

Çok Atlamalı Mobil Tünelleme Ağları'nda Kullanılan Yönlendirme Algoritmasının Ağ Verimine Etkisi

Barbaros Preveze¹

Özet

Günümüzde sürekli olarak artış gösteren mobil cihaz ve kullanıcı sayısı ile birlikte daha yüksek hızlı ağ yapılarına olan talep te aynı ölçüde artmaktadır. Bu nedenle, literatürde paket iletimlerinde öncelik sağlama özelliğinden dolayı yaygın bir kullanıma sahip olan birçok tünelleme protokolü bulunmaktadır. Bununla birlikte, tünelleme ağlarında baştan belirlenen bir rotanın mevcut ağ koşullarına göre sonradan güncellenmesi gerektiğinde, bu durum ekstra bir yeniden rota oluşturulma (Route Reconstruction (RRC)) zamanına neden olacaktır. Sonradan oluşan bu tür ekstra yeniden rota oluşturma gereksinimleri ekstra gecikmelere de neden olarak sistem veriminin yükseltilmesi yerine düşürülmesine neden olabilecektir. Buna bağlı olarak, bir ağda kullanılmakta olan yönlendirme algoritmasının rotayı güncelleyerek, daha iyi bir rotaya geçiş ile sağlayacağı zaman kazancı, bu değişimin gerçekleşmesi için harcanan ekstra zamandan daha aza olmamalıdır.

Bu kitap bölümünde, literatürde mobil çok sekmeli tünel ağlarında rota ömrünü uzatarak sistem verimini artırmak amacıyla yapılan bir çalışma esas alınarak, söz konusu çalışmada; önerilmiş olan Optimum Yol Yönlendirmesi (Optimum Path Routing (OPR)) isimli yönlendirme algoritmasının geliştirilme şekli ile farklı yönlendirme algoritmalarının ağ verimi (bps saniyedeki bit sayısı) açısından nasıl değerlendirildiği açıklanmış, performans artırımı amacıyla önerilmiş olan OPR yönlendirme algoritması ile Fastest Path (En Hızlı Yol) yönlendirme algoritması isimli algoritmaların ağ verimi üzerinde sağladıkları performansların kıyaslaması ile OPR kullanımının RRC gecikmesine ve sistem performansına sağladığı iyileştirme incelenmiştir.

1 Çankaya Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, ORCID: 0000-0003-4108-0150, b.preveze@cankaya.edu.tr

1. GİRİŞ

MPLS (Multi Protocol Label Switching) gibi en başta bağlantının sağlanarak, tüm paketlerin aynı rota üzerinden gönderildiği paket anahtarlama tünel ağlarında amaç, paketlerin sahip oldukları önceliklerle engellerle karşılaşmadan hedeflerine ulaşmasını sağlamak ve gecikmeyi azaltmak suretiyle ağ verimini artırmaktır. Ancak, çevrimiçi oyun, video konferans, yüksek kalite gereksinimi olan videolar vb. yüksek hızlı bağlantı gerektiren uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için belirlenecek olan rotanın mümkün olan en az sayıda RRC ile en uzun rota yaşam süresini sağlaması gerekir. Bu gereksinimden dolayı literatürde rota yaşam süresini uzatarak ağ performansını iyileştirmeye çalışan çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

Referans [2]'de ABR, AEABR ve ATAABR olarak adlandırılan üç uzun ömürlü yönlendirme algoritması için rota güvenilirliği ve yaşam süreleri açısından karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Ayrıca, referans [3]'de araçlar arası uzun ömürlü bir iletişim sağlayabilmek için yeni bir yönlendirme algoritması önerilmiştir. Çalışmanın sonucunda ise, önerilen bu algoritmanın AODV (Ad-Hoc on Demand Distance Vector)'den daha güvenilir bir yönlendirme sağlayabildiği gösterilmiştir. Referans [4]'te yazarlar, MANET (Mobile Ad-Hoc Network) çok yollu yönlendirme problemini araştırmak amacıyla, alternatif yollar kullanan bir yönlendirme problemini analiz ederek, düğümlerin hızları, başarıyla teslim edilen paketlerin kayıp paketlere oranı ve kullanılan yönlendirme algoritması nedeniyle oluşan ek yükün, ortalama gecikme üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Öte yandan referans [5]'te yapılan çalışmada, önerilen bir yönlendirme algoritması ile ağ üzerindeki en hızlı yolun saptanarak gecikmenin minimize edilmesi amaçlanmış ve [6]'da bu algoritmanın verim performansı bilinen başka yönlendirme algoritmaları ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda, Fastest Path yönlendirme algoritmasının bir MPLS ağı için verim açısından, karşılaştırmaya alınan diğer tüm algoritmalarından daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Ayrıca, referans [1]'de; önerilen OPR algoritmasının verim performansı, MATLAB üzerinde gerçekleştirilen bir mobil MPLS ağ simülasyonu üzerinde, [5, 6]'da başka algoritmalar ile kıyaslamaya alınarak aralarında en iyisi olduğu gösterilmiş olan Fastest Path yönlendirme algoritmasının performansı ile karşılaştırılmıştır. Bu sırada, [1]'de başta rota yeniden yapılandırılması (RRC) sırasında istem dışı olarak eklenmiş olan ekstra gecikme miktarı olmak üzere tüm faktörlerin sistem çıktı performansı üzerindeki etkileri dikkate alınmıştır. Çalışmada daha sonra, MPLS üzerinde Fastest Path ve OPR yönlendirme algoritmasının simülasyon sonuçlarının

teorik hesaplama sonuçlarıyla da örtüştüğü gösterilmiştir. Sonuç olarak, çalışmada önerilen OPR algoritmasının, [6]'da en iyi olarak belirlenen Fastest Path yönlendirme algoritmasına göre bile daha yüksek ağ verim performansı sağladığı gösterilmiştir.

