerin sayısını temsil etmektedir. CC 'nin değer aralığı 0 ile 1 arasındadır ve $CC = 1$ olması çizgenin tam bağlı olduğunu gösterir [24]. Şekil 1.2.'deki örnek fiziksel topoloji için R_0 düğüme ait N_v ve d_v sırasıyla 1 ($(R_1 - R_3)$ bağlantısından dolayı) ve 2 değerlerini almaktadır. Böylelikle $CC_{R_0} = 1$ olmaktadır. Çizgedeki diğer düğümler için kümelenme katsayısı değerleri benzer şekilde hesaplandığında çizgeye ait ortalama CC değeri 0.333 olarak elde edilmektedir.

Kenar bağlantısallığı (*Edge Connectivity-EC*) ve düğüm bağlantısallığı (*Vertex Connectivity-VC*) ölçütleri sırasıyla topolojinin bölümlenmesi için topolojiden çıkarılması

gereken minimum kenar ve düğüm sayısını ifade etmektedir [25]. Bağlantısallık değerinin büyük olması, bir topolojinin sağlamlığının diğer bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir [24]. Herhangi bir bağlı topoloji için $VC(G) \leq EC(G) \leq d_{min}$ ilişkisi geçerlidir. Burada d_{min} , topolojiye ait minimum düğüm derecesini ifade eder ve bağlantısallık değeri için bir üst sınırı belirler. Şekil 2.1.'deki fiziksel topoloji için $VC(G)=EC(G)=2$ olmaktadır. Bunun nedeni, $(R_1 - R_2)$ ve $(R_3 - R_4)$ bağlantılarının veya R_1 ve R_3 düğümlerinin çizgeden silinmesi durumunda çizgenin bölünmesidir.

Ortalama yol uzunluğu ölçütü, çizgedeki tüm düğüm çiftleri arasındaki minimum uzaklıkların ortalamasıdır ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [26]:

$$L = \frac{1}{|V| \cdot (|V|-1)} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, j \neq i} L_{ij} \quad (4)$$

(4)'teki L_{ij} , i ve j düğümleri arasındaki en kısa yol mesafesini temsil etmektedir. $L \geq 1$ ilişkisi geçerlidir ve $L = 1$ olması çizgenin tam bağlı olduğunu ifade eder. L değerinin küçük olması çizge sağlamlığının yüksek olduğu anlamına gelebilir [24]. Şekil 1.2.'de gösterilen fiziksel topoloji için, R_0 düğümü ile diğer düğümler arasındaki en kısa yolların toplam değeri $1 + 1 + 2 + 2 = 4$ olmaktadır. Aynı hesaplama tüm düğümler için yapıldığında, çizge için en kısa yol uzunlukları toplamı 28'dir ve böylelikle $L = \frac{1}{5 \cdot (5-1)} 28 = 1.4$ olarak bulunmaktadır.

Verimlilik (*Efficiency-E*) ölçütü ($0 \leq E \leq 1$), ortalama yol uzunluğu ölçütünün bir başka varyantı olarak kullanılabilir. Bu ölçüt, i ve j düğümleri arasındaki L_{ij} en kısa yol değerinin çarpımsal olarak tersi alınarak hesaplanabilir [26]:

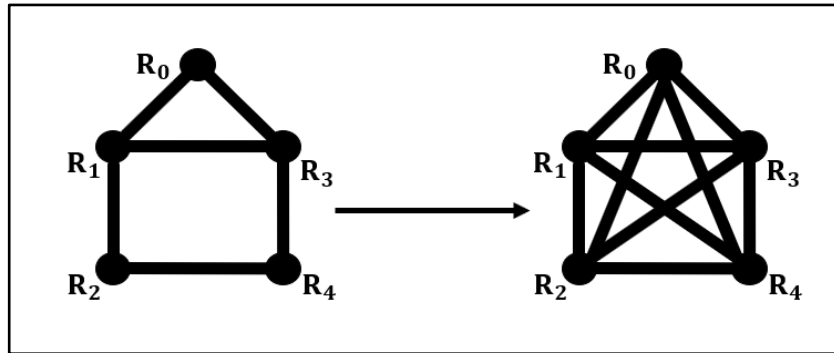
$$E = \frac{1}{|V| \cdot (|V|-1)} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, j \neq i} L_{ij}^{-1} \quad (5)$$

L 'ye benzer şekilde, $E = 1$ olması çizgenin tam bağlı olduğunu ifade eder. E değerinin büyük olması çizge sağlamlığının yüksek olabileceğinin bir göstergesidir [24]. Şekil 1.2.'deki fiziksel topoloji için, en kısa yolların çarpımsal tersi kullanıldığında $E = 0.8$ olarak bulunmaktadır.

1.5. Araştırma Hedefi ve Katkıları

MRC tarafından üretilecek ST'lerin sayısı, ağ planlayıcısı tarafından algoritmaya bir girdi olarak verilir. Üretilecek ST sayısının büyük seçilmesi, MRC algoritmasının başarılı bir şekilde sonlanma ihtimalini topolojiye bağlı olarak artırır. Buna karşın, büyük sayıda ST'nin üretilmesi hesaplama karmaşıklığını ve yüksek sayıda yönlendirme tablosunun düğümlerde saklanması için ihtiyaç duyulan bellek miktarını arttırmaktadır [20][27]. Bu nedenle üretilecek ST sayısının küçük seçilmesi durumunda bile MRC'nin başarımının sağlanabilmesi, ağın ölçeklenebilirliği açısından oldukça önem taşımaktadır. Bununla birlikte, herhangi bir fiziksel topolojideki muhtemel tüm arıza senaryolarına karşın koruma sağlamak amacıyla ihtiyaç duyulan ST adedinin ağ topolojisine bağlı olduğu bilinmektedir [28].

Bu tez çalışmasında, ST sayısının küçük seçilmesi durumunda dahi MRC'nin başarımı için çizge büyütme yaklaşımını esas alan bir yöntem önerilmekte ve geniş bir topoloji havuzu kullanılarak önerilen yöntemin performans analizi yapılmaktadır. Çizge büyütme, bir çizgenin belirli bir özelliğini en üst düzeye çıkarmak için çizgede mevcut olmayan bağlantı veya düğümlerin çizgeye eklenmesi işlemidir [29]. Bu işlem, bir çizgenin bölümlenmeye karşın direncini arttırmak amacıyla da kullanılabilir. Şekil 1.7 örnek bir çizge büyütme işlemini göstermektedir. Çizgede var olmayan bağlantıların tümü çizgeye eklenerek, çizge tam bağlı hale getirilmekte ve böylelikle bir düğümden tüm düğümlere erişim sağlanmaktadır. Çizgenin tam bağlı olması, çizgenin sağlamlığının en fazla olduğu durumu ifade etmektedir.



Şekil 1.6. Çizge büyütme işlemi ile bir çizgenin tam bağlı hale getirilmesi

Çizge büyütme işlemi, en az sayıda bağlantı ekleyerek çizge sağlamlığını en fazla arttıracak şekilde yapılmalıdır. Gerçek dünyadaki fiziksel bir ağ topolojisine mevcut olmayan bir bağlantının eklenmesi için, bağlantıya komşu düğümlere yeni bir ağ arayüz kartının yüklenmesi ve yeni arayüzler arasında fiziksel bir bağlantının kurulması gerekmektedir. Dolayısıyla, çok sayıda yeni bağlantı kullanılarak yapılan bir çizge büyütme işlemi maliyeti belirgin bir şekilde arttırabilmektedir [30]. Bu çalışmada önerilen çizge büyütme yaklaşımında, çizgenin sağlamlığını arttırmak için çizgeye eklenecek olan bağlantılar, heterojenlik ve kümelenme katsayısı ölçütleri dikkate alınarak belirlenmektedir. Sentetik ve gerçek dünya ağları kullanılarak yapılan deneylerde, önerilen yaklaşımın farklı sağlamlık ölçütleri kullanılması durumundaki performansı analiz edilmiş ve çok daha az sayıda ST kullanılarak MRC başarımının sağlanabildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada, literatürde önerilen topoloji farkındalığına sahip çeşitli MRC varyantlarının performansları da detaylı olarak analiz edilmiştir [20].

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Çoklu Yönlendirme Konfigürasyonları

MRC'nin üreteceği ST sayısının küçük seçilmesi durumunda dahi algoritmanın başarılı bir şekilde sonlanması ve böylelikle ağın ölçeklenebilirliğinin artırılması amacıyla yapılmış çalışmalar mevcuttur. [31]'de önerilen yaklaşım, orijinal algoritmadan farklı olarak tüm bağlantıların izole edilmesi gerekliliğini esnetmekte ve böylelikle daha az sayıda ST kullanarak MRC'nin başarımını temin etmeye çalışmaktadır. [27]'de önerilen yaklaşım her bir ST'yi yayılan bir ağaç (*spanning tree*) şeklinde inşa etmektedir. Yayılan ağaç, bir topolojideki tüm düğümleri birbirine bağlayan minimal bağlantı kümesini temsil ettiğinden, bir ST'de içerilmeyen ya da diğer bir ifadeyle izole edilen bağlantıların sayısı maksimize edilmiş olur ve böylelikle daha az sayıda ST kullanarak tüm ağ bileşenleri izole edilmeye çalışılır. [20]'deki çalışmada, ağın bölümlenmeye karşı sağlamlığının artırılmasını hedefleyen iki adet yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşımlar, orijinal algoritmadan farklı olarak, ST'lerde izole edilecek düğümlerin seçimi için düğümleri derecelerine göre yüksekte alçağa doğru sıralamakta ve yüksek dereceli düğümlerin izolasyonuna öncelik vermektedir. Bu önceliklendirme mekanizması sayesinde, ST omurgalarının bölümlenmeye karşı daha dirençli hale geldiği ve böylelikle MRC'nin başarımının daha az sayıda ST kullanılarak sağlanabileceği gösterilmektedir. Ayrıca, düğümün izole edileceği ST'nin akıllıca seçimi için düğüm derecesi ve topolojinin heterojenlik düzeyi dikkate alınmaktadır. [28]'deki çalışma, MRC'nin başarımı için gerekli olan minimum ST sayısının fiziksel topolojinin yapısal özellikleriyle yakından ilişkili olduğu ve dolayısıyla ST sayısını azaltmak için önerilecek yaklaşımların performans analizinin farklı yapısal karakteristikleri temsil eden geniş topoloji havuzları kullanılarak yapılması gerektiğini vurgulamaktadır.

Yazılım Tanımlı Ağlarda (Software Defined Networks-SDN) oluşabilecek arızaların onarımı için MRC tekniğinin kullanılmasını öneren çalışmalar mevcuttur. SDN, ağın merkezi bir denetleyici tarafından yönetildiği ve veri/kontrol düzlemlerinin birbirinden ayrıldığı bir ağ mimarisidir. Bu mimariye göre, veri düzleminde bulunan SDN yetenekli anahtarlar kontrol düzleminde bulunan denetleyici tarafından yönetilmektedir [32]. SDN'de arıza onarımı, restorasyon ve koruma adı verilen yaklaşımlarla yapılabilmektedir [33]. Her iki yaklaşımda da alternatif yollar arıza oluşmadan önce hesaplanmaktadır. Bununla beraber alternatif yollar için kaynak tahsisi, koruma yaklaşımında arıza oluşmadan önce, restorasyon

yaklaşımında ise arıza tespit edildiğinde yapılmaktadır. [34]'de MRC'nin bir restorasyon yaklaşımı olarak kullanımı önerilmektedir. [35]'te, MRC bir koruma yaklaşımı olarak gerçekleştirilmekte ve farklı onarım yaklaşımlarının onarım süreleri karşılaştırılmaktadır. İlgili çalışmada, koruma yaklaşımının restorasyona göre onarım sürelerini önemli ölçüde azalttığı belirtilmektedir. [36]'da MRC tekniğinin Yazılım Tabanlı 5G mimarisi için kullanımı açıklanarak farklı onarım yaklaşımları kıyaslanmakta ve koruma yaklaşımına ait alternatif yol uzunluklarının optimum uzunluklara yakın olduğu belirtilmektedir. [37]'deki çalışma, P4 programlama dili kullanılarak SDN'de MRC yönteminin nasıl gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.

[38]'de arızalı olmadığı halde, ST'lerde izole edilerek kullanılmayan bazı bağlantıların yönlendirme maliyetini arttırdığı belirtilerek, bu bağlantıların mümkün olduğunca kullanılmasına dayalı bir yaklaşım önerilmektedir. [39]'da iletişim ağlarındaki enerji tüketimini azaltmak için MRC kullanan bir yaklaşım önerilmektedir. Bu yaklaşıma göre ilk olarak belirli koşulları sağlayan bir bağlantı kümesi oluşturulur. Bu kümeden sadece gerekli olan bağlantılar yedekleme konfigürasyonlarına dahil edilerek güç tüketiminin azaltılması hedeflenir. [40]'ta kablosuz ağlarda, MRC'nin kullanımı için modifiye edilmiş bir yaklaşım önerilmektedir. MRC'nin arıza durumlarında paketleri sürekli iletmesi, arızayı tespit eden yönlendiricinin diğer yönlendiricilere haber vermeden yerel bir yönlendirme başlatabilmesi gibi avantajların kablosuz sensör ağlardaki ihtiyaçları karşılamakta uygun olduğu belirtilmektedir. [41]'de veri merkezlerinde (datacenter) onarım için MRC tekniği kullanımı gösterilmektedir.

2.2. Diğer IPFRR Teknikleri

Maksimal Fazlalık Ağaçları (MRT) tekli bağlantı arızalarına karşı tam alternatif yol kapsamı sağlayan bir başka tekniktir. MRT'yi çalıştıran her bir yönlendirici, ağdaki olası her hedefe ulaşabilen, mavi ve kırmızı adı verilen maksimum yedekli ağaç çiftlerini ön etkin olarak hesaplamaktadır. Bir arıza tespit edildiğinde arızadan etkilenen trafik mavi veya kırmızı ağaçlardan arızalı bağlantıyı içermeyen ağaç kullanılarak yönlendirilmeye başlanır. Öte yandan, arızadan etkilenmeyen trafik ise en kısa yol ağacına göre iletmeye devam etmektedir [17][18]. MRC ile kıyaslandığında, MRC'nin yapılandırılabilir sayıda ST'ye sahip olması farklı bağlantı yoğunluklarına sahip büyük ağlar için ölçeklenebilir alternatif

yollar sağlarken, MRT'de ağ büyüklüğü ve yoğunluğu arttıkça alternatif yol uzunlukları da artmaktadır [19].

Uygun Yönlendirme Yapılandırmaları (Available Routing Constructs-ARC) ağdaki tüm hedefler için yönlendirme güzergahları hesaplayan bir yöntemdir [42]. Bu yöntem hızlı yeniden yönlendirme, yük dengeleme işlemlerini basitleştirme gibi işlemler için kullanılabilir. MRT tekniği ile kıyaslandığında ARC'nin ürettiği alternatif yol uzunlukları MRT'ye göre daha kısadır. ARC'de alternatif yolların hesaplama süresi MRT'ye göre daha uzun sürebilmektedir [43].

Not-Via tekniğinde bir yönlendirici bir hedefe paket iletmek için kullanacağı güzergâh üzerinde bir arıza tespit etmesi durumunda, arızalı bölüm içerilmeyecek şekilde kendisi ile hedef arasında en kısa yol hesaplaması yapar. Paketi, normal güzergâh üzerinde bulunan fakat arızalı olduğu için hedefe erişmek için kullanılamayacak olan arızalı bileşen ve hedef adres bilgisini içerecek şekilde kapsüller ve hedefe iletir. Paket nihai hedefe ulaştığında kapsülleme kaldırılır. Bu durumda, kaynak ile hedef arasındaki tüm yönlendiricilerin de arızalı bölümün içerilmeyeceği şekilde en kısa yol hesaplamaları yapması gereklidir. Böylelikle, arızalara karşı tam onarım kapsamı sağlanmaktadır [7]. Not-Via ile MRT tekniği ile karşılaştırıldığında, Not-Via daha kısa alternatif yollar üretebilmektedir [44].

Çoklu Atlama Onarım Yolları tekniğinde bir yönlendirici bir bağlantı arızası tespit ettiğinde, başarısız bağlantı yerine onarım yolu kullanabilmektedir. Onarım yolları, arızalar oluşmadan önce hesaplanmakta ve bir arıza tespit edildiğinde ise hemen etkinleştirilmektedir [8] [9] [10].

2.3. Çizge Büyütme

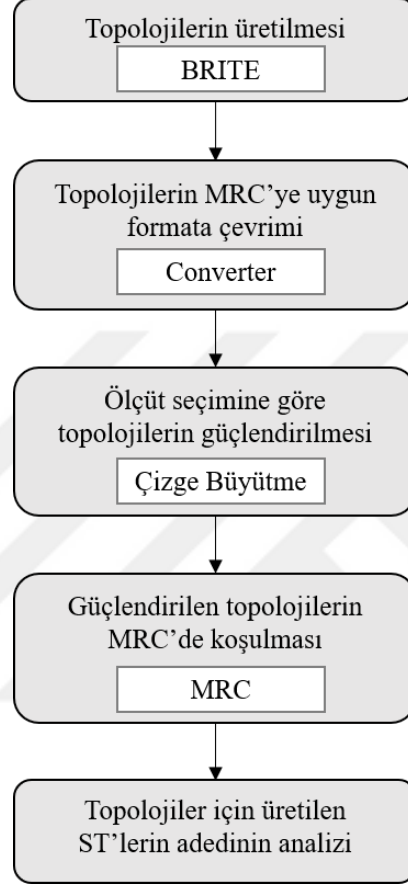
Çizge büyütme işleminde, kullanılacak olan bağlantıların seçimini dikkatlice yapmak ve eklenecek olan bağlantı sayısını en az sayıda tutmak maliyet açısından büyük önem taşımaktadır. Çizge büyütme işleminin NP bir problem olduğu bilinmektedir [29]. Buna göre, [45]'te sunulan yaklaşım, ilk olarak çizge büyütme işleminde kullanılacak aday bağlantıları belirlemektedir. Ardından çizge sağlamlığı, herhangi bir çizge sağlamlık ölçütüne bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Aday bağlantılar arasından fonksiyonun değerini olumlu etkileyen, en iyi bağlantılar seçilerek, bu bağlantıların çizgeye eklenmesi önerilmektedir. [46]'daki çalışmada, topoloji 2-bağlı hale gelene kadar topolojiyi güçlendiren bir algoritma önerilmiş, optimum çözümün bulunabilmesi için bir formülasyon

verilerek, bu algoritmayı polinom zamanlı hale getirmek için sezgisel bir algoritma sunulmuştur. [47]'de çizgenin küçük bir özetini temel alan ve tüm çizge üzerinde en kısa yol hesaplamaları gerektirmeyen sezgisel bir algoritma önerilmiştir. [48]'de düğümlerin ortak komşularını ve düğüm derecelerini dikkate alarak üç farklı yaklaşım içeren sezgisel bir algoritma önerilmiştir. [30]'da çizgenin bağlantısallığını arttırmayı hedefleyen çeşitli yaklaşımlar sunulmaktadır. [49]'daki çalışmada önerilen yaklaşım, kenar bağlantısallığı ölçütünü dikkate alarak minimum sayıda bağlantı eklenmesini hedeflemektedir. [50]'de eklenen en az sayıdaki bağlantı ile çizge çapının düşürülmesini hedefleyen yaklaşımlar önerilmektedir. [51]'de çizgenin merkeziliğini arttırarak çizgenin güçlendirilmesi hedeflenmiştir.



3. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

3.1. MRC Performans Analizi için Otomasyon Aracı



Şekil 3.1. Otomasyon adımları

Bu çalışmada önerilen çizge büyütme yaklaşımı kullanılarak MRC için elde edilen performans artışının miktarı, fiziksel topolojinin yapısal karakteri ile yakından ilişkilidir. Dolayısıyla, sağlıklı bir performans analizinin yapılabilmesi için, performans deneylerinde farklı yapısal özelliklere sahip çok sayıda topoloji çizgesi içeren bir havuzun kullanılması büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda, değişken sayıda düğüme ve bağlantı yoğunluklarına sahip olan topoloji çizgelerinin farklı matematiksel modeller kullanılarak üretilmesi, üretilen her bir çizge üzerinde MRC algoritmasının koşulması ve performansının analiz edilmesi için bir otomasyon aracı geliştirilmiştir. Bu araca ait işlem adımları Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, farklı yapısal özelliklere sahip topoloji çizgeleri BRITE [50] aracı kullanılarak üretilmektedir. Ardından, BRITE formatındaki her

bir çizge, MRC algoritmasının çizgeleri işleyebilmesi için ihtiyaç duyduğu farklı bir formata dönüştürülmekte ve seçilen çizge sağlamlık ölçütüne uygun olarak çizge büyütme işlemine tabi tutulmaktadır. Büyütülen topolojiler üzerinde MRC algoritması koşularak, elde edilen ST değerleri analiz edilmek amacıyla dosya sisteminde saklanmaktadır.

3.2. Çizge Büyütme Yaklaşımı ile MRC Performansının İyileştirilmesi

3.2.1. Çizge Büyütme Yaklaşımı

Algoritma 1, bir topoloji çizgesine daha önce mevcut olmayan bağlantıları akıllıca ekleyerek çizgenin büyütülmesi ve büyütülmüş çizge üzerinde MRC'yi çalıştırarak ST'lerin hesaplanması için gerekli olan işlem adımlarını göstermektedir.

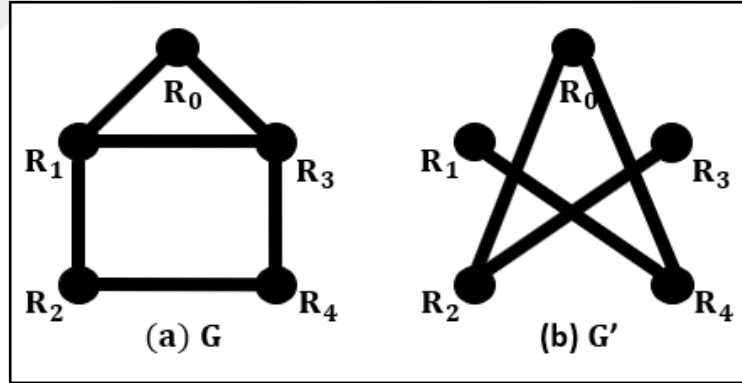
Tablo 3.1. Çizge büyütme algoritması

Algoritma 1
<p>Girdi: $G(V,E)$: Fiziksel topoloji (V: Döğümler kümesi, E: Kenarlar kümesi) j: Ekleniecek bağlantı sayısı N: Üretilecek ST adedi</p> <p>Çıktı: ST: Sanal topolojiler kümesi</p> <p>Başla 1: $G'(V', E') \leftarrow \text{topolojiTümleyeniniHesapla}(G)$; 2: $i \leftarrow 0$ 3: while $i < E'$ do 4: <i>bağlantıEkle</i>($G, l_i \in E'$); 5: sağlamlıkÖlçütüDegeri $\leftarrow \text{ölçütDegeriHesapla}(G)$; 6: HM $\leftarrow (l_i \in E', \text{sağlamlıkÖlçütüDegeri})$; 7: <i>bağlantıSil</i>($G, l_i \in E'$); 8: end while 9: <i>sırala</i>(HM); 10: $i \leftarrow 0$ 11: while $i < j$ do 12: <i>bağlantıEkle</i>($G, \text{HM}[i].1$); 13: end while 14: ST $\leftarrow \text{mrcAlgoritması}(G,N)$;</p> <p>Bitir</p>

Satır 1'deki *topolojiTümleyeniniHesapla()* fonksiyonu, fiziksel topoloji çizgesinin (G) tümleyenini hesaplamaktadır. Şekil 3.2.(a)'daki örnek topolojinin tümleyeni Şekil 3.2.(b)'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, tümleyen çizgenin (G') kenarlar kümesi (E'), yalnızca fiziksel topolojiye ait kenarlar kümesinin (E) elemanı olmayan kenarları içerir.

Satır 3-8, E' 'deki her bir kenarı fiziksel topolojiye ayrı ayrı ekleyerek (Satır 4), büyütülmüş çizgenin bölümlenmeye karşı direncini temsil eden sağlamlık ölçütünü hesaplayıp (Satır 5), çizgeye eklenen kenar bilgisiyle beraber bir veri yapısı olan komut çizelgesinde (HashMap-HM) saklamaktadır (Satır 6). G' 'ye eklenen her bir kenar karşılık düşen sağlamlık ölçütünün hesaplanmasının ardından G' 'den silinmektedir (Satır 7). Satır 9'da HM'deki veriler ölçüt değerlerine göre sıralanmaktadır.

Satır 5'teki *ölçütDeğeriHesapla()* fonksiyonunun gerçekleşmesinde, sağlamlık ölçütü olarak heterojenlik ve kümelenme katsayısı kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu fonksiyonun gerçekleşmesinde karakteristik yol uzunluğu gibi farklı ölçütler de kullanılabilir [45].



Şekil 3.2. Tümleyen çizgenin hesaplanması

Tablo 3.2, Şekil 3.2.(a)'daki topolojiye, Şekil 3.2.(b)'deki tümleyen çizgeye ait her bir kenarın ayrı ayrı eklenmesi durumunda heterojenlik sağlamlık ölçütünün alacağı yeni değeri göstermektedir. Örneğin, 0-4 kenarının eklenmesi durumunda, heterojenlik değeri 0.061 azalarak 0.142 olmaktadır.

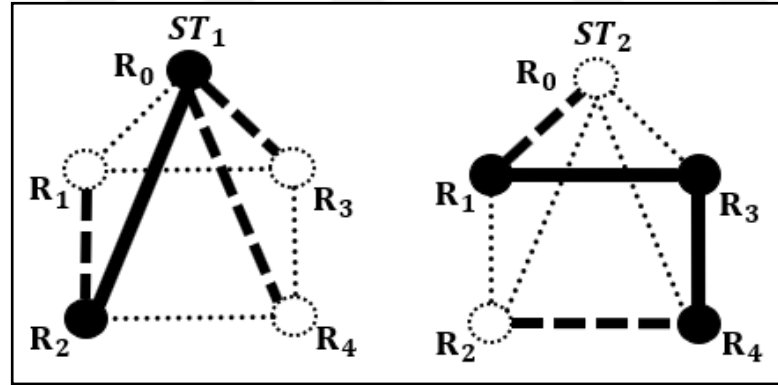
[20]'deki çalışmada, heterojenliğin bir ağ topolojisinin yüksek dereceli düğümlere sahip olma eğilimini ifade ettiği belirtilerek, heterojenlikteki artışın bir çizgenin bölümlenmeye karşı direncini azaltacağı ve dolayısıyla MRC'nin başarılı bir şekilde sonlanması için daha fazla sayıda ST gerektireceği vurgulanmaktadır. Bu nedenle, bir

çizgenin büyütülmesi için çizgenin heterojenliğini azaltacak bağlantıların tercih edilmesi MRC'nin performansının iyileştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Tablo 3.2. Tümleyen bağlantılar ve HT değerleri

Sıra No	Kenar	HT	ΔHT
1	0-4	0,142	-0,061
2	0-2	0,142	-0,061
3	1-4	0,267	0,063
4	2-3	0,267	0,063

Satır 11-13, arzu edilen sayıda kenarı Satır 9'da belirlenen sıraya göre fiziksel topolojiye sırasıyla ekler. Örneğin, Algoritma 1'de $j=2$ seçilmesi durumunda, Şekil 3.2.(a)'daki topolojiye, heterojenliği en yüksek oranda azaltmaları nedeniyle 0-4 ve 0-2 kenarları eklenir.



Şekil 3.3. Algoritma 1 tarafından hesaplanan örnek ST'ler

Satır 14 ise büyütülmüş çizge üzerinde MRC algoritmasını koşarak ST'leri oluşturur. Şekil 3.3 çizge büyütme ön işleminin ardından, $N=2$ seçilmesi durumunda G için üretilen ST'leri göstermektedir. Çizge büyütme ön işlemi uygulanmadığında, yalnızca $N \geq 4$ seçilmesi durumunda MRC'nin başarılı bir şekilde sonlanabileceğine dikkat edilmelidir (Şekil 2.4).

Algoritma 1'in karmaşıklık değeri, *topolojiTümleyeniniHesapla()* ve *ölçütDegeriHesapla()* fonksiyonları ile orijinal MRC algoritmasının hesaplama karmaşıklıkları dikkate alınarak hesaplanabilir. *topolojiTümleyeniniHesapla()* fonksiyonu, tümleyen çizgeye ait kenar kümesini hesaplamak için, mevcut kenar kümesini tüm düğümlerin 2'li kombinasyonlarının meydana getireceği kenar kümesinden çıkarmaktadır. Buna göre bu fonksiyon için karmaşıklık değeri $O(C(|V|,2)-|E|)$ olur. MRC algoritmasının en kötü durumdaki hesaplama karmaşıklığı, N ve Δ sırasıyla üretilecek ST sayısını ve fiziksel topolojideki en büyük düğüm derecesini temsil etmek üzere $O(N\Delta|V||E|)$ olarak ifade edilir [16]. *topolojiTümleyeniniHesapla()* fonksiyonu ve MRC algoritması için toplam karmaşıklık değeri $O(C(|V|,2)-|E|) + O(N\Delta|V||E|)$ olmaktadır.