Beş kısımdan oluşan bu kitap bölümünde, bölüm 2'de, [1]'de geliştirilen OPR algoritmasının MPLS (Multi Protocol Label Switching) tünelleme protokolü üzerinde uygulanma yöntemi ile bu amaç doğrultusunda simülasyonda uygulanan algoritmaların detayları verilmiştir. Bölüm 3'te ise, söz konusu algoritmanın referans [1]'de elde edilen teorik ve deneysel sonuçlarının Eşitlikler (5 -16) kullanılarak yapılan hesaplama yöntemi anlatılmış, hem OPR yönlendirme algoritması hem Fastest Path yönlendirme algoritması için elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar 4. bölümde Tablo 2'de [1] verilmiştir.

2. YÖNLENDİRME ALGORİTMALARININ MPLS AĞI ÜZERİNDE UYGULANMASI

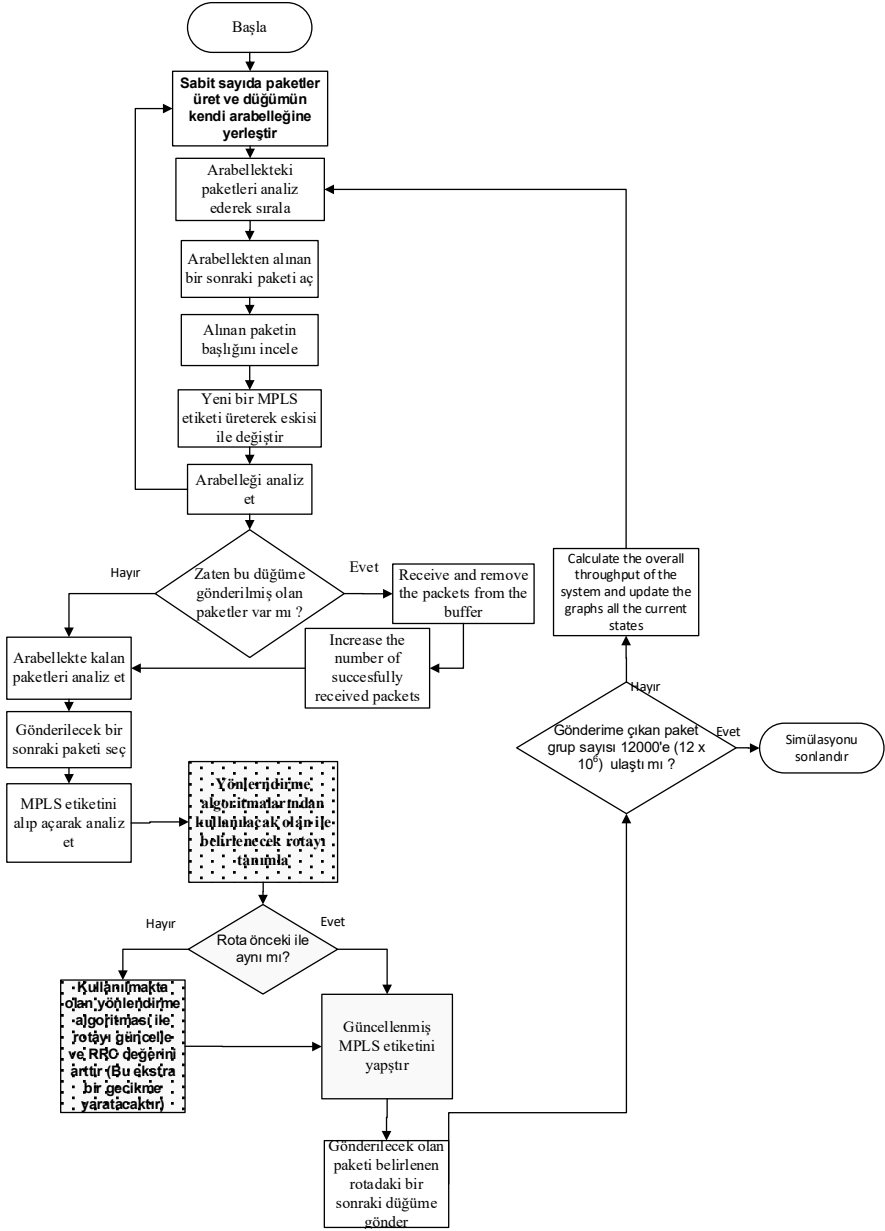
a. MPLS Ağ simülasyonu

Geliştirilecek olan bir metodun MPLS ağı performansı üzerindeki etkilerinin gözlemlenebilmesi için öncelikle bir MPLS tünelleme ağı tüm detaylarıyla simüle edilmelidir. Böylelikle önerilen metodun bu ağ üzerindeki davranışları gözlemlenebilecektir. Tasarlanacak olan bu MPLS ağ simülasyon programı; ayrı ayrı tüm kaynak noktalarında oluşturulan paketler, ağ üzerinde iletilen paketler, kayıp paketler, arabelleklerde bulunan paketler ve nihai olarak hedefe başarıyla ulaşan ortalama paket sayısı değerlerini tutmalıdır, bu sayede elde edilecek olan ağ verimi gözlenecek ve bu şekilde ağ performansı değerlendirilebilecektir. Bu esnada tüm düğümler, her bir iterasyonda üzerlerinden geçerek iletilen paket sayısının da kaydını tutar. Simülasyonda ve teorik hesaplamalarda kullanılması gereken parametreler ve bu parametrelerin kullanılan değerleri Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1: MPLS ağı için kullanılan parametreler ve değerleri [1]

Düğüm sayısı (N)	6 düğüm
Hareket Alanı (x, y)	$(100 \text{ piksel} \times 20m/\text{piksel}) \times (100 \text{ piksel} \times 20m/\text{piksel}) = 4\text{km}^2$
Düğümün Bağıl Hız Aralığı	5 km/s -30 km/s arası (rastgele fakat sabit)
Kullanılan mobilite modeli	Rastgele yol noktası hareketlilik modeli [10]
Paket boyutu (PS)	1 Kbayt [11]
İletim ortamı	Boş Alan ($\alpha=2$)
İletim gücü (P)	1W
Gürültü gücü (P_N)	1 mW
Sinyal Frekansı (f)	1 GHz
Verici Anten Kazancı (G_T)	1
Alıcı Anten Kazancı (G_R)	1
RRC zaman maliyeti	Hızlı Yeniden Yönlendirme (FRR) kullanılarak 50 ms/RRC [12]
Işık hızı (c)	$3 \times 10^8 \text{ m/sn}$
İterasyon Sayısı (NOI)	2000 yineleme
Simülasyon Adım Dönemi (SSP)	30 saniye/yineleme[13]
Rota yeniden yapılandırma aralığı (RUI)	Her yinelemede (30 saniye)[13]