ölçütDegeriHesapla() fonksiyonu için karmaşıklık değeri kullanılan ölçüte göre değişkenlik gösterebilmektedir. Algoritma 1'in toplam karmaşıklık değeri, $O(C(|V|,2)-|E|) + O(N\Delta|V||E|)$ ile *ölçütDegeriHesapla()* fonksiyonunun dikkate aldığı ölçütün hesaplama karmaşıklık değerinin toplanmasıyla elde edilir. Yapılan deneylerde kullanılan ölçütlerin hiçbiri orijinal MRC algoritmasının hesaplama karmaşıklığının üst sınırını (*upper bound*) değiştirmemektedir. Deneylerde kullanılan ölçütlerin her biri için ilgili karmaşıklık analizi takip eden bölümlerde verilmektedir.

3.2.2. Sentetik Ağlar İçin Performans Analizi

Bu bölümde, Algoritma 1'in performansını değerlendirmek amacıyla, BRITE kullanılarak rastgele şekilde üretilen topolojilerden oluşan geniş bir havuz kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin sonuçları rapor edilmektedir. Deneylerde, çizge sağlamlılığının ölçümü için heterojenlik ve kümelenme katsayısı ölçütlerini dikkate alan Algoritma 1 varyantı kullanılmaktadır. Ayrıca, çizge büyütmede kullanılacak bağlantıların rastgele belirlendiği yaklaşımın performansı da analiz edilmektedir. Yapılan deneylerde, topoloji havuzundaki her bir fiziksel topoloji için Algoritma 1 koşularak, MRC'nin gerektirdiği minimum ST sayısı belirlenmektedir. Bu sayı, üretilecek ST adedinin (N) 2'den başlayarak artan bir şekilde ayarlanması durumunda MRC'nin ilk başarılı koşumu sonucunda üretilen ST'lerin adedine karşılık düşmektedir. Yapılan deneylerde, üretilen ST adetlerinin ortalaması ($\overline{min_{ST}}$), çizge büyütme yaklaşımının MRC algoritmasını iyileştirme yüzdesi (IP), standart sapma (σ) ve güven aralığı değerleri rapor edilmektedir. Güven aralıkları, yapılan deneylerin sonsuz kere tekrar edilmesi durumunda elde edilecek performans

sonuçlarının hangi sınırlar içerisinde değişeceğini kullanıcı tarafından seçilen bir güven düzeyi dahilinde belirlemektedir. Güven aralığı hesaplamasında aşağıdaki formül kullanılmaktadır [53]:

$$\overline{min}_{ST} \mp Z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

(6)'ya göre Z , σ ve n değerleri, sırasıyla güven düzeyine göre belirlenen bir katsayıyı, standart sapmayı ve gözlem sayısını temsil etmektedir. %95 güven düzeyi için Z değeri 1,960 olmaktadır [54]. Bu çalışma için n değeri, performans analiz için kullanılan her bir havuzdaki fiziksel topoloji sayısına karşılık düşmektedir.

Tablo 3.3. Topoloji havuzları

Havuz İsmi	Model	$ \bar{V} $	$ \bar{E} $
P_1	GLP	50	118,72
P_2	GLP	100	242,62
P_3	GLP	150	368,6
P_4	GLP	200	491,58
P_5	GLP	250	618,72
P_6	GLP	300	743,7
P_7	Waxman	50	100
P_8	Waxman	100	200
P_9	Waxman	150	300
P_{10}	Waxman	200	400
P_{11}	Waxman	250	500
P_{12}	Waxman	300	600

Tablo 3.3, deneylerde kullanılan, her biri 100 adet topoloji içeren toplam 12 adet havuzun (P) her biri için ortalama düğüm ($|\bar{V}|$) / kenar ($|\bar{E}|$) sayılarını ve topoloji üretimi için matematiksel modeli göstermektedir. Topoloji üretimi için GLP [55] ve Waxman [56] matematiksel modelleri kullanılmış ve üretilen topolojilerdeki her bir düğümün derecesi

yaklaşık 2 olarak seçilmiştir. Bir havuz içerisinde bulunan tüm topolojilerin düğüm sayıları aynıdır.

Tablo 3.4. Ortalama çizge büyütme maliyeti (%)

C	2	4	6	8	10	15	25	50	75	100
P₁	1,68	3,36	5,05	6,73	8,42	12,63	21,05	42,11	63,17	84,23
P₂	0,82	1,64	2,47	3,29	4,12	6,18	10,30	20,60	30,91	41,21
P₃	0,54	1,08	1,62	2,17	2,71	4,06	6,78	13,56	20,34	27,12
P₄	0,40	0,81	1,22	1,62	2,03	3,05	5,08	10,17	15,25	20,34
P₅	0,32	0,64	0,96	1,29	1,61	2,42	4,04	8,08	12,12	16,16
P₆	0,26	0,53	0,80	1,07	1,34	2,01	3,36	6,72	10,08	13,44
P₇	2	4	6	8	10	15	25	50	75	100
P₈	1	2	3	4	5	7,5	12,5	25	37,5	50
P₉	0,66	1,33	2	2,66	3,33	5	8,33	16,66	25	33,33
P₁₀	0,5	1	1,5	2	2,5	3,75	6,25	12,5	18,75	25
P₁₁	0,4	0,8	1,2	1,6	2	3	5	10	15	20
P₁₂	0,33	0,66	1	1,33	1,66	2,5	4,16	8,33	12,5	16,66

Tablo 3.4, topoloji havuzları için büyütme işleminin ortalama maliyet (C) yüzdesini göstermektedir. C , bir havuzdaki tüm fiziksel topolojilere eklenen toplam yeni bağlantı sayısının topolojilerdeki toplam mevcut bağlantı sayısına oranıdır. Deneylerde, her bir fiziksel topolojiye 2 ile 100 aralığında değişen sayıda (j) yeni bağlantı eklenmektedir. Tabloda görüldüğü gibi, j değeri arttıkça C değeri de artmaktadır.

3.2.2.1. Heterojenlik Yaklaşımı

Bu bölümde, heterojenlik (HT) ölçütünü dikkate alan Algoritma 1 varyantı için elde edilen deney sonuçları rapor edilmektedir. [20]'de belirtildiği üzere ağın HT değerinin artması bölümlenmeye karşı direncini azaltacağından, çizge büyütme sürecinde HT değerini azaltacak olan bağlantıların seçilmesi önem taşımaktadır. HT değerinin hesaplanmasında (1)'de belirtilen formül kullanıldığına N sayıda konfigürasyon için, Δ en büyük düğüm

derecesini temsil etmek üzere Algoritma 1 için karmaşıklık değeri $O(C(|V|,2)-|E|) + O(N\Delta|V||E|) + O(\Delta|V|)$ olmaktadır.

Tablo 3.5. HT ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütmeyle ait performans sonuçları

<i>HT</i>	<i>j</i>	$\overline{min_{ST}}$	<i>IP</i>		<i>j</i>	$\overline{min_{ST}}$	<i>IP</i>		<i>j</i>	$\overline{min_{ST}}$	<i>IP</i>
<i>P</i> ₁	0	3,963	-	<i>P</i> ₂	0	4,632	-	<i>P</i> ₃	0	5,174	-
	2	3,804	4,01		2	4,582	1,07		2	5,139	0,67
	4	3,829	3,38		4	4,506	2,72		4	5,034	2,70
	6	3,609	8,93		6	4,506	2,72		6	5,023	2,91
	8	3,658	7,69		8	4,430	4,36		8	5,011	3,15
	10	3,573	9,84		10	4,341	6,28		10	4,953	4,27
<i>P</i> ₄	0	5,688	-	<i>P</i> ₅	0	5,962	-	<i>P</i> ₆	0	6,142	-
	2	5,611	1,35		2	5,759	3,40		2	5,945	3,20
	4	5,533	2,72		4	5,721	4,04		4	5,967	2,84
	6	5,511	3,11		6	5,734	3,82		6	5,989	2,49
	8	5,455	4,09		8	5,683	4,67		8	6,054	1,43
	10	5,411	4,86		10	5,708	4,26		10	5,989	2,49
<i>P</i> ₇	0	3,63	-	<i>P</i> ₈	0	4,01	-	<i>P</i> ₉	0	4,07	-
	2	3,46	4,68		2	3,92	2,24		2	4,01	1,47
	4	3,34	7,98		4	3,81	4,98		4	3,99	1,96
	6	3,25	10,46		6	3,66	8,72		6	3,96	2,70
	8	3,18	12,39		8	3,63	9,47		8	3,93	3,43
	10	3,11	14,32		10	3,58	10,72		10	3,91	3,93
<i>P</i> ₁₀	0	4,31	-	<i>P</i> ₁₁	0	4,20	-	<i>P</i> ₁₂	0	4,27	-
	2	4,25	1,39		2	4,17	0,71		2	4,24	0,70
	4	4,15	3,71		4	4,18	0,47		4	4,21	1,40
	6	4,10	4,87		6	4,17	0,71		6	4,23	0,93
	8	4,09	5,10		8	4,12	1,90		8	4,31	-0,93
	10	4,11	4,64		10	4,04	3,80		10	4,20	1,63

Tablo 3.5 deneylerde kullanılan tüm havuzlar için *HT* yaklaşımına göre 2 ile 10 arasındaki bağlantı ilaveleriyle (*j*) elde edilen $\overline{min_{ST}}$ ve *IP* değerlerini göstermektedir. *j* = 0, havuzlardaki fiziksel topoloji çizgelerine herhangi bir ilave bağlantının eklenmediği orijinal MRC'yi temsil etmektedir. Tabloda görüldüğü gibi, *HT*'ye dayalı yaklaşımla elde edilen tüm $\overline{min_{ST}}$ değerleri, orijinal MRC'ye göre genellikle daha küçüktür. Ayrıca *j* değeri arttıkça $\overline{min_{ST}}$ 'deki azalma miktarı da artmaktadır. Örneğin, *P*₁ için *j* = 6 seçildiğinde,

fiziksel topoloji büyüklüklerinde %5.05'lik bir artış ile \overline{min}_{ST} değeri 3.609 olarak elde edilir. Bu değer %8.93'lük bir IP değerine karşılık düşmektedir. P_7 için $j = 6$ seçildiğinde, fiziksel topolojilerde %6'luk bir büyüme ile \overline{min}_{ST} değeri 3.25 olmakta ve %10.46'lık bir iyileşme sağlanmaktadır. Orijinal MRC'nin üreteceği ST sayısının en düşük 2 olabileceği ve bu durumun sadece çizgenin tam bağlı olması durumunda garanti edilebileceğine dikkat edilmelidir.

Tablo 3.6. HT ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütmeyle ait standart sapmalar

HT	j	σ		j	σ		j	σ
P_1	0	0,706	P_2	0	0,766	P_3	0	0,878
	2	0,652		2	0,686		2	0,823
	4	0,658		4	0,726		4	0,813
	6	0,619		6	0,570		6	0,762
	8	0,648		8	0,566		8	0,754
	10	0,625		10	0,672		10	0,874
P_4	0	0,889	P_5	0	0,999	P_6	0	0,955
	2	0,784		2	0,930		2	0,803
	4	0,763		4	0,913		4	0,882
	6	0,792		6	0,909		6	0,907
	8	0,896		8	0,907		8	0,941
	10	0,880		10	0,797		10	0,907
P_7	0	0,541	P_8	0	0,458	P_9	0	0,430
	2	0,498		2	0,503		2	0,435
	4	0,473		4	0,503		4	0,479
	6	0,433		6	0,569		6	0,508
	8	0,384		8	0,577		8	0,495
	10	0,312		10	0,550		10	0,471
P_{10}	0	0,483	P_{11}	0	0,402	P_{12}	0	0,443
	2	0,455		2	0,448		2	0,449
	4	0,433		4	0,433		4	0,431
	6	0,458		6	0,401		6	0,465
	8	0,491		8	0,381		8	0,462
	10	0,466		10	0,344		10	0,424

Tablo 3.6, Tablo 3.5'te rapor edilen performans sonuçlarına ait standart sapma (σ) değerlerini göstermektedir. Çizge büyütme işlemi ile elde edilen σ değerleri genellikle

orijinal MRC'den daha küçüktür. Bu durum, çizge büyütme uygulanan topolojilere karşılık düşen ST değerlerinin daha dar bir aralıkta değiştiğine işaret etmektedir.

Tablo 3.7. HT ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütmeyle ait güven aralıkları

<i>HT</i>	<i>j</i>	<i>LL</i>	<i>UL</i>		<i>j</i>	<i>LL</i>	<i>UL</i>		<i>j</i>	<i>LL</i>	<i>UL</i>
<i>P</i> ₁	0	3.81	4.12	<i>P</i> ₂	0	4.46	4.81	<i>P</i> ₃	0	4.98	5.36
	2	3.66	3.95		2	4.43	4.74		2	4.96	5.32
	4	3.68	3.98		4	4.34	4.67		4	4.86	5.21
	6	3.47	3.75		6	4.38	4.64		6	4.86	5.19
	8	3.52	3.80		8	4.30	4.56		8	4.85	5.17
	10	3.43	3.71		10	4.19	4.49		10	4.76	5.14
<i>P</i> ₄	0	5.50	5.88	<i>P</i> ₅	0	5.74	6.19	<i>P</i> ₆	0	5.94	6.34
	2	5.45	5.78		2	5.55	5.97		2	5.78	6.11
	4	5.37	5.69		4	5.52	5.93		4	5.78	6.15
	6	5.34	5.68		6	5.53	5.94		6	5.80	6.18
	8	5.27	5.64		8	5.48	5.89		8	5.86	6.25
	10	5.23	5.60		10	5.53	5.89		10	5.80	6.18
<i>P</i> ₇	0	3.52	3.74	<i>P</i> ₈	0	3.92	4.10	<i>P</i> ₉	0	3.98	4.16
	2	3.36	3.56		2	3.82	4.02		2	3.92	4.10
	4	3.25	3.43		4	3.71	3.91		4	3.89	4.09
	6	3.16	3.34		6	3.55	3.77		6	3.86	4.06
	8	3.10	3.26		8	3.51	3.75		8	3.83	4.03
	10	3.05	3.17		10	3.47	3.69		10	3.82	4.00
<i>P</i> ₁₀	0	4.21	4.41	<i>P</i> ₁₁	0	4.12	4.28	<i>P</i> ₁₂	0	4.18	4.36
	2	4.16	4.34		2	4.08	4.26		2	4.15	4.33
	4	4.06	4.24		4	4.09	4.27		4	4.12	4.30
	6	4.01	4.19		6	4.09	4.25		6	4.14	4.32
	8	3.99	4.19		8	4.04	4.20		8	4.20	4.44
	10	4.02	4.20		10	3.97	4.11		10	4.12	4.28

Tablo 3.7, Tablo 3.5.'deki \overline{min}_{ST} ve Tablo 3.6'daki σ değerleri kullanılarak elde edilen güven aralığı alt (*LL*) ve üst (*UL*) sınır değerlerini listelemektedir. Buna göre çizge büyütme ile elde edilen değerler, genellikle orijinal MRC'ye göre daha küçük ve daha dar aralıklı olmaktadır. Bu durum, yöntemin ve deneylerin güvenilirliğine işaret etmektedir. Örneğin *P*₇ için *j* = 4 seçildiğinde, elde edilen güven aralığı değerlerinin alt ve üst sınır değerleri sırasıyla 3.25 ve 3.43 iken, bu değerler orijinal MRC için 3.52 ve 3.74 olmakta ve buna göre

çizge büyütme ile elde edilen güven aralığı üst sınır değeri, orijinal MRC'nin alt sınır değerini aşmamaktadır.

Tablo 3.8. HT ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütmeyle ait performans sonuçları

<i>HT</i>	<i>j</i>	\overline{min}_{ST}	<i>IP</i>		<i>j</i>	\overline{min}_{ST}	<i>IP</i>		<i>j</i>	\overline{min}_{ST}	<i>IP</i>
<i>P</i> ₁	0	3,963	-	<i>P</i> ₂	0	4,632	-	<i>P</i> ₃	0	5,174	-
	15	3,439	13,22		15	4,164	10,10		15	4,813	6,97
	25	3,146	20,61		25	3,936	15,02		25	4,616	10,78
	50	2,829	28,61		50	3,481	24,84		50	4,093	20,89
	75	2,731	31,08		75	3,341	27,87		75	3,906	24,50
	100	2,670	32,62		100	3,215	30,59		100	3,767	27,19
<i>P</i> ₄	0	5,688	-	<i>P</i> ₅	0	5,962	-	<i>P</i> ₆	0	6,142	-
	15	5,288	7,03		15	5,645	5,31		15	6,000	2,31
	25	5,300	6,82		25	5,594	6,17		25	5,813	5,35
	50	4,800	15,61		50	5,367	9,97		50	5,472	10,90
	75	4,511	20,69		75	4,987	16,35		75	5,307	13,59
	100	4,266	25		100	4,810	19,32		100	5,076	17,35
<i>P</i> ₇	0	3,63	-	<i>P</i> ₈	0	4,01	-	<i>P</i> ₉	0	4,07	-
	15	3,09	14,87		15	3,56	11,22		15	3,87	4,91
	25	3,01	17,07		25	3,39	15,46		25	3,72	8,59
	50	2,92	19,55		50	3,10	22,69		50	3,41	16,21
	75	2,73	24,79		75	3,06	23,69		75	3,21	21,13
	100	2,65	26,99		100	3,09	22,94		100	3,19	21,62
<i>P</i> ₁₀	0	4,31	-	<i>P</i> ₁₁	0	4,20	-	<i>P</i> ₁₂	0	4,27	-
	15	4,03	6,49		15	4,04	3,80		15	4,12	3,51
	25	3,94	8,58		25	4,02	4,28		25	4,10	3,98
	50	3,65	15,31		50	3,88	7,61		50	3,96	7,25
	75	3,52	18,32		75	3,69	12,14		75	3,95	7,49
	100	3,43	20,41		100	3,61	14,04		100	3,73	12,64

Tablo 3.8 *HT* yaklaşımına göre *j* değerlerinin 15 ile 100 arasında seçilmesiyle elde edilen performans sonuçlarını göstermektedir. Örneğin *P*₁ için 15 ile 100 arasındaki bağlantı ilaveleriyle elde edilen \overline{min}_{ST} değerleri sırasıyla, 3.439, 3.146, 2.829, 2.731 ve 2.670 iken, orijinal MRC için 3.963 olarak gözlemlenmiştir. Buna göre *IP* değerleri %13.22, %20.61, %28.61, %31.08 ve %32.62 olmaktadır. Bu sonuçlara göre *HT*'ye dayalı çizge büyütme yaklaşımı belirgin iyileşme oranlarına yol açmaktadır. Ayrıca bu değerler, iyileşme

yüzdesinin topoloji büyütme miktarı arttıkça bir doyum noktasına yakınsadığını göstermektedir.

Tablo 3.9. HT ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütmeyle ait standart sapmalar

<i>HT</i>	<i>j</i>	σ		<i>j</i>	σ		<i>j</i>	σ
<i>P</i> ₁	0	0,706	<i>P</i> ₂	0	0,766	<i>P</i> ₃	0	0,878
	15	0,543		15	0,644		15	0,785
	25	0,445		25	0,643		25	0,780
	50	0,463		50	0,613		50	0,562
	75	0,469		75	0,474		75	0,621
	100	0,495		100	0,410		100	0,693
<i>P</i> ₄	0	0,889	<i>P</i> ₅	0	0,999	<i>P</i> ₆	0	0,955
	15	0,859		15	0,763		15	0,851
	25	0,781		25	0,849		25	0,837
	50	0,686		50	0,798		50	0,829
	75	0,748		75	0,754		75	0,834
	100	0,840		100	0,637		100	0,815
<i>P</i> ₇	0	0,541	<i>P</i> ₈	0	0,458	<i>P</i> ₉	0	0,430
	15	0,319		15	0,553		15	0,461
	25	0,223		25	0,507		25	0,511
	50	0,305		50	0,3		50	0,549
	75	0,465		75	0,276		75	0,431
	100	0,497		100	0,349		100	0,417
<i>P</i> ₁₀	0	0,483	<i>P</i> ₁₁	0	0,402	<i>P</i> ₁₂	0	0,443
	15	0,537		15	0,372		15	0,406
	25	0,443		25	0,423		25	0,387
	50	0,497		50	0,453		50	0,422
	75	0,519		75	0,560		75	0,572
	100	0,495		100	0,598		100	0,597

Tablo 3.9, Tablo 3.8'de rapor edilen performans sonuçlarına ait σ değerlerini göstermektedir. Çizge büyütme işlemi ile elde edilen σ değerleri genellikle orijinal MRC'ye göre daha küçüktür. Buna göre, çizge büyütme uygulanan topolojilere karşılık düşen ST değerleri daha dar bir aralıkta değişmektedir.

Tablo 3.10. HT ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait güven aralıkları

<i>HT</i>	<i>j</i>	<i>LL</i>	<i>UL</i>		<i>j</i>	<i>LL</i>	<i>UL</i>		<i>j</i>	<i>LL</i>	<i>UL</i>
<i>P</i> ₁	0	3.81	4.12	<i>P</i> ₂	0	4.46	4.81	<i>P</i> ₃	0	4.98	5.36
	15	3.32	3.56		15	4.02	4.31		15	4.64	4.98
	25	3.05	3.24		25	3.79	4.08		25	4.45	4.78
	50	2.73	2.93		50	3.34	3.62		50	3.97	4.21
	75	2.63	2.84		75	3.23	3.45		75	3.77	4.04
	100	2.56	2.78		100	3.12	3.31		100	3.62	3.92
<i>P</i> ₄	0	5.50	5.88	<i>P</i> ₅	0	5.74	6.19	<i>P</i> ₆	0	5.94	6.34
	15	5.11	5.47		15	5.47	5.82		15	5.82	6.18
	25	5.14	5.46		25	5.40	5.79		25	5.64	5.99
	50	4.66	4.94		50	5.19	5.55		50	5.30	5.65
	75	4.35	4.67		75	4.82	5.16		75	5.13	5.48
	100	4.09	4.44		100	4.67	4.95		100	4.91	5.25
<i>P</i> ₇	0	3.52	3.74	<i>P</i> ₈	0	3.92	4.10	<i>P</i> ₉	0	3.98	4.16
	15	3.03	3.15		15	3.45	3.67		15	3.78	3.96
	25	2.97	3.05		25	3.29	3.49		25	3.62	3.82
	50	2.86	2.98		50	3.04	3.16		50	3.30	3.52
	75	2.64	2.82		75	3.00	3.12		75	3.12	3.30
	100	2.55	2.75		100	3.02	3.16		100	3.11	3.27
<i>P</i> ₁₀	0	4.21	4.41	<i>P</i> ₁₁	0	4.12	4.28	<i>P</i> ₁₂	0	4.18	4.36
	15	3.92	4.14		15	3.97	4.11		15	4.04	4.20
	25	3.85	4.03		25	3.94	4.10		25	4.02	4.18
	50	3.55	3.75		50	3.79	3.97		50	3.88	4.04
	75	3.42	3.62		75	3.58	3.80		75	3.84	4.06
	100	3.33	3.53		100	3.49	3.73		100	3.61	3.85

Tablo 3.10, Tablo 3.8'deki \overline{min}_{ST} ve Tablo 3.9'daki σ değerleri kullanılarak elde edilen güven aralığı alt ve üst sınır değerlerini listelemektedir. Bu sonuçlara göre, çizge büyütme ile elde edilen değerler genel olarak orijinal MRC'ye göre daha küçük ve daha dar aralıklı olmaktadır. Bu durum, yöntemin güvenilirliği açısından önem taşımaktadır. Örneğin *P*₁ için çizge büyütme ile elde edilen güven aralığı üst sınır değerleri sırasıyla 3.56, 3.24, 2.93, 2.84 ve 2.78 olmaktadır. Bu değerlerin hiçbirinin, orijinal MRC'nin alt sınır değeri olan 3.81'i aşmadığına dikkat edilmelidir.

3.2.2.2. Rastgele Yaklaşım

Bu bölümde rastgele (R) yaklaşıma göre Algoritma 1 için elde edilen deney sonuçları rapor edilmektedir. R yaklaşımında, çizge büyütme işleminde kullanılacak olan bağlantıların seçimi herhangi bir ölçüt kullanılmaksızın rastlantısal olarak yapılmaktadır. Bundan dolayı, bu yaklaşım için Algoritma 1'in her koşulunda farklı sonuçların elde edilebileceğine dikkat edilmelidir. Bu yaklaşım için, herhangi bir ölçüt değeri hesaplanmayacağından Algoritma 1'in karmaşıklık değeri $O(C(|V|,2)-|E|) + O(N\Delta|V||E|)$ olmaktadır.

Tablo 3.11. R ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait performans sonuçları

R	j	\overline{min}_{ST}	IP		j	\overline{min}_{ST}	IP		j	\overline{min}_{ST}	IP
P_1	0	3,963	-	P_2	0	4,632	-	P_3	0	5,174	-
	2	3,926	0,93		2	4,506	2,72		2	5,104	1,35
	4	3,865	2,47		4	4,582	1,07		4	4,988	3,59
	6	3,914	1,23		6	4,392	5,18		6	5,011	3,15
	8	3,621	8,62		8	4,468	3,54		8	4,953	4,27
	10	3,682	7,09		10	4,417	4,64		10	4,872	5,83
P_4	0	5,688	-	P_5	0	5,962	-	P_6	0	6,142	-
	2	5,688	0		2	5,924	0,63		2	6,219	-1,25
	4	5,511	3,11		4	5,810	2,54		4	6,087	0,89
	6	5,533	2,72		6	5,835	2,1		6	6,131	0,17
	8	5,544	2,53		8	5,835	2,1		8	6,120	0,35
	10	5,477	3,70		10	5,898	1,07		10	5,967	2,84
P_7	0	3,63	-	P_8	0	4,01	-	P_9	0	4,07	-
	2	3,52	3,03		2	3,89	2,99		2	4,04	0,73
	4	3,38	6,88		4	3,87	3,49		4	4,03	0,98
	6	3,35	7,71		6	3,76	6,23		6	4,05	0,49
	8	3,24	10,74		8	3,77	5,98		8	3,91	3,93
	10	3,27	9,91		10	3,70	7,73		10	3,97	2,45
P_{10}	0	4,31	-	P_{11}	0	4,20	-	P_{12}	0	4,27	-
	2	4,17	3,24		2	4,18	0,47		2	4,36	-2,10
	4	4,10	4,87		4	4,18	0,47		4	4,17	2,34
	6	4,10	4,87		6	4,18	0,47		6	4,21	1,40
	8	4,06	5,80		8	4,15	1,19		8	4,32	-1,17
	10	4,04	6,26		10	4,16	0,95		10	4,20	1,63

Tablo 3.11, R yaklaşımına göre j değerlerinin 2 ile 10 arasında seçilmesiyle elde edilen performans sonuçlarını göstermektedir. Örneğin P_7 için, 2 ile 10 arasındaki bağlantı ilaveleriyle elde edilen \overline{min}_{ST} değerleri sırasıyla, 3.52, 3.38, 3.35, 3.24 ve 3.27 iken, orijinal MRC için 3.63 olmaktadır. Bu değerlere göre %3.03, %6.88, %7.71, %10.74 ve %9.91'lik IP 'ler elde edilmektedir. Genel olarak j değeri yüksek seçildiğinde, daha düşük \overline{min}_{ST} ve buna bağlı olarak daha yüksek IP değerleri elde edilmektedir.

Tablo 3.12. R ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütmeyle ait standart sapmalar

R	j	σ		j	σ		j	σ
P_1	0	0,706	P_2	0	0,766	P_3	0	0,878
	2	0,676		2	0,854		2	0,876
	4	0,792		4	0,722		4	0,828
	6	0,719		6	0,701		6	0,814
	8	0,637		8	0,808		8	0,819
	10	0,641		10	0,722		10	0,678
P_4	0	0,889	P_5	0	0,999	P_6	0	0,955
	2	0,877		2	0,896		2	1,024
	4	0,819		4	0,915		4	1,023
	6	0,791		6	0,919		6	0,928
	8	0,944		8	0,919		8	0,887
	10	0,884		10	0,865		10	0,844
P_7	0	0,541	P_8	0	0,458	P_9	0	0,430
	2	0,519		2	0,444		2	0,445
	4	0,524		4	0,482		4	0,411
	6	0,497		6	0,471		6	0,455
	8	0,427		8	0,486		8	0,426
	10	0,443		10	0,519		10	0,478
P_{10}	0	0,483	P_{11}	0	0,402	P_{12}	0	0,443
	2	0,491		2	0,477		2	0,500
	4	0,387		4	0,433		4	0,401
	6	0,412		6	0,433		6	0,407
	8	0,465		8	0,384		8	0,487
	10	0,445		10	0,484		10	0,424

Tablo 3.12, Tablo 3.11'deki performans sonuçlarına göre elde edilen σ değerlerini göstermektedir. Genel olarak, çizge büyütme işlemi ile elde edilen σ değerleri orijinal MRC'ye göre daha küçüktür. Buna göre, çizge büyütme uygulanan topolojilere karşılık düşen ST değerleri daha dar bir aralıkta değişmektedir.