Simülasyon Çalışma Süresi (SRT)	2000 yineleme \times her biri 30 saniye = 16,66 saat.
Paket Grupları Başına Paket Sayısı (PPG)	Paket grubu başına 1000 paket
İletilen toplam paket sayısı (TP)	6 düğüm \times 2000 paket grubu/düğüm \times PPG Paketleri/ Paket grubu
En Hızlı Yol için HC ($HC_{EN \text{ HIZLI}}$)	1,72 sekme [1]
OPR için HC (HC_{OPR})	1,68 sekme [1]

Bu esnada, MPLS ağını uygulamak için her bir düğümün kullanması gereken algoritma ise Şekil 1'deki gibidir



Şekil 1: MPLS simülasyonunda tüm düğümler tarafından kullanılan algoritma [1]

b. MPLS ağı üzerinde performans artırımı sağlamak amacıyla yeni bir yönlendirme algoritmasının geliştirilme tekniği

Bir ağın performansının en belirgin ve somut ölçüm parametresi ağ verimidir (Throughput). Ağ verimi, paket üretim yoğunluğu, bant genişliği, sekme sayısı, paket kayıp oranı, gecikme ve gecikme değişkenliği gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu nedenle, tüm bu parametrelerin anlık değerlerine sebep olacak olan rota seğiminin yani yönlendirme algoritmasının çalışma prensibinin ağ verimi üzerindeki etkisi çok büyüktür. Bir yönlendirme algoritması, kaynaktan hedefe doğru saptanacak olan rota üzerinde, mümkün olan en az sekme sayısı ve en az trafik yoğunluğu olan rotayı seğtiğinde, paket kayıp oranı ve gecikme de otomatikman azaltılmış olacak ve ağ verimi de buna bağlı olarak artırılmış olacaktır. Bu amaçla referans [1]'de OPR (Optimum Path Routing) adlı yeni bir algoritma önerilmiş ve bu yönlendirme algoritmasının ağ üzerinde uygulanması ile ağ performansının sadece yönlendirme algoritmasının değiştirilmesiyle bile yüksek oranlarda artırıldığı gösterilmiştir.

Söz konusu, OPR algoritmasının ana fikri, kaynaktan hedefe doğru iletişimin başından kurulacak olan rotanın uzun ömürlü olması ve daha az RRC gerektirerek zamandan tasarruf etmek suretiyle toplam gecikmenin azaltılmasıdır. Uzun ömürlü rotaların belirlenebilmesi için kullanılan mantık ise, diğer alternatif düğümlere göre birbirine göre minimum bağlı hızları olan, yani belirli bir süre boyunca birbirinden uzaklaşarak kopma olasılığı en düşük olan düğümler serisinden oluşturulacak bir rota seğimi yapmaya çalışmaktadır. Düğümler arasındaki bağlı hızların hesaplanabilmesi için ise, her bir düğüm, diğer düğümlerden artarda alınan son 2 sinyal gücünü ayrı ayrı kaydetmeli ve bu güç değişimlerini eşitlik 1-4 [1] arası verilen eşitlikler üzerinde kullanılmalıdır. Bu hesaplamaların yapılmasında Tablo 1' de verilen varsayılan değerler kullanılmaktadır.