Tablo 3.13. R ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait güven aralıkları

R	j	LL	UL		j	LL	UL		j	LL	UL
P₁	0	3.81	4.12	P₂	0	4.46	4.81	P₃	0	4.98	5.36
	2	3.78	4.08		2	4.31	4.70		2	4.92	5.29
	4	3.69	4.04		4	4.42	4.75		4	4.81	5.17
	6	3.76	4.07		6	4.23	4.55		6	4.84	5.19
	8	3.48	3.76		8	4.29	4.65		8	4.78	5.13
	10	3.54	3.82		10	4.25	4.58		10	4.73	5.02
P₄	0	5.50	5.88	P₅	0	5.74	6.19	P₆	0	5.94	6.34
	2	5.50	5.87		2	5.72	6.13		2	6.00	6.43
	4	5.34	5.68		4	5.60	6.02		4	5.87	6.30
	6	5.37	5.70		6	5.63	6.04		6	5.94	6.33
	8	5.35	5.74		8	5.63	6.04		8	5.94	6.31
	10	5.29	5.66		10	5.70	6.09		10	5.79	6.14
P₇	0	3.52	3.74	P₈	0	3.92	4.10	P₉	0	3.98	4.16
	2	3.42	3.62		2	3.80	3.98		2	3.95	4.13
	4	3.28	3.48		4	3.77	3.97		4	3.95	4.11
	6	3.25	3.45		6	3.67	3.85		6	3.96	4.14
	8	3.15	3.33		8	3.67	3.87		8	3.82	4.00
	10	3.18	3.36		10	3.60	3.80		10	3.87	4.07
P₁₀	0	4.21	4.41	P₁₁	0	4.12	4.28	P₁₂	0	4.18	4.36
	2	4.07	4.27		2	4.08	4.28		2	4.26	4.46
	4	4.02	4.18		4	4.09	4.27		4	4.09	4.25
	6	4.02	4.18		6	4.09	4.27		6	4.13	4.29
	8	3.97	4.15		8	4.07	4.23		8	4.22	4.42
	10	3.95	4.13		10	4.06	4.26		10	4.12	4.28

Tablo 3.13, Tablo 3.12 ve Tablo 3.11'deki sonuçlara göre elde edilen güven aralığı değerlerini listelemektedir. Genel olarak, çizge büyütme ile elde edilen güven aralığı değerleri orijinal MRC'ye göre daha düşüktür ve j değeri yükseldiğinde güven aralığı değerleri daha da azalmaktadır.

Tablo 3.14. R ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait performans sonuçları

R	j	\overline{min}_{ST}	IP		j	\overline{min}_{ST}	IP		j	\overline{min}_{ST}	IP
P_1	0	3,963	-	P_2	0	4,632	-	P_3	0	5,174	-
	15	3,463	12,61		15	4,354	6,00		15	4,755	8,09
	25	3,170	20,01		25	3,974	14,20		25	4,662	9,89
	50	2,878	27,37		50	3,544	23,48		50	4,244	17,97
	75	2,378	39,99		75	3,367	27,31		75	3,988	22,92
	100	2,134	46,15		100	3,101	33,05		100	3,523	31,90
P_4	0	5,688	-	P_5	0	5,962	-	P_6	0	6,142	-
	15	5,300	6,82		15	5,658	5,09		15	5,846	4,81
	25	5,200	8,57		25	5,341	10,41		25	5,802	5,53
	50	4,555	19,91		50	5,113	14,24		50	5,406	11,98
	75	4,411	22,45		75	4,822	19,12		75	5,153	16,10
	100	4,177	26,56		100	4,468	25,05		100	4,879	20,56
P_7	0	3,63	-	P_8	0	4,01	-	P_9	0	4,07	-
	15	3,17	12,67		15	3,57	10,97		15	3,87	4,91
	25	3,08	15,15		25	3,44	14,21		25	3,72	8,59
	50	2,73	24,79		50	3,13	21,94		50	3,43	15,72
	75	2,24	38,29		75	3,03	24,43		75	3,27	19,65
	100	2,12	41,59		100	2,94	26,68		100	3,14	22,85
P_{10}	0	4,31	-	P_{11}	0	4,20	-	P_{12}	0	4,27	-
	15	4,10	4,87		15	4,18	0,47		15	4,11	3,74
	25	3,96	8,12		25	4,11	2,14		25	4,19	1,87
	50	3,67	14,84		50	3,84	8,57		50	4,02	5,85
	75	3,44	20,18		75	3,77	10,23		75	3,92	8,19
	100	3,34	22,50		100	3,54	15,71		100	3,73	12,64

Tablo 3.14, R yaklaşımına göre j değerlerinin 15 ile 100 arasında seçilmesiyle elde edilen performans sonuçlarını göstermektedir. Tabloda görüldüğü gibi, çizge büyütme elde edilen tüm \overline{min}_{ST} değerleri, orijinal MRC'ye göre genellikle daha küçüktür. Bu sonuçlara göre R yaklaşımı kullanıldığında, büyük ölçekli çizge büyütme için belirgin iyileşme oranları elde edilebilmektedir. Örneğin P_7 için 15 ile 100 arasındaki bağlantı ilaveleriyle elde edilen \overline{min}_{ST} değerleri sırasıyla, 3.17, 3.08, 2.73, 2.24 ve 2.12 iken, orijinal MRC için 3.63 olmaktadır. Buna göre IP 'ler %12.67, %15.15, %24.79, %38.29 ve %41.59 olarak elde edilir.

Tablo 3.15. R ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütmeyle ait standart sapmalar

R	j	σ		j	σ		j	σ
P₁	0	0,706	P₂	0	0,766	P₃	0	0,878
	15	0,522		15	0,574		15	0,746
	25	0,436		25	0,635		25	0,675
	50	0,503		50	0,569		50	0,608
	75	0,484		75	0,482		75	0,580
	100	0,340		100	0,341		100	0,544
P₄	0	0,889	P₅	0	0,999	P₆	0	0,955
	15	0,690		15	0,809		15	0,924
	25	0,763		25	0,744		25	0,892
	50	0,634		50	0,811		50	0,798
	75	0,575		75	0,631		75	0,725
	100	0,606		100	0,633		100	0,692
P₇	0	0,541	P₈	0	0,458	P₉	0	0,430
	15	0,401		15	0,533		15	0,439
	25	0,271		25	0,535		25	0,584
	50	0,443		50	0,336		50	0,495
	75	0,427		75	0,170		75	0,465
	100	0,324		100	0,276		100	0,346
P₁₀	0	0,483	P₁₁	0	0,402	P₁₂	0	0,443
	15	0,435		15	0,455		15	0,343
	25	0,422		25	0,397		25	0,417
	50	0,510		50	0,484		50	0,446
	75	0,496		75	0,526		75	0,337
	100	0,473		100	0,537		100	0,465

Tablo 3.15, Tablo 3.14'teki performans sonuçlarına göre elde edilen σ değerlerini göstermektedir. Orijinal MRC ile kıyaslandığında genel olarak daha düşük σ değerleri elde edilmektedir. Bu durum, çizge büyütme ile elde edilen ST'lerin daha dar bir aralıkta değiştiğine işaret etmektedir.

Tablo 3.16, Tablo 3.15 ve Tablo 3.14'teki sonuçlara göre elde edilen güven aralığı değerlerini listelemektedir. Bu sonuçlara göre, çizge büyütme ile elde edilen değerler genel olarak orijinal MRC'ye göre daha küçük ve daha dar aralıklı olmaktadır.

Tablo 3.16. R ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme ait güven aralıkları

R	j	LL	UL		j	LL	UL		j	LL	UL
P₁	0	3.81	4.12	P₂	0	4.46	4.81	P₃	0	4.98	5.36
	15	3.35	3.58		15	4.22	4.48		15	4.59	4.92
	25	3.07	3.27		25	3.83	4.12		25	4.52	4.81
	50	2.77	2.99		50	3.42	3.67		50	4.11	4.38
	75	2.27	2.49		75	3.26	3.48		75	3.86	4.11
	100	2.06	2.21		100	3.02	3.18		100	3.41	3.64
P₄	0	5.50	5.88	P₅	0	5.74	6.19	P₆	0	5.94	6.34
	15	5.15	5.45		15	5.48	5.84		15	5.65	6.04
	25	5.04	5.36		25	5.17	5.51		25	5.62	5.99
	50	4.42	4.69		50	4.93	5.30		50	5.24	5.57
	75	4.29	4.53		75	4.68	4.97		75	5.00	5.31
	100	4.05	4.31		100	4.33	4.61		100	4.73	5.02
P₇	0	3.52	3.74	P₈	0	3.92	4.10	P₉	0	3.98	4.16
	15	3.09	3.25		15	3.46	3.68		15	3.78	3.96
	25	3.03	3.13		25	3.33	3.55		25	3.60	3.84
	50	2.64	2.82		50	3.06	3.20		50	3.33	3.53
	75	2.15	2.33		75	3.00	3.06		75	3.18	3.36
	100	2.06	2.18		100	2.88	3.00		100	3.07	3.21
P₁₀	0	4.21	4.41	P₁₁	0	4.12	4.28	P₁₂	0	4.18	4.36
	15	4.01	4.19		15	4.09	4.27		15	4.04	4.18
	25	3.88	4.04		25	4.03	4.19		25	4.11	4.27
	50	3.57	3.77		50	3.74	3.94		50	3.93	4.11
	75	3.34	3.54		75	3.66	3.88		75	3.85	3.99
	100	3.25	3.43		100	3.43	3.65		100	3.64	3.82

3.2.2.3. Kümelenme Katsayısı Yaklaşımı

Bu bölümde kümelenme katsayısı (CC) ölçütünü dikkate alan Algoritma 1 varyantı için elde edilen deney sonuçları rapor edilmektedir. Bir topolojinin CC değerinin yüksek olması topolojinin daha sağlam olduğunu ifade ettiğinden, çizge büyütme işleminde CC değerini en fazla arttıracak olan bağlantılar seçilmektedir. CC değerinin hesaplanmasında (3)'de belirtilen formül kullanıldığında Algoritma 1 için karmaşık değeri $O(C(|V|,2)-|E|) + O(N\Delta|V||E|) + O(|V|\Delta^2)$ olmaktadır.

Tablo 3.17. CC ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütmeyle ait performans sonuçları

<i>CC</i>	<i>j</i>	\overline{min}_{ST}	<i>IP</i>		<i>j</i>	\overline{min}_{ST}	<i>IP</i>		<i>j</i>	\overline{min}_{ST}	<i>IP</i>
<i>P</i> ₁	0	3,963	-	<i>P</i> ₂	0	4,632	-	<i>P</i> ₃	0	5,174	-
	2	3,987	-0,60		2	4,607	0,53		2	5,139	0,67
	4	3,975	-0,30		4	4,569	1,36		4	5,058	2,24
	6	3,975	-0,30		6	4,607	0,53		6	5,046	2,47
	8	3,951	0,30		8	4,582	1,07		8	5,034	2,70
	10	3,878	2,14		10	4,569	1,36		10	5,034	2,70
<i>P</i> ₄	0	5,688	-	<i>P</i> ₅	0	5,962	-	<i>P</i> ₆	0	6,142	-
	2	5,655	0,58		2	5,936	0,43		2	6,186	-0,71
	4	5,666	0,38		4	5,924	0,63		4	6,208	-1,07
	6	5,622	1,16		6	5,962	0		6	6,153	-0,17
	8	5,611	1,35		8	5,860	1,71		8	6,175	-0,53
	10	5,711	-0,40		10	5,860	1,71		10	6,230	-1,43
<i>P</i> ₇	0	3,63	-	<i>P</i> ₈	0	4,01	-	<i>P</i> ₉	0	4,07	-
	2	3,55	2,20		2	3,98	0,74		2	4,06	0,24
	4	3,51	3,30		4	3,93	1,99		4	4,06	0,24
	6	3,49	3,85		6	3,91	2,49		6	4,17	-2,45
	8	3,45	4,95		8	3,85	3,99		8	4,14	-1,71
	10	3,38	6,88		10	3,80	5,23		10	4,12	-1,22
<i>P</i> ₁₀	0	4,31	-	<i>P</i> ₁₁	0	4,20	-	<i>P</i> ₁₂	0	4,27	-
	2	4,27	0,92		2	4,23	-0,71		2	4,26	0,23
	4	4,21	2,32		4	4,23	-0,71		4	4,26	0,23
	6	4,18	3,01		6	4,23	-0,71		6	4,20	1,63
	8	4,15	3,71		8	4,19	0,23		8	4,22	1,17
	10	4,09	5,10		10	4,16	0,95		10	4,20	1,63

Tablo 3.17, *CC* yaklaşımına göre *j* değerlerinin 2 ile 10 arasında seçilmesiyle elde edilen performans sonuçlarını göstermektedir. Örneğin *P*₇ için 2 ile 10 arasındaki bağlantı ilaveleriyle elde edilen \overline{min}_{ST} değerleri sırasıyla, 3,55, 3,51, 3,49, 3,45 ve 3,38 iken, orijinal *MRC* için 3,63 olmaktadır. Buna göre *IP*'ler %2,20, %2,30, %3,85, %4,95 ve %6,88 olarak elde edilir. Ancak tabloda görüldüğü gibi, *CC* yaklaşımı için bazı topoloji havuzları için \overline{min}_{ST} değeri azalmamakta ve buna bağlı olarak belirgin *IP* değerleri elde edilememektedir.

Tablo 3.18. CC ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütmeyle ait standart sapmalar

CC	j	σ		j	σ		j	σ
P_1	0	0,706	P_2	0	0,766	P_3	0	0,878
	2	0,707		2	0,753		2	0,864
	4	0,715		4	0,740		4	0,853
	6	0,715		6	0,736		6	0,847
	8	0,678		8	0,722		8	0,784
	10	0,651		10	0,687		10	0,813
P_4	0	0,889	P_5	0	0,999	P_6	0	0,955
	2	0,883		2	0,997		2	0,948
	4	0,869		4	0,951		4	0,931
	6	0,850		6	0,973		6	0,900
	8	0,865		8	0,896		8	0,932
	10	0,921		10	0,896		10	0,926
P_7	0	0,541	P_8	0	0,458	P_9	0	0,430
	2	0,554		2	0,489		2	0,42
	4	0,519		4	0,514		4	0,395
	6	0,538		6	0,549		6	0,584
	8	0,536		8	0,536		8	0,510
	10	0,505		10	0,583		10	0,474
P_{10}	0	0,483	P_{11}	0	0,402	P_{12}	0	0,443
	2	0,486		2	0,420		2	0,438
	4	0,453		4	0,443		4	0,438
	6	0,455		6	0,443		6	0,4
	8	0,384		8	0,417		8	0,437
	10	0,426		10	0,417		10	0,447

Tablo 3.18, Tablo 3.17'deki performans sonuçlarına göre elde edilen σ değerlerini göstermektedir. Orijinal MRC ile kıyaslandığında, σ değerleri bazı topoloji havuzları için azalma göstermemektedir.

Tablo 3.19, Tablo 3.17 ve Tablo 3.18 kullanılarak elde edilen güven aralığı değerlerini listelemektedir. Tablo 3.18'e benzer olarak, güven aralıkları değerlerinde bazı topoloji havuzları için azalma görülmemektedir.

Tablo 3.19. CC ölçütüne dayalı küçük ölçekli çizge büyütme ait güven aralıkları

CC	j	LL	UL		j	LL	UL		j	LL	UL
P₁	0	3.81	4.12	P₂	0	4.46	4.81	P₃	0	4.98	5.36
	2	3.83	4.14		2	4.44	4.78		2	4.95	5.33
	4	3.82	4.13		4	4.40	4.74		4	4.87	5.24
	6	3.82	4.13		6	4.44	4.77		6	4.86	5.23
	8	3.80	4.10		8	4.42	4.75		8	4.87	5.20
	10	3.73	4.02		10	4.41	4.72		10	4.86	5.21
P₄	0	5.50	5.88	P₅	0	5.74	6.19	P₆	0	5.94	6.34
	2	5.47	5.84		2	5.71	6.16		2	5.99	6.39
	4	5.48	5.85		4	5.71	6.14		4	6.01	6.40
	6	5.44	5.80		6	5.74	6.18		6	5.97	6.34
	8	5.43	5.79		8	5.66	6.06		8	5.98	6.37
	10	5.52	5.91		10	5.66	6.06		10	6.04	6.42
P₇	0	3.52	3.74	P₈	0	3.92	4.10	P₉	0	3.98	4.16
	2	3.44	3.66		2	3.88	4.08		2	3.98	4.14
	4	3.41	3.61		4	3.83	4.03		4	3.98	4.14
	6	3.38	3.60		6	3.80	4.02		6	4.05	4.29
	8	3.34	3.56		8	3.74	3.96		8	4.04	4.24
	10	3.28	3.48		10	3.68	3.92		10	4.03	4.21
P₁₀	0	4.21	4.41	P₁₁	0	4.12	4.28	P₁₂	0	4.18	4.36
	2	4.17	4.37		2	4.15	4.31		2	4.17	4.35
	4	4.12	4.30		4	4.14	4.32		4	4.17	4.35
	6	4.09	4.27		6	4.14	4.32		6	4.12	4.28
	8	4.07	4.23		8	4.11	4.27		8	4.13	4.31
	10	4.00	4.18		10	4.08	4.24		10	4.11	4.29

Tablo 3.20, CC yaklaşımına göre, j değerlerinin 15 ile 100 arasında seçilmesiyle elde edilen performans sonuçlarını göstermektedir. Örneğin P_7 için 15 ile 100 arasındaki bağlantı ilaveleriyle elde edilen \overline{min}_{ST} değerleri sırasıyla, 3.35, 3.15, 2.88, 2.61 ve 2.40 iken, orijinal MRC için 3.63 olmaktadır. Buna göre IP 'ler %7.71, %13.22, %20.66, %28.09 ve %33.88 olarak elde edilir. Tabloda görüldüğü gibi, daha düşük düğüm sayısına sahip olan topoloji havuzlarında daha yüksek IP değerleri elde edilmektedir.

Tablo 3.20. CC ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütmeyle ait performans sonuçları

<i>CC</i>	<i>j</i>	\overline{min}_{ST}	<i>IP</i>		<i>j</i>	\overline{min}_{ST}	<i>IP</i>		<i>j</i>	\overline{min}_{ST}	<i>IP</i>
<i>P</i> ₁	0	3,963	-	<i>P</i> ₂	0	4,632	-	<i>P</i> ₃	0	5,174	-
	15	3,963	0		15	4,696	-1,38		15	5,081	1,79
	25	3,646	7,99		25	4,632	0		25	5,093	1,56
	50	3,280	17,23		50	4,493	3,00		50	5,104	1,35
	75	3,243	18,16		75	4,075	12,02		75	4,976	3,82
	100	3,207	19,07		100	3,721	19,66		100	4,627	10,57
<i>P</i> ₄	0	5,688	-	<i>P</i> ₅	0	5,962	-	<i>P</i> ₆	0	6,142	-
	15	5,577	1,95		15	5,848	1,91		15	6,252	-1,79
	25	5,600	1,54		25	5,835	2,13		25	6,186	-0,71
	50	5,500	3,30		50	5,670	4,89		50	6,164	-0,35
	75	5,544	2,53		75	5,772	3,18		75	6,054	1,43
	100	5,266	7,41		100	5,886	1,27		100	6,010	2,14
<i>P</i> ₇	0	3,63	-	<i>P</i> ₈	0	4,01	-	<i>P</i> ₉	0	4,07	-
	15	3,35	7,71		15	3,76	6,23		15	4,06	0,24
	25	3,15	13,22		25	3,66	8,72		25	3,95	2,94
	50	2,88	20,66		50	3,36	16,20		50	3,86	5,15
	75	2,61	28,09		75	3,11	22,44		75	3,48	14,49
	100	2,40	33,88		100	3,01	24,93		100	3,19	21,62
<i>P</i> ₁₀	0	4,31	-	<i>P</i> ₁₁	0	4,20	-	<i>P</i> ₁₂	0	4,27	-
	15	4,04	6,26		15	4,18	0,47		15	4,13	3,27
	25	4,06	5,80		25	4,17	0,71		25	4,18	2,10
	50	4,01	6,96		50	4,14	1,42		50	4,15	2,81
	75	3,89	9,74		75	4,03	4,04		75	4,17	2,34
	100	3,68	14,61		100	3,95	5,95		100	4,24	0,70

Tablo 3.21’de Tablo 3.20’deki performans sonuçlarına göre elde edilen σ değerleri gösterilmektedir. Çizge büyütme ile elde edilen σ değerleri çoğunlukla orijinal MRC’ye kıyasla daha küçüktür. Örneğin, *P*₇ için 15 ile 100 arasındaki bağlantı ilaveleriyle elde edilen σ değerleri sırasıyla, 0.497, 0.357, 0.406, 0.527 ve 0.509 iken, orijinal MRC için 0,541 olmaktadır. Bu örneğe göre, çizge büyütme ile elde edilen topolojilere karşılık düşen ST değerlerinin daha dar bir aralıkta değiştiği söylenebilir. Ancak, bazı topoloji havuzları için σ değerleri orijinal MRC’ye göre daha yüksek olabilmektedir.

Tablo 3.21. CC ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütmeyle ait standart sapmalar

CC	j	σ		j	σ		j	σ
P_1	0	0,706	P_2	0	0,766	P_3	0	0,878
	15	0,688		15	0,785		15	0,824
	25	0,592		25	0,766		25	0,843
	50	0,500		50	0,793		50	0,835
	75	0,575		75	0,670		75	0,777
	100	0,487		100	0,593		100	0,821
P_4	0	0,889	P_5	0	0,999	P_6	0	0,955
	15	0,868		15	0,812		15	1,064
	25	0,963		25	0,818		25	1,036
	50	0,819		50	0,774		50	0,904
	75	0,883		75	0,825		75	0,918
	100	0,840		100	0,927		100	0,943
P_7	0	0,541	P_8	0	0,458	P_9	0	0,430
	15	0,497		15	0,531		15	0,525
	25	0,357		25	0,494		25	0,476
	50	0,406		50	0,500		50	0,583
	75	0,527		75	0,312		75	0,538
	100	0,509		100	0,299		100	0,392
P_{10}	0	0,483	P_{11}	0	0,402	P_{12}	0	0,443
	15	0,467		15	0,455		15	0,364
	25	0,465		25	0,401		25	0,409
	50	0,412		50	0,424		50	0,517
	75	0,563		75	0,434		75	0,448
	100	0,581		100	0,476		100	0,471

Tablo 3.22, Tablo 3.20 ve Tablo 3.21’ye göre elde edilen güven aralıkları değerlerini listelemektedir. Orijinal MRC ile kıyaslandığında genellikle daha düşük güven aralığı değerleri elde edilmektedir. Örneğin P_7 için 15 ile 100 bağlantı ilaveleriyle elde edilen güven aralığı üst sınır değerleri sırasıyla 3.45, 3.22, 2.96, 2.72 ve 2.50 olmaktadır. Bu değerlerin hiçbiri, orijinal MRC’nin alt sınır değeri olan 3.52’yi aşmamaktadır. Bu durum bazı topoloji havuzları için değişkenlik gösterebilmektedir.

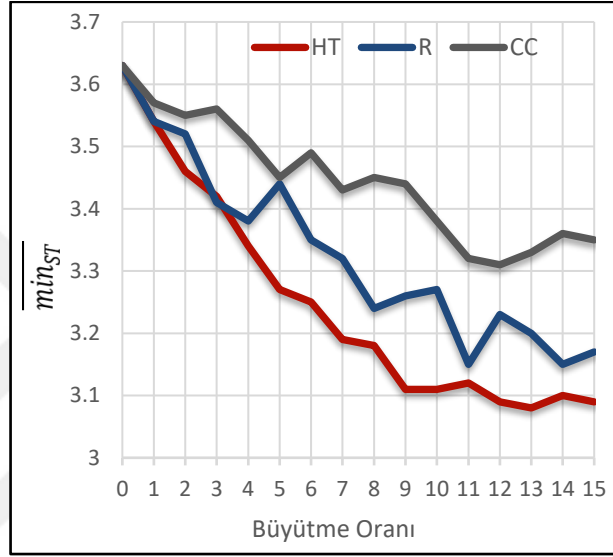
Tablo 3.22. CC ölçütüne dayalı büyük ölçekli çizge büyütme için güven aralıkları

<i>CC</i>	<i>j</i>	<i>LL</i>	<i>UL</i>		<i>j</i>	<i>LL</i>	<i>UL</i>		<i>j</i>	<i>LL</i>	<i>UL</i>
<i>P</i> ₁	0	3.81	4.12	<i>P</i> ₂	0	4.46	4.81	<i>P</i> ₃	0	4.98	5.36
	15	3.81	4.12		15	4.52	4.87		15	4.90	5.26
	25	3.52	3.78		25	4.46	4.81		25	4.91	5.28
	50	3.17	3.39		50	4.31	4.67		50	4.92	5.29
	75	3.12	3.37		75	3.92	4.23		75	4.81	5.14
	100	3.10	3.32		100	3.59	3.86		100	4.45	4.81
<i>P</i> ₄	0	5.50	5.88	<i>P</i> ₅	0	5.74	6.19	<i>P</i> ₆	0	5.94	6.34
	15	5.39	5.76		15	5.66	6.03		15	6.03	6.48
	25	5.40	5.80		25	5.65	6.02		25	5.97	6.40
	50	5.33	5.67		50	5.50	5.85		50	5.98	6.35
	75	5.36	5.73		75	5.59	5.96		75	5.86	6.25
	100	5.09	5.44		100	5.68	6.10		100	5.81	6.21
<i>P</i> ₇	0	3.52	3.74	<i>P</i> ₈	0	3.92	4.10	<i>P</i> ₉	0	3.98	4.16
	15	3.25	3.45		15	3.65	3.87		15	3.96	4.16
	25	3.08	3.22		25	3.56	3.76		25	3.85	4.05
	50	2.80	2.96		50	3.26	3.46		50	3.74	3.98
	75	2.50	2.72		75	3.05	3.17		75	3.37	3.59
	100	2.30	2.50		100	2.95	3.07		100	3.11	3.27
<i>P</i> ₁₀	0	4.21	4.41	<i>P</i> ₁₁	0	4.12	4.28	<i>P</i> ₁₂	0	4.18	4.36
	15	3.95	4.13		15	4.09	4.27		15	4.06	4.20
	25	3.97	4.15		25	4.09	4.25		25	4.10	4.26
	50	3.93	4.09		50	4.06	4.22		50	4.05	4.25
	75	3.78	4.00		75	3.94	4.12		75	4.08	4.26
	100	3.56	3.80		100	3.85	4.05		100	4.15	4.33

3.2.2.4. Değerlendirme

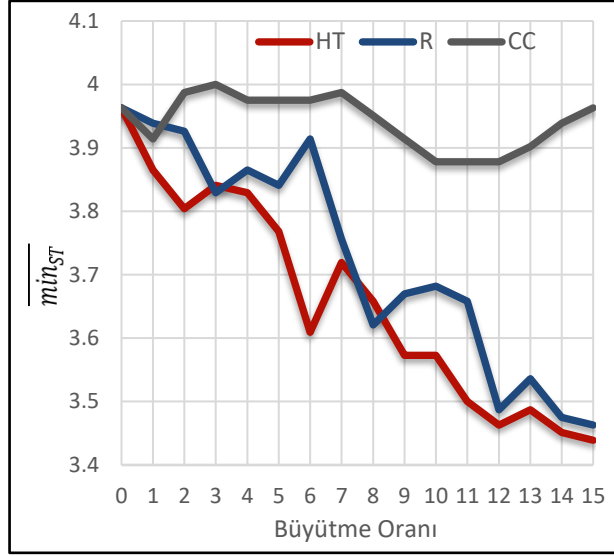
Şekil 3.4, Waxman modeli kullanılarak üretilen P_7 havuzu üzerinde tüm ölçütler için Algoritma 1'in performans sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlar, havuzdaki her bir topolojinin 0 ila 15 adet bağlantı eklenerek büyütülmesi neticesinde elde edilmiştir. 0 büyütme oranı, fiziksel topoloji çizgesine herhangi bir ilave bağlantının eklenmediği duruma karşılık düşmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, Algoritma 1'in yol açtığı tüm \overline{min}_{ST} değerleri, orijinal MRC'ye karşılık düşen \overline{min}_{ST} (3.63) değerinden her durumda daha küçüktür ve topolojinin büyütülme oranı arttıkça \overline{min}_{ST} 'deki azalma miktarı da artmaktadır. Ayrıca, HT ölçütüne dayalı çizge büyütme yaklaşımı, R ve CC 'ye kıyasla çoğunlukla daha küçük \overline{min}_{ST}

değerlerine yol açmaktadır. Örneğin, 9 adet bağlantının eklendiği durumdaki \overline{min}_{ST} değeri, CC için 3.44, R için 3.26 iken HT için 3.11 olmaktadır. Bu değerler, topolojiye hiçbir bağlantının eklenmediği duruma kıyasla, \overline{min}_{ST} değerinde sırasıyla %5.23, %10.19 ve %14.32'lik iyileşme oranlarına karşılık gelmektedir. 9 adet bağlantının eklenmesiyle elde edilen topoloji büyütme miktarının, fiziksel topolojilerin toplam büyüklüklerinde %9'luk bir artışa karşılık geldiğine dikkat edilmelidir.