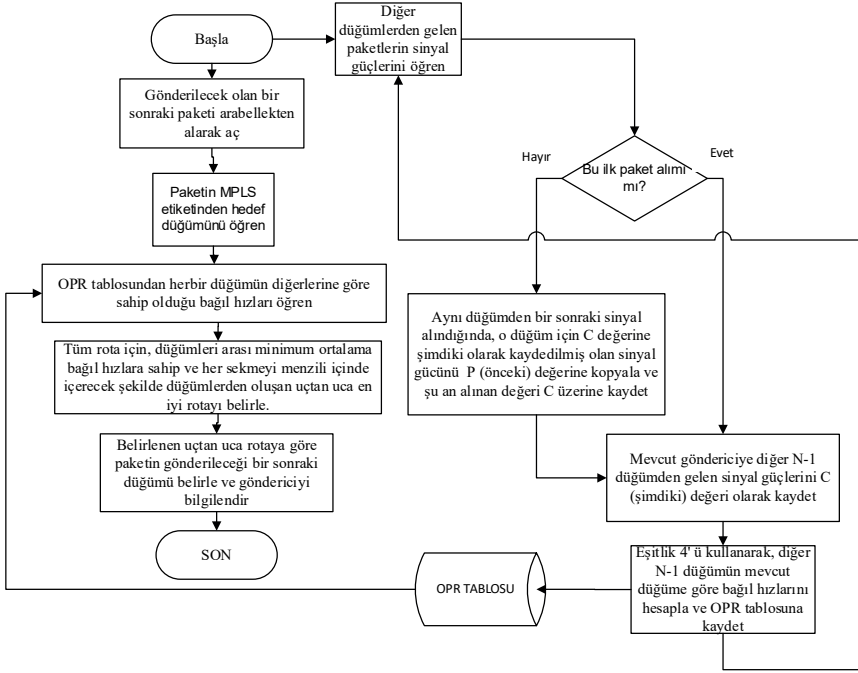
$$P_r = P \times G_t \times G_r \times \left(\frac{c}{4 \times \pi \times f \times d} \right)^2 \quad (1)$$

$$d = \sqrt{\frac{P}{P_r} \times G_t \times G_r \times \left(\frac{c}{4 \times \pi \times f} \right)^2} \quad (2)$$

$$V_R = \frac{|d_{şimdiki} - d_{önceki}|}{T_{şimdiki} - T_{önceki}} \quad (3)$$

$$V_R = \frac{\sqrt{\frac{P}{P_{r_şimdiki}} \times G_t \times G_r \times \left(\frac{c}{4 \times p \times f}\right)^2} - \sqrt{\frac{P}{P_{r_önceki}} \times G_t \times G_r \times \left(\frac{c}{4 \times p \times f}\right)^2}}{T_{şimdiki} - T_{önceki}} \quad (4)$$

Bu eşitliklerde, $d_{şimdiki}$ iki düğüm arası mevcut mesafe, $d_{önceki}$ önceki (bir önceki sinyal alım periyodunda) mesafe, V_R ise bu iki düğümün birbirlerine göre bağıl hızları anlamındadır. MPLS simülasyonu üzerinde yönlendirme algoritması olarak kullanılması öngörülen OPR algoritmasının akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: OPR algoritmasının, düğümler üzerindeki çalışma prensibi [1]

Şekil 2' de verilmiş olan bu algoritmanın kullanımı ile ağ üzerindeki tüm düğümler diğer düğümlere göre sahip olduğu bağıl hızları kendi OPR tablolarında tutarak, kaynak hedef arası minimum bağıl hız ortalamasına sahip rotalar seçme yeteneğine sahip olacaktır. Bu esnada, daha iyi bir rota bulunması durumunda rota yeniden yapılandırması (RRC) yapılacak ancak bu rotanın güncellenmesi sırasında, gerekecek olan rota yeniden yapılandırılma gecikmesinin sistem verimi üzerindeki negatif etkisi ile yapılacak olan rota yeniden yapılandırmasının sağlayacağı pozitif etki birlikte göz önünde bulundurulacaklardır. Bir yönlendirme algoritmasının daha az

RRC gecikmesi gerektirmesi, o algoritmanın daha uzun ömürlü olması anlamına gelir, yani bir rotanın ömrünün sonu yeni bir rotaya geçilme anıdır. Bu nedenle, kullanılan bir yönlendirme algoritması için beklenen rota yeniden yapılandırma olasılığı, diğer yönlendirme algoritmalarıyla kıyaslanarak, RRC sayısı bakımından daha uzun ömürlü olup olmadığının değerlendirilmesinde etkin bir faktördür.