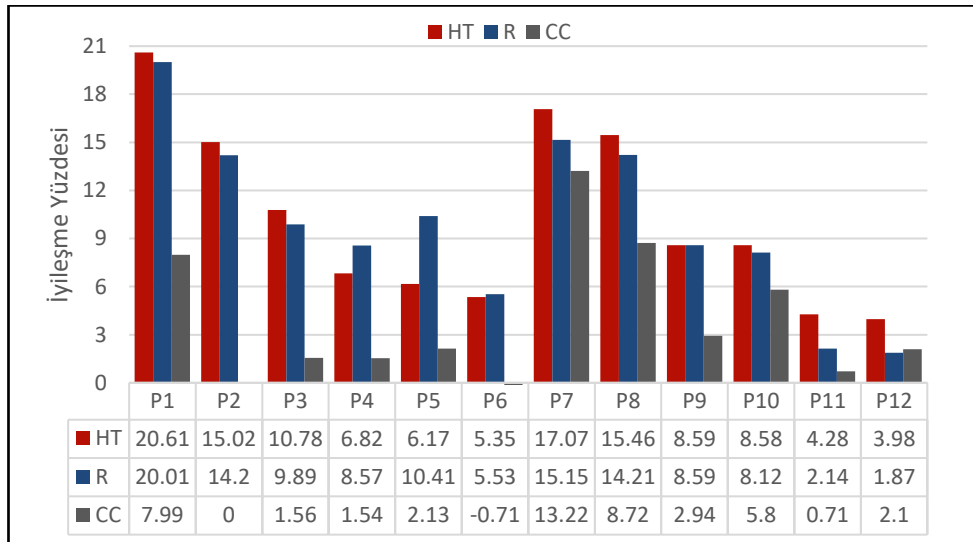
Şekil 3.4. P_7 için küçük ölçekli çizge büyütme

GLP modeli kullanılarak üretilen P_1 havuzu için Algoritma 1'in performans sonuçları Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Benzer şekilde, HT yaklaşımı diğer yaklaşımlara göre çoğunlukla daha küçük \overline{min}_{ST} değerlerine yol açmaktadır. Örneğin, 9 adet bağlantının eklendiği durumdaki \overline{min}_{ST} değeri, CC için 3.91, R için 3.67 iken HT için 3.57 olmaktadır. Buna göre, fiziksel topolojinin boyutunda %7.58'lik bir artışla HT ölçütüne göre yaklaşık %10'luk bir iyileşme sağlanmaktadır.



Şekil 3.5. P_1 için küçük ölçekli çizge büyütme

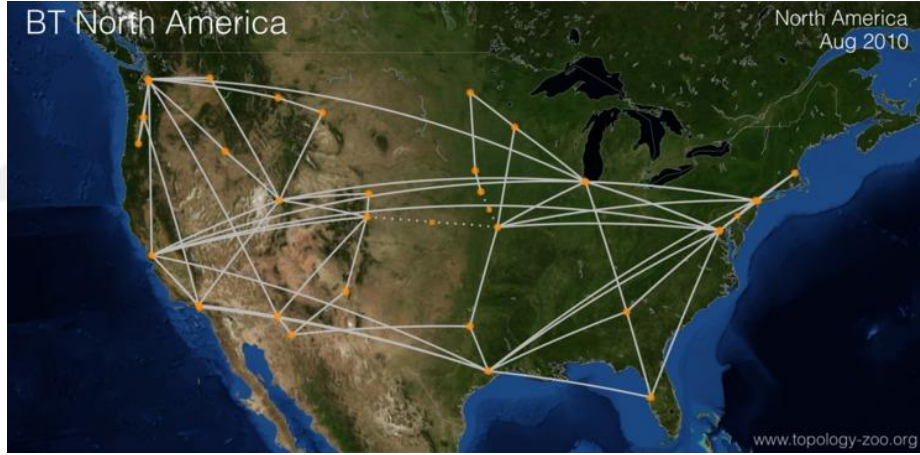
Şekil 3.6, $j = 25$ seçildiğinde çizge büyütme işlemi için elde edilen iyileşme oranlarını göstermektedir. Bu sonuçlara göre, HT ve R yaklaşımlarının belirgin iyileşmeler sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte, HT yaklaşımı ile elde edilen IP oranları R 'ye kıyasla genellikle daha yüksek olmaktadır. CC yaklaşımı ise diğer yaklaşımlara göre belirgin bir iyileşme sağlamamaktadır.



Şekil 3.6. $j = 25$ için ölçütlerin IP oranları

3.2.3. Gerçek Dünya Ağları İçin Performans Analizi

Bu bölümde, Algoritma 1'in HT ölçütünü dikkate alan varyantı için gerçek ağ topolojileri [57][58] kullanılarak elde edilen performans sonuçları rapor edilmektedir. Tablo 3.23'te deneylerde kullanılan topolojilere ait düğüm ($|\bar{V}|$) ve kenar ($|\bar{E}|$) sayıları, topolojilerin büyütme miktarına (j) göre elde edilen min_{ST} değeri, maliyet (C) ve iyileşme oranları (IP) belirtilmektedir. Tüm topolojiler için $j=0$ durumu orijinal MRC'nin ürettiği ST değerini göstermektedir. Bu sonuçlara göre, fiziksel topoloji çizgesine yalnızca 1 ya da 2 bağlantı eklenmesi durumunda dahi yüksek iyileşme oranları elde edilebilmektedir. Örneğin, Şekil 3.7'de gösterilen BT North America ağı 36 düğüm ve 76 kenardan oluşmaktadır. Bu ağ için, 1 ve 2 bağlantı eklenmesi durumu sırasıyla %1.31 ve %2.63'lük maliyetler ile %33.33 ve %50'lik IP değerleri sağlamaktadır.



Şekil 3.7. BT North America ağı

Ayrıca bu sonuçlar, çizge büyütme yaklaşımı ile elde edilen performans sonuçlarının topolojinin yapısal karakteristiği ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Örneğin, birbirine yakın sayıda düğüm ve kenar içeren BT North America ve SprintUS topolojileri için oldukça farklı performans sonuçları elde edilmektedir. BT North America için %1.31 maliyet ile %33.33 oranında bir iyileşme sağlanırken, SprintUS için %17.18'lik bir maliyetle yalnızca %25 oranında bir iyileşme sağlanmaktadır. Buna göre, farklı yapısal karakteristiğe sahip topoloji çizgeleri ya da HT yaklaşımı haricinde başka ölçütlerin kullanılması durumunda daha iyi performans sonuçları elde edilebilmesi olasıdır.

Tablo 3.23. Gerçek dünya ağları için HT ölçütüne dayalı performans sonuçları

Ağ İsmi	$ \bar{V} $	$ \bar{E} $	j	min_{ST}	C	IP
Abilene	11	14	0	5	-	-
			1	4	%7,14	%20
ATT North America	25	57	0	4	-	-
			2	3	%3,50	%25
BT North America	36	76	0	6	-	-
			1	5	%1,31	%16.66
			1	4	%1,31	%33.33
			2	3	%2,63	%50
Darkstrand	28	31	0	10	-	-
			1	9	%3,22	%10
			1	8	%3,22	%20
			3	7	%9,67	%30
			4	6	%12,90	%40
			4	5	%12,90	%50
DIGEX	31	38	0	11	-	-
			1	10	%2,63	%9.09
			1	9	%2,63	%18.18
			1	8	%2,63	%27.27
			2	7	%5,26	%36.36
			6	6	%15,78	%45.45
			6	5	%15,78	%54.54
Electric Lightwave	20	30	0	4	-	-
			2	3	%6,66	%25
SprintUS	32	64	0	4	-	-
			11	3	%17,18	%25

3.3. Çizge Sağlık Ölçütlerine Dayalı Akıllı ST Seçiminin Performans Analizi

Bu bölümde, daha önce [20]'de önerilen ve orijinal MRC üzerinde belirgin iyileşme sağlayan MRC varyantı (mMRC) için farklı çizge sağlık ölçütleri kullanılarak elde edilen deney sonuçları rapor edilmektedir.

Tablo 3.24. Topoloji havuzları

Havuz İsmi	Topoloji Modeli	$ \bar{V} $	m	β
P_{13}	GLP	50	2	0.1
P_{14}	GLP	50	2	0.2
P_{15}	GLP	50	2	0.4
P_{16}	GLP	50	2	0.6
P_{17}	GLP	100	2	0.1
P_{18}	GLP	100	2	0.2
P_{19}	GLP	100	2	0.4
P_{20}	GLP	100	2	0.6
P_{21}	Waxman	50	2	0.2
P_{22}	Waxman	50	3	0.2
P_{23}	Waxman	50	4	0.2
P_{24}	Waxman	100	2	0.2
P_{25}	Waxman	100	3	0.2
P_{26}	Waxman	100	4	0.2
P_{27}	Barabasi Albert	50	2	-
P_{28}	Barabasi Albert	50	3	-
P_{29}	Barabasi Albert	50	4	-

Orijinal MRC algoritmasında düğümlerin ve düğümlere ait bağlantıların izole edilmesi rastgele bir sırada gerçekleşirken, düğümün izole edileceği ST ise dairesel (Round-Robin) bir şekilde belirlenmektedir. mMRC’de, fiziksel çizgedeki düğümler bir önışlem adımı olarak, düğüm dereceleri dikkate alınarak yüksekten alçağa doğru sıralanmaktadır. Böylece yüksek dereceli düğümlerin izolasyonu önceliklendirilerek, bölümlenmeye karşı olan direnç arttırılmaktadır [20]. mMRC-1 düğümün izole edileceği ST’nin seçiminde, ilgili düğümün her bir ST’nin omurgası üzerinde sahip olduğu düğüm derece bilgisini dikkate almaktadır. İlgili düğümün ST üzerinde sahip olduğu düğüm derecesine göre, artan bir şekilde ST’ler sıralanmakta ve düğümün izole edileceği ST seçimi bu sıralamaya dayalı olarak yapılmaktadır. İlgili düğüm, seçilen ST’de izole edilemez ise sıralamada bulunan bir sonraki ST denenerek izole edilmeye çalışılır. Aynı işlemler tüm düğümler için tekrarlanarak ST

üretimi tamamlanır. mMRC-2 düğümün izole edileceği ST seçiminde, ST'lerin heterojenlik seviyesini kullanmaktadır. İzole edilecek düğümün, her bir ST'nin omurgasından çıkarılması durumunda heterojenliği ne kadar azaltacağı belirlenerek, düğümün izolasyonu için heterojenliğin en fazla azaldığı ST tercih edilmektedir. İlgili düğüm, seçilen ST'de izole edilemediği takdirde, HT değerini en fazla azaltacağı bir sonraki ST'de izole edilmeye çalışılır. Böylelikle, ST'lerin bölümlenmeye karşı direnci yüksek bir seviyede tutularak MRC'nin başarısız olma ihtimali azaltılmaya çalışılmaktadır.

Tablo 3.24, deneylerde kullanılan topoloji havuzları ve bu havuzlara ait ortalama düğüm sayısı ($|\bar{V}|$), düğüm başına bağlantı sayısı (m) ve topolojiler için beta (β) değerlerini listelemektedir. Topoloji üretimi için GLP, Waxman ve Barabasi Albert (BA) [59] matematiksel modelleri kullanılmaktadır. Bir havuz içerisinde bulunan tüm topolojilere ait $|\bar{V}|$, m ve β değerleri aynıdır. GLP modeli için $\beta < 1$ olmak üzere, yeni bir bağlantının yüksek dereceli düğümlere bağlanma ihtimalini temsil eden modele özgü, ayarlanabilir bir parametredir. β değeri arttıkça yeni bir bağlantının yüksek dereceli düğümlere bağlanma olasılığı da artmaktadır [55]. Waxman modeli için $0 < \beta \leq 1$ olmak üzere, çizge üzerindeki kenar yoğunluğunu temsil eden spesifik bir parametredir. Daha yüksek β değerleri yüksek kenar yoğunluğuna sahip bir çizgeyle sonuçlanmaktadır [56].

Tablo 3.25. GLP için çizge sağlamlık ölçütlerine dayalı akıllı ST seçimi

Yöntem	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}
OrijinalMRC	3.93	3.86	3.94	3.96	4.52	4.66	4.64	4.82
mMRC-2	3.16	3.20	3.26	3.36	3.6	3.50	3.60	3.77
ΔVC	3.17	3.19	3.26	3.28	3.52	3.50	3.53	3.65
$\Delta VC-\Delta EC$	3.16	3.19	3.24	3.28	3.52	3.50	3.53	3.65
L	3.34	3.28	3.34	3.53	3.6	3.55	3.82	3.97
ΔL	3.23	3.27	3.30	3.39	3.61	3.48	3.87	3.93
E	3.33	3.28	3.37	3.54	3.61	3.61	3.86	4
ΔE	3.27	3.25	3.27	3.41	3.54	3.49	3.80	3.93
CC	3.28	3.25	3.37	3.47	3.67	3.58	3.78	3.93
ΔCC	3.35	3.32	3.31	3.43	3.63	3.70	3.85	3.88

Tablo 3.26. Waxman ve BA için çizge sağlamlık ölçütlerine dayalı akıllı ST seçimi

Yöntem	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}	P_{26}	P_{27}	P_{28}	P_{29}
OrijinalMRC	3.63	2.72	2.09	4.01	2.95	2.3	4.04	2.97	2.27
mMRC-2	3.09	2.24	2.01	3.24	2.60	2.07	3.43	2.59	2.11
ΔVC	3.11	2.29	2.01	3.51	2.72	2.10	3.34	2.50	2.03
$\Delta VC-\Delta EC$	3.04	2.25	2.00	3.34	2.54	2.02	3.34	2.50	2.02
L	3.25	2.49	2.07	3.29	2.85	2.32	3.51	2.67	2.14
ΔL	3.12	2.41	2.00	3.27	2.74	2.10	3.54	2.54	2.01
E	3.18	2.53	2.10	3.3	2.87	2.26	3.5	2.62	2.11
ΔE	3.12	2.42	2.02	3.3	2.77	2.16	3.53	2.57	2.03
CC	3.17	2.49	2.06	3.43	2.83	2.16	3.44	2.58	2.09
ΔCC	3.2	2.56	2.06	3.4	2.86	2.2	3.45	2.65	2.15

Tablo 3.25 ile Tablo 3.26, tüm topoloji havuzları için orijinal MRC, mMRC-2 (ΔHT) ve ST seçiminde düğüm bağlantısallığı (VC), kenar bağlantısallığı (EC), ortalama yol uzunluğu (L), verimlilik (E) ve kümelenme katsayısı (CC) ölçütlerinin kullanılması neticesinde elde edilen \overline{min}_{ST} değerlerini göstermektedir. Örneğin, ΔVC yaklaşımı, ilgili düğümün her bir ST’de izole edilmesi durumunda ST’ye ait VC değerinin değişme miktarına göre ST seçimini yapmaktadır. Bir topolojinin VC değerinin yüksek olması yüksek sağlamlığı ifade ettiğinden, ilgili düğüm VC değerini en az düşüreceği ST seçilerek izole edilmeye çalışılır. Eğer düğüm seçilen ST’de izole edilemezse, VC değerini en az düşüreceği bir sonraki ST denenmektedir. Tablodaki diğer ölçütlere ait Δ yaklaşımları da ST seçimini bu şekilde yapmaktadır. $\Delta VC-\Delta EC$ yaklaşımı ise VC değerleri eşit olan ST’ler arasında EC değerlerine göre ikinci bir sıralama yapmaktadır. Δ barındırmayan yaklaşımlardaki ST seçiminde ise sadece ST’nin sahip olduğu ölçüt değeri dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımlarda, ölçüt değerine göre en sağlam olduğu düşünülen ST seçilmektedir. Elde edilen deney sonuçlarına göre, ölçüt kullanılan yaklaşımların tümü orijinal MRC’ye göre iyileşme sağlamaktadır. mMRC-2 ile kıyaslandığında ise diğer ölçütleri kullanan yaklaşımlar belirgin bir iyileşme sağlamamaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, MRC performansının iyileştirilmesi amacıyla çizge büyütme dayalı bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşımın performans analizi heterojenlik, rastgele ve kümelenme katsayısına dayalı üç farklı yaklaşıma göre, sentetik ve gerçek ağ topolojileri kullanılarak yapılmaktadır. Heterojenlik ölçütüne dayalı çizge büyütme yaklaşımı, topolojiye eklendiği taktirde heterojenlik seviyesini en fazla oranda azaltacak olan bağlantıları akıllıca seçerek topolojiyi güçlendirmektedir. Kümelenme katsayısı ölçütüne dayalı yaklaşımda ise topolojiye eklendiği taktirde, topolojinin kümelenme katsayısı değerini en fazla arttıracak olan bağlantılar seçilmektedir. Rastgele yaklaşımda ise herhangi bir ölçüt kullanılmayarak eklenecek olan bağlantılar rastlantısal olarak seçilmektedir.