3. BEKLENEN SONUÇLARIN TEORİK HESAPLAMALARI

a. Farklı yönlendirme algoritmalarının kullanım durumlarında beklenen RRC Olasılığının (P_{RRC}) hesaplanması

Bir ağ üzerinde, herhangi bir rota yeniden yapılandırma aralığında (RUI), kullanılan farklı yönlendirme algoritmaları için rota kopması ya da daha iyi alternatif bir rotanın bulunması durumunda, yeni bir RCC gereksinimi olabilecektir. Bu durumla kullanılan yönlendirme algoritmasına göre farklı sıklıklarla karşılaşılacağı aşikârdır. Fakat herhangi bir yönlendirme algoritmasının kullanımında RRC gereksiniminin RUI içinde tam olarak ne zaman olacağını önceden kestirmek zordur. Bu nedenle bu gereksinimin ortalama olarak RUI zamanının tam ortasında olacağı varsayıldığında, bu sürenin yarısında paketlerin başarılı bir şekilde gönderileceği, diğer yarısında gönderilmesi gereken paketlerin ise sonraki yönlendirmenin belirleyeceği rotadan gönderilmek üzere bekleyeceği varsayılmış olacaktır.

Eşitlik (5)'te ağın beklenen veriminin teorik hesaplanması için kullanılması gereken formül verilmiştir. Bu hesaplama için, tüm iterasyonlar süresince hedeflere ulaştırılan toplam bit sayısının, tüm iterasyonların toplam süresine oranı bulunmaktadır. Eşitlik (5)'te, RRC gereksinimleri nedeniyle çalıştırılacak olan ekstra iterasyonların sayısı bu nedenle “ $NOI/2 \times P_{RRC}$ ” olarak verilmiştir.

$$Thr = \frac{\text{Tüm iterasyonlarda hedeflerine ulaştırılan toplam bit sayısı}}{\text{Tüm iterasyonlarda geçen toplam süre}} = \frac{(TP) \times (PS \times \overbrace{8 \times 1024}^{\text{kilobit}})}{\left(NOI + \underbrace{\frac{NOI}{2} \times P_{RRC}}_{\substack{\text{Muhtemel RRC gereksinimi} \\ \text{olasılığına bağlı olarak gerekli} \\ \text{olacak ekstra iterasyon sayısı}}} \right)} \quad (5)$$

Ancak bu hesabın yapılabilmesi için P_{RRC} değerinin de karşılaştırmaya alınacak tüm yönlendirme algoritmaları için ayrı ayrı hesaplanması gerekecektir.

P_{RRC} hesaplamaları, Eşitlik (6) ve Eşitlik (7)'deki hesaplamalarda, En hızlı yol (Fastest Path) yönlendirme algoritması ve OPR algoritmaları için hesaplanarak, sırasıyla $P_{RRC_FASTEST}$ ve P_{RRC_OPR} olarak gösterilmiştir [1].

$$P_{RRC_FASTEST} = 1 - \underbrace{\left[\underbrace{\left(P_{srfh_FASTEST} \right)}_{\text{Tek bir sekme için aynı düğümün yeniden seçilme olasılığı}} \right]^{HC}}_{\text{Kullanımda olan rotanın hiçbir bölümünün değiştirilmeme olasılığı}} \underbrace{\left[\right]}_{\text{Kullanımda olan rota üzerinde en az bir düğümün değiştirilme olasılığı}} \quad (6)$$

$$P_{RRC_OPR} = 1 - \underbrace{\left[\underbrace{\left(P_{srfh_OPR} \right)}_{\text{Tek bir sekme için aynı düğümün yeniden seçilme olasılığı}} \right]^{HC}}_{\text{Kullanımda olan rotanın hiçbir bölümünün değiştirilmeme olasılığı}} \underbrace{\left[\right]}_{\text{Kullanımda olan rota üzerinde en az bir düğümün değiştirilme olasılığı}} \quad (7)$$

Bir ağ üzerinde birbirine bağlantılı halde bulunan iki düğüm arasındaki bağlantının kopması sadece düğümlerden birinin, diğerinin menzilinden dışarıya doğru hareket etmesine ve hızının da aynı iterasyon içerisinde o iletim menzilinden (R_T) çıkmasına yeterli olacak büyüklükte olmasına bağlıdır. Düğümler arası bu muhtemel kopma, düğümlerden birinin hareket edebileceği 8 yönden (Doğu, Kuzey Doğu, Kuzey, Kuzey Batı, Batı, Güney Batı, Güney, Güney Doğu) sadece 3'ü ile (daire şeklindeki menzilin dışına doğru ve kaynaktan uzaklaşacak şekilde) ve 3/8 olasılıkla mümkün olabilecektir. Söz konusu düğümün, hareket edebileceği 8 yön içerisinde, menzil dışına doğru olan bu 3 yönden birine doğru hareket ediyor olma olasılığı ise 3/8' dir.

Bu bilgiler ışığında, sırasıyla Fastest Path yönlendirme algoritmasını ve OPR yönlendirme algoritmasını kullanarak ağ verim düşüklüğüne neden olan bir sekmedeki düğümden vazgeçtikten sonra yine aynı düğümü seçme olasılıklarının hesaplamaları Eşitlik (8) ve (9) da verilmiştir [1].

Fastest Path yönlendirme algoritmasının kullanımında, rota belirlenirken, düğümlerin hareketliliği ve bağlı hızları dikkate alınmadığından, Eşitlik (8) 'de $P_{srfh_FASTEST}$ için yapılan hesaplamada odaklanılan düğümün de tüm düğümlerin sahip olduğu ortalama hıza sahip olduğu varsayılmaktadır. Ortalama hızın, iletim menziline oranının dışarı doğru hareket etme olasılığı (3/8) ile çarpımından elde edilen değer bize bu düğümün menzil dışına

çıkma olasılığını, yani bağlantının kopma olasılığını verirken, bu değer 1'den çıkarılması bağlantının aynı düğüm üzerinden devam etmesi olasılığını verecektir. Burada N , simülasyon alanındaki verici dahil tüm düğümlerin toplam sayısıdır.

$$P_{srfh_FASTEST} = 1 - \frac{\frac{3}{8} \times \frac{\overbrace{\sum_{i=1}^N v_i}^{\text{Hareket eden tüm düğümlerin ortalama hızları}}}{N}}{R_T} \quad (8)$$

Ancak, OPR algoritması düğümlerin hareketliliğini de dikkate aldığından P_{srfh_OPR} için eşitlik 9'da yapılacak olan hesaplama daha farklı olmaktadır. Burada, en uzun ömürlü rotaya karar vermek için kaynak ve hedef arasında bulunan düğümler arasında ve o anki göndericinin menzili içindeki minimum bağlı hıza sahip olan düğüm seçilecektir.

$$P_{srfh_OPR} = 1 - \frac{\frac{3}{8} \times \frac{\overbrace{\min(v_{bağlı})}^{\text{Tüm düğümler içindeki en düşük bağlı hız}}}{R_T}}{R_T} \quad (9)$$

Öte yandan, vericinin iletim aralığı (R_T) ise, eşitlik 10 [1, 4] kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$R_T = \pi \times \left[\frac{\overbrace{\left(\frac{P}{P_N \times e^\alpha - 1} \right)^{\frac{1}{\alpha}}}^{\text{göndericinin kapsama alanı}}}{\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Göndericinin menzili [4]}}} \right]^2 \quad (10)$$

[1]'de, eşitlik 8 ve 9'da elde edilen $P_{srfh_fastest}$ ve P_{srfh_OPR} değerleri sırasıyla eşitlik 6-7'de kullanılarak $P_{RRC_FASTEST}$ ve P_{RRC_OPR} değerleri elde edilmektedir. Daha sonra bu $P_{RRC_FASTEST}$ ve P_{RRC_OPR} değerleri eşitlik 5'teki P_{RRC} yerine kullanıldığında Fastest Path yönlendirme algoritması için elde edilen ağ verim değeri ($Thr_{FASTEST}$) ve OPR yönlendirme algoritması kullanılarak elde edilen ağ verim değeri (Thr_{OPR}) sırasıyla Eşitlik (11) ve Eşitlik (12)'de verilen formüllerle hesaplanabilecektir.

$$Thr_{Fastest} = \frac{\text{Tüm iterasyonlarda hedeflerine ulaştırılan toplam bit sayısı}}{\text{Tüm iterasyonlarda geçen toplam süre}} = \frac{(TP) \times (PS \times 8 \times 1024)}{NOI + \frac{NOI}{2} \times \left[1 - \frac{\frac{3}{8} \times \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N}}{\pi \times \left[\left(\frac{P}{P_N \times e^u} - 1 \right)^{\frac{1}{\pi}} \right]^2} \right]^{HC}} \quad (11)$$

$$Thr_{OPR} = \frac{\text{Tüm iterasyonlarda hedeflerine ulaştırılan toplam bit sayısı}}{\text{Tüm iterasyonlarda geçen toplam süre}} = \frac{(TP) \times (PS \times 8 \times 1024)}{NOI + \frac{NOI}{2} \times \left[1 - \frac{\frac{3}{8} \times \min(V_{bagli})}{\pi \times \left[\left(\frac{P}{P_N \times e^u} - 1 \right)^{\frac{1}{\pi}} \right]^2} \right]^{HC}} \quad (12)$$

b. En Hızlı Yol Algoritması ve OPR Algoritması kullanıldığında oluşacak olan ekstra RRC gecikmelerinin hesaplanması

Elde edilen simülasyon sonuçlarının doğruluğunun teyidi için P_{RRC} değeri alternatif olarak Eşitlik (13)'deki gibi, ekstra RRC gecikme miktarı ($Time_{RRC}$) kullanılarak ta elde edilebilir.

$$P_{RRC} = \frac{\overbrace{\left(\frac{Time_{RRC}}{RRC_{time_cost}} \right)}^{\text{Düğüm başına ekstra RRC sayısı}}}{\underbrace{\frac{Time_{RRC}}{RRC_{time_cost}}}_N + \underbrace{\frac{SRT}{RUI}}_{\text{SRT sırasında olağan olarak gerçekleşen düğüm başına rota güncellemesi sayısı}}} \quad (13)$$

$Time_{RRC}$ değeri, Eşitlik (13)'den çekilerek eşitlik (14)'deki gibi hesaplanabilecektir.

$$Time_{RRC} = \frac{\left(RRC_{time_cost} \times N \times P_{RRC} \times \frac{SRT}{RUI} \right)}{1 - P_{RRC}} \quad (14)$$

Son olarak, Eşitlik (14)'de geçen P_{RRC} değerini, yine Eşitlik (6) ve (7) ile hesaplanan $P_{RRC_{Fastest}}$ ve $P_{RRC_{OPR}}$ ile değiştirdiğimizde sırasıyla Fastest Path yönlendirme algoritması kullanıldığında oluşacak ekstra RRC gecikmesi ($Time_{RRC_{FASTEST}}$) ve OPR yönlendirme algoritması kullanıldığında oluşacak ekstra RRC gecikmesi ($Time_{RRC_{OPR}}$) değerleri sırasıyla Eşitlik