Sentetik ağlar için performans analizi, geniş topoloji havuzları kullanılarak yapılmaktadır. Topoloji havuzlarının oluşturulması için BRITE aracı, performans değerlendirmesinde GLP ve Waxman gibi topoloji modelleri kullanılmaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlar, heterojenliğe dayalı çizge büyütme yaklaşımının MRC için minimum ST gereksinimini büyük ölçüde azalttığını göstermektedir. Ayrıca bu yaklaşım, rastgele ve kümelenme katsayısı yaklaşımına göre daha iyi performans sonuçları üretmektedir.

Gerçek dünya ağları için yapılan deneylerde, heterojenliğe dayalı çizge büyütme yaklaşımı kullanılmakta ve bu yaklaşım eklenecek bağlantı sayısı düşük seçilse bile belirgin iyileşme oranları sağlamaktadır. Yalnızca 1 bağlantı eklenmesi durumunda %27.27 ve %33.33'lük iyileşme değerleri elde edilirken, 2 bağlantı eklenmesi durumunda ise bu değerler %36.36 ve %50'ye kadar ulaşabilmektedir.

Ayrıca bu çalışmada, akıllı ST seçiminde heterojenlikten farklı olarak düğüm-kenar bağlantısallığı, ortalama yol uzunluğu, verimlilik ve kümelenme katsayısı ölçütlerinin performans analizi de yapılmaktadır. Deneysel sonuçlar, heterojenlik ölçütünün diğer ölçütlere göre daha iyi performans sonuçları ürettiğini göstermektedir.

5. ÖNERİLER

MRC performansının topolojinin yapısal karakteristiğine bağlı olduğu göz önünde bulundurulduğunda, topoloji üretiminde Waxman ve GLP dışındaki modellerin ya da başka çizge sağlamlık ölçütlerini dikkate alan yaklaşımların kullanılması durumunda daha iyi performans sonuçlarının elde edilmesi olasıdır. Gelecek çalışmalar, çizge büyütme yaklaşımı için başka ölçütlerin kullanılması durumunda MRC'nin performansını araştırmaya odaklanabilir. Aynı zamanda, topoloji havuzuna model çeşitliliğini arttırmak amacıyla başka matematiksel modeller kullanılarak üretilmiş yeni topolojiler eklenerek deneylerin kapsamı daha da genişletilebilir. Bununla beraber tek bir ölçütü kullanan algoritma, belirli topolojiler için iyi sonuç üretirken, başka modeldeki topolojiler için aynı sonuçları vermeyebilir. Buna göre minimum ST sayısını azaltmak için, birden fazla çizge sağlamlık ölçütü kullanan karma bir algoritma tasarlanabilir. Bu tasarımda algoritmanın gerçek zamanlı ihtiyaçların karşılanabilmesi açısından hesaplama karmaşıklığının olabildiğince düşük olması gerektiğine dikkat edilmelidir.

6. KAYNAKLAR

1. Gjoka M., Ram V., Yang X., "Evaluation of IP Fast Reroute Proposals," COMSWARE 2007. 2nd International Conference, 2007, 1-8.
2. Francois, P., Filsfils, C., Evans, J. and Bonaventure, O., Achieving Sub-Second IGP Convergence in Large IP Networks, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 35, 2 (2005) 35-44.
3. Shand M., Bryant S., "IP Fast Reroute Framework", RFC 5714, 2010.
4. Papán J., Segeč P. and Palúch P., "Analysis of existing IP Fast Reroute mechanisms," 2015 International Conference on Information and Digital Technologies, Zilina, 2015, 291-297.
5. Papan, Jozef & Segeč, Pavel & Palúch, Peter & Mikus, Ludovit & Moravcik, Marek, "The Survey of Current IPFRR Mechanisms". 511. 229-240. 10.1007/978-3-319-46535-7_18, (2017).
6. RFC 5286, Basic Specification for IP Fast Reroute: Loop-Free Alternates, Internet Engineering Task Force (IETF), USA, 2008.
7. RFC 6981, A Framework for IP and MPLS Fast Reroute Using Not-Via Addresses, Internet Engineering Task Force (IETF), USA, 2013.
8. Internet Draft, Loop-Free IP Fast Reroute Using Local and Remote LFAPs, Internet Engineering Task Force (IETF), USA, 2008.
9. Internet Draft, IP Fast Re-Route with Fast Notification, Internet Engineering Task Force (IETF), USA, 2012.
10. Internet Draft, Remote LFA FRR, Internet Engineering Task Force (IETF), USA, 2013.
11. Psenak P., Mirtorabi S., Roy A., Nguyen L., Pillay-Esnault P., "Multi-Topology (MT) Routing in OSPF", RFC 4915, 2007.
12. RFC 4915, Multi-Topology (MT) Routing in OSPF, Internet Engineering Task Force (IETF), USA, 2007.
13. RFC 5120, M-ISIS: Multi Topology (MT) Routing in Intermediate System to Intermediate Systems (IS-ISs), Internet Engineering Task Force (IETF), USA, 2008.
14. Menth M. and Martin R., "Network resilience through multi-topology routing," DRCN 2005). Proceedings.5th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks, 2005., Istand of Ischia, Naptes, Itaty, 2005, 271-277.
15. Apostolopoulos, G., Using Multiple Topologies for IP-only Protection Against Network Failures: A Routing Performance Perspective, Institute of Computer Science (ICS) of

- the Foundation for Research and Technology - Hellas (FORTH), Tech. Rep. TR377, 2006.
16. Kvalbein, A. Hansen F., Cicic T., Gjessing S. and Lysne O., "Multiple Routing Configurations for Fast IP Network Recovery", in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 17, no. 2, 473-486, April 2009.
 17. Internet Draft, Algorithms for Computing Maximally Redundant Trees for IP/LDP Fast-Reroute, Internet Engineering Task Force (IETF), USA, 2014.
 18. Internet Draft, An Architecture for IP/LDP Fast-Reroute Using Maximally Redundant Trees, Internet Engineering Task Force (IETF), USA, 2014.
 19. Cevher S., Ulutas M. and Hokelek I., "Trade-off analysis of Multi Topology Routing based IP fast reroute mechanisms," 2013 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Turin, 2013, 157-162.
 20. S. Cevher, M.Ulutas, I.Hokelek, "Topology-Aware Multiple Routing Configurations for Fault Tolerant Networking", *Journal of Network and Systems Management*, DOI 10.1007/s10922-015-9358-4, 2015.
 21. Ellens, Wendy & Kooij, Robert, "Graph measures and network robustness", 2013.
 22. Wu J., Tan Y.-J., Deng H.-Z., Li Y., Liu B., and X. Lv. Spectral measure of robustness in complex networks, 2008. arXiv: 0802.2564
 23. Dong, J. and Horvath, S., Understanding Network Concepts in Modules, *BMC Syst Biol*, 1, 24,(2007).
 24. Ellen van der Meer, "Comparing measures of network robustness", Research Paper Business Analytics, July 6, 2012.
 25. Javier Martin Hernandez and Piet Van Mieghem, "Classification of graph metrics", November 2011.
 26. Latora, Vito, and Massimo Marchiori. "Efficient behavior of small-world networks." *Physical review letters* 87.19 (2001): 198701.
 27. Kamamura S., Miyamura T., Pelsser C., Inoue I. and Shiimoto K., "Minimum Backup Configuration-Creation Method for IP Fast Reroute", *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, Honolulu, HI, 2009, 1-6.
 28. Cevher S., Ulutas M. and Hokelek I., "An automated topological analysis of Multiple Routing Configurations," 2015 36th IEEE Sarnoff Symposium, Newark, NJ, 2015, pp. 99-104.
 29. Eswaran K. P. , Tarjan R. E. , "Augmentation problems", *SIAM J. Comput*, no. 4, 653-665, 1976.

30. Frederickson, Greg & JáJá, Joseph. (1981). Approximation Algorithms for Several Graph Augmentation Problems. *SIAM J. Comput.* 10. 270-283. 10.1137/0210019.
31. Cicic T. et al., "Relaxed multiple routing configurations: IP fast reroute for single and correlated failures," in *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 6, no. 1, pp. 1-14, March 2009.
32. SDN Architecture Overview 1.1, TR-504, 2014.
33. Sharma S., Staessens D., Colle D., Pickavet M., Demeester P., *OpenFlow: Meeting Carrier-Grade Recovery Requirements Computer Communications*, Elsevier, vol. 36, no. 6, 2013.
34. Cevher S., Ulutas M., Altun S. and Hokelek I., "Multi Topology Routing based IP Fast Re-Route for Software Defined Networks," 2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC), Messina, 2016, 1224-1226.
35. Cevher S., "Multi Topology Routing Based Failure Protection for Software Defined Networks," 2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Batumi, 2018, 1-5.
36. Cevher S. and Hökelek İ., "Multi topology routing based failure protection for software defined 5G networks," 2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Antalya, 2017, 1-4.
37. Hirata K. and Tachibana T., "Implementation of multiple routing configurations on software-defined networks with P4," 2019 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Lanzhou, China, 2019, 13-16.
38. Imahama D., Fukushima Y. and Yokohira T., "A reroute method using multiple routing configurations for fast IP network recovery," 2013 19th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Denpasar, 2013, 433-438.
39. Hatanaka T. and Tachibana T., "Multiple routing configuration method for fast failure recovery and low energy consumption," 2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan, Taipei, 2015, 478-479.
40. Patil S. and Khante K., "Enhanced fault tolerance using EMRC in wireless communication," 2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), Tiruchengode, 2013, 1- 5.
41. El-Serafy M. A., Elsayed A. M., Aly M. H., El-Badawy E. A. and Ghaleb I. A., "Multiple Routing Configurations for Datacenter Disaster Recovery Applicability and Challenges," 2014 International Conference on Computer and Communication Engineering, Kuala Lumpur, 2014, 146-149.

42. Thubert, P. and Bellagamba P. , "Available Routing Constructs", [draft-thubert-rtgwg-arc-02](#) (work in progress), July 2014.
43. Thubert, P., Enyedi, G., and Ramasubramanian S., "Available Routing Constructs", [draft-thubert-rtgwg-arc-vs-mrt-01](#) (work in progress), January 2014.
44. Menth M. and Braun W., "Performance comparison of not-via addresses and maximally redundant trees (MRTs)," 2013 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM 2013), Ghent, 2013, 218-225.
45. Alenazi M. J. F. and Sterbenz J. P. G. , "Evaluation and comparison of several graph robustness metrics to improve network resilience," 2015 7th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling (RNDM), Munich, 2015, 7-13.
46. Chang Liu and Lu Ruan, "Logical topology augmentation for survivable mapping in IP-over-WDM networks," GLOBECOM '05. IEEE Global Telecommunications Conference, 2005., St. Louis, MO, 2005.
47. Filippidou I. and Kotidis Y., "Effective and efficient graph augmentation in large graphs," 2016 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), Washington, DC, 2016, 875-880.
48. Taehyun Kim and Lee S., "Efficient social graph augmentation schemes for a peer to peer social networking service," 2014 International Conference on Big Data and Smart Computing (BIGCOMP), Bangkok, 2014, 269-270.
49. Toshimasa Ishii, Masayuki Hagiwara, "Minimum augmentation of local edge-connectivity between vertices and vertex subsets in undirected graphs", [Discrete Applied Mathematics](#), Volume 154, Issue 16, 2307-2329, ISSN 0166-218X, 2006.
50. Demaine E. D., Zadimoghaddam M., "Minimizing the diameter of a network using shortcut edges", *SWAT 2013 Bergen Norway*, 420-431, 2010.
51. Ishakian V. , Erdős D. , Terzi E. , Bestavros A. , "A framework for the evaluation and management of network centrality", *SIAM Anaheim CA*, 427-438, 2012.
52. Medina A. , Lakhina A. , Matta I. and Byers J., "BRITE: an approach to universal topology generation," *MASCOTS 2001, Proceedings Ninth International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, Cincinnati, OH, USA, 2001, 346-353, doi: 10.1109/MASCOT.2001.948886.
53. Zukerman M., *Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models*, City University of Hong Kong, Hong Kong, 2014.
54. <https://people.richland.edu/james/lecture/m170/ch08-int.html>

55. Tian Bu and Towsley D. , "On distinguishing between Internet power law topology generators," Proceedings.Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, New York, NY, USA, 2002, 638-647 vol.2, doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019309.
56. Waxman B. M. , "Routing of multipoint connections," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 6, no. 9, 1617-1622, Dec. 1988, doi: 10.1109/49.12889.
57. <http://www.topology-zoo.org/>
58. <http://simula.no>
59. Barabasi, A.L. and Albert, R., Emergence of Scaling in Random Networks, Science, 286, 5439 (1999) 509–512.



ÖZGEÇMİŞ

1994 yılında Trabzon'da doğdu. Lise öğrenimini Tefik Serdar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde lisans programına başladı ve 2016 yılında bu bölümden mezun oldu. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