(13) ve Eşitlik (14)' teki gibi hesaplanabilecektir ve bu değerler ağ veriminin hesaplanmasında kullanılacaktır.

$$Time_{RRC_FASTEST} = \frac{\left(RRC_{time_cost} \times N \times \left[1 - \left(1 - \frac{\frac{3}{8} \times \sum_{i=1}^N v_i}{N} \right)^{HC} \right] \times \frac{SRT}{RUI} \right)}{1 - \left[1 - \left(1 - \frac{\frac{3}{8} \times \sum_{i=1}^N v_i}{N} \right)^{HC} \right]} \quad (15)$$

$$Time_{RRC_OPR} = \frac{\left(RRC_{time_cost} \times N \times \left[1 - \left(1 - \frac{\frac{3}{8} \times \min(v_{bağlı})}{R_T} \right)^{HC} \right] \times \frac{SRT}{RUI} \right)}{1 - \left[1 - \left(1 - \frac{\frac{3}{8} \times \min(v_{bağlı})}{R_T} \right)^{HC} \right]} \quad (16)$$

c. En Hızlı Yol ya da OPR Algoritmaları kullanıldığında beklenen ağ verimi değerinin teorik olarak hesaplanması

Hesaplanması hedeflenen $Thr_{FASTEST}$ ve Thr_{OPR} değerleri sırasıyla Eşitlik (15) ve Eşitlik (16)'da verilen formüller ile, ve bu formüllerde Tablo 1'de verilen değerler ($N = 6$, $TP = 6$ nodes x 2000 packet groups/node x 1000 Packets/ Packet group, $PS = 1$ KB and $NOI = 2000$ tekrarlar) kullanılarak [1]'de Eşitlik (17) ve Eşitlik (18)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$Thr_{FASTEST} = \frac{(6 \times 2000 \times 1000) \times (1 \times 8 \times 1024)}{\left(2000 + \frac{2000}{2} \times 0.3441 \right)} = 41.93 \text{ Mb/s} \quad (17)$$

$$Thr_{OPR} = \frac{(6 \times 2000 \times 1000) \times (1 \times 8 \times 1024)}{\left(2000 + \frac{2000}{2} \times 0.0986 \right)} = 46.84 \text{ Mb/s} \quad (18)$$

Elde edilen bu ağ verimi teorik değerlerin teyidi, Şekil (1) ve Şekil (2)'de verilen algoritmaların MATLAB üzerinde gerçekleştirilmesi ile elde edilen deneysel simülasyon sonuçları ile 4. Bölümde kıyaslaması ile yapılmıştır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE ANALİZ

a. En hızlı yol ve OPR algoritmaları için deneysel sonuçlar

Fastest Path ve OPR algoritmaları için deneysel sonuçların elde edilmesi amacıyla Referans [1]'de geliştirilmiş olan MATLAB simülasyonunda, 2 km x 2 km'lik bir alanda Rastgele Yol Hareketlilik Modeli [10] kullanan altı mobil düğüm, sürekli olarak paketler üretmekte ve bu paketleri rastgele tanımlanmış varış noktalarına iletmeye çalışmaktadır. Bu iletimler sırasında, MPLS protokolü işletilerek hedeflerine doğru iletilen paketlerin kullandığı ortalama hop sayısı (HC) sistemin verim performansını etkilemektedir. Simülasyonda, her iki yönlendirme algoritması için (ve N=6 için) elde edilen hop sayısı neredeyse eşit olarak elde edilmiştir.

b. Deneysel olarak elde edilen simülasyon sonuçlarının teorik hesaplamalarla doğrulanması

Referans [1]'de MPLS ağı, ağ verimi performansının değerlendirilmesi amacıyla, sırasıyla Fastest Path yönlendirme algoritmasının kullanıldığı ve OPR algoritmasının kullanıldığı durumlar için ayrı ayrı simüle edilerek, bu algoritmaların sağladığı verim iyileştirmeleri simülasyon üzerinde deneysel olarak kıyaslanmıştır.

Simülasyon, Fastest Path yönlendirme algoritması ve OPR yönlendirme algoritması ile ayrı ayrı çalıştırılarak, her iki durum için de düğüm başına 2000 paket grubu olmak üzere, 6 düğüm için toplam 1200 paket grubu gönderilene kadar çalıştırmıştır. Simülasyondan [1]'de elde edilmiş olan teorik ve deneysel sonuçlar Tablo 2' de özetlenmiştir.

Tablo 2' de verilen sonuçlar göstermektedir ki, her iki durum için de simülasyon sonuçları teorik hesaplama sonuçlarıyla % 95 üzerinde oranlarla örtüşmüştür.

Tablo 2: Fastest Path ya da OPR kullanılarak MPLS ağı için [1]' de elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar

Kullanılan yönlendirme algoritması	Fastest Path	OPR
Iterasyon sayısı	2000	2000
Düğüm Sayısı (düğümler)	6	6
SSP (sn)	30	30
RUI (sn)	30	30
Toplam gönderime çıkan paket sayısı	12000	12000
Düğümlerin arabelleklerinde bulunan toplam paket sayısı	10	20
Tüm düğümlerin hedeflerine ulaştırdıkları toplam paket sayısı	11972	11958
Link hatası nedeniyle oluşan toplam paket kayıp sayısı	18	28
RRC nedeniyle deneysel olarak oluşan ekstra gecikme miktarı (ms)	408	65
HC (sekme sayısı)	1,72	1,68
RRC nedeniyle hesaplama ile beklenen ekstra gecikme miktarı (ms)	314,77	65,63
Hesaplanan RRC ekstra gecikmesi ile deneysel olarak oluşan ekstra RRC gecikmesinin örtüşme oranı	%77,1	% 99,99
Hesaplamalardan elde edilen teorik Ağ verimi değeri (Mbps)	4,193	4,684
Simülasyondan elde edilen deneysel Ağ verimi değeri (Mbps)	4,070	4,890
Hesaplama sonuçları ile Simülasyon sonuçlarının örtüşme yüzdesi	% 97	% 95,7
Fastest Path Yönlendirme algoritmasına göre sağlanan Ağ verimi teorik artırım oranı	%0	%11
Fastest Path Yönlendirme algoritmasına göre sağlanan Ağ verimi deneysel artırım oranı	%0	%20

5. Sonuç

Bir tünelleme ağında, uçtan uca iletişim başlamadan önce oluşturulan rota üzerindeki düğümler arası bağlantıların kopmadan devam etme süresi rota ömrünü vermektedir. Bu çalışmada, Referans [1]'deki çalışma esas alınarak, bir ağda kullanılmakta olan yönlendirme algoritmasının teorik ve deneysel sonuçlarının nasıl elde edilebileceği, bu algoritmanın nasıl geliştirilebilir uzun rota ömrünün yanı sıra, daha uzun süre en iyi performansa sahip rota olarak kalmasını sağlamanın ağ verimi üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğu incelenmiştir. Sonuçlar sadece yönlendirme algoritmasının geliştirilmesi ile bile % 20 ağ verimi artırımı sağlanabildiğini göstermektedir.

REFERANSLAR

- [1] Preveze, B. A Novel High Performance Routing Algorithm for Mobile Multi-hop Tunneling Networks. *Wireless Pers Commun* 114, 1–27 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07257-7>
- [2] Preveze, B, Safak, A, “Comparative analysis of novel Long Life Routing Methods in Mobile Networks”, PIMRC 2010, Pages(s): 1596 – 1601.
- [3] Shih-Chang Huang; Duen-Cheng Shie, “A Long-Life, Shortest Path Routing Algorithm for Wireless Inter-vehicle Networks”, 13th International Conference on Network-Based Information Systems, 2010, Page(s): 9 – 13.
- [4] Chao Gui; Baolin Sun; Chunhua Xia, “An Entropy-Based Long-Life Multipath Routing Algorithm in MANET”, 2008 Fourth International Conference on Natural Computation, 2008, Volume: 5, Page(s): 174 – 178.
- [5] Xu Yi, Wang Wanye, “Finding the Fastest Path in Wireless Networks”, IEEE ICC 2008, Page(s) : 3188-3192.
- [6] Qasim-Yaseen, N. Performance Comparison of Routing Algorithms used in Packet Switching Computer Networks. M.Sc. Thesis, Cankaya University, Computer Engineering, 2015.
- [7] Mohammad Azmi Ridwan, Nurul Asyikin Mohamed Radzi1, Wan Siti Halimatul Munirah Wan Ahmad, Fairuz Abdullah, Md.Zaini Jamaludin, Mohd Nasim Zakaria, “Recent trends in MPLS networks”, Recent trends in MPLS networks : technologies, applications and challenges, IET Communications, (2020) Page(s) :177-185.
- [8] Nassim Haddaji, Kim Nguyen, Mohamed Cheriet, “Towards ete integrated optical packet network: Empirical analysis”, *Optical Switching and Networking*, 27 (2018), Page(s) 18–39
- [9] Adewale Adeyinka A., Adagunodo Emmanuel R., John Samuel N., Ndujuba Charles,” A Comparative Simulation Study of IP, MPLS, MPLS-TE for Latency and Packet Loss Reduction over a WAN, *Int. J. of Networking and Communications*, 2016, 6(1), Page(s): 1-7.
- [10] David C. Wyld, Jan Zizka, Dhinaharan Nagamali, “Advances in Computer Science, Engineering and Applications”, ISBN : 978-3-642-30110-0, Springer, 2012.
- [11] Saed Abed, MazenKharbutli, Bassam Jamil Mohd, Sahel Alounch “MPLS technology in wireless networks”, *Wireless Network* 2014, page(s): 1037-1051.
- [12] Iannone, E. *Telecommunication Networks*. ISBN: 978-1-4398-4636-0, CRC Press Taylor and Francis Group, 2012.

- [13] Muhammad Moizuddin, Mukhtiar Shaikh, “Understanding Convergence in MPLS VPN Networks”, Cisco Systems, Session : RST-2606, 2004
- [14] Book: Waren L. Stutzman, Gary A. Thiele, “Antenna Theory and Design”, ISBN : 978-0-470-57664-9, WILEY, 2012,