

Kablosuz Mesh Ağlar, Yönlendirme Metrikleri ve Protokolleri

Şafak Durukan Odabaşı¹

¹ İstanbul Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul

sdurukan@istanbul.edu.tr

Özet: Günümüzde internet günlük hayatımızın bir parçası haline gelmiştir. Bankacılık işlemlerinden, online eğlenceye kadar birçok alanda giderek büyüyen bir kullanıcı kitlesine sahiptir. Gelecekte internet erişimi hücresel telefonlarda sıklıkla kullandığımız servisler gibi kablosuz olsa, bu kullanıcılar açısından oldukça verimli olacaktır. Fakat bunu sağlayabilmek için yeni bir ağ dizayn edilmesi ya da mevcut bir ağın geliştirilmesi aynı zamanda altyapıda birçok değişiklik yapılmasını gerektirmektedir. Mesh ağ yapısı bu noktada devreye girmektedir ve yeni bir altyapı için daha az ihtiyaçla daha gelişmiş bir internet erişimi vaat etmektedir. Mesh ağlar, 4G dediğimiz gelecek nesil ağlar içerisinde bu özellikleriyle yenilenmiş bir teknoloji olmaktan çok, ek bir erişim teknolojisi olarak yerini alacaktır.

Bu çalışmada, kablosuz mesh ağlar ve örnek uygulamalardan bahsedilecek, temel mimari ve tasarım faktörleri üzerinde durulacak, kablosuz mesh ağ sistemlerinde kullanılan mevcut yönlendirme protokolleri ve bu protokollerin baz aldığı yönlendirme metrikleri açıklanarak, bu protokol ve metriklerin farklı ağ topolojileri üzerinde performansa etkilerinden bahsedilecektir.

Anahtar Sözcükler: Kablosuz Mesh Ağlar, yönlendirme protokolleri, yönlendirme metrikleri.

Wireless Mesh Networks, Routing Metrics and Protocols

Abstract: Today, the Internet has become a part of our daily lives. It has a growing user community on lots of area from banking transactions to online entertainment. it will be very efficient for users, if the next generation internet access is wireless like frequently used services such as cellular phones. But for providing this, a new network needed to be designed or an existing network must be improved as well as making changes on infrastructure. At this point, mesh network infrastucture steps in and offers more sophisticated internet access with less need. Mesh networks is an addition access technology more than being a renewed one in the next generation wireless networks called 4G.

In this study, wireless mesh networks and example applications are mentioned, base architecture and design factors are emphasized, current routing protocols that are used on wireless mesh networks and routing metrics that these protocols are based on, are explained, the performance effects of these protocols and metrics on different network topologies are refered.

Keywords: Wireless Mesh Networks, routing protocols, routing metrics.

1. Giriş

Kablosuz iletişim hiç şüphe yok ki, hem hücresel hem de kablosuz lokal alan ağlarındaki hızlı büyümeyle arzu edilen bir servis haline gelmiştir. İki tür mobil kablosuz ağ vardır[1]. İlki,

altyapılı olarak bilinir, bu ağlar sabittir ve bunlar için kablolu geçitler, köprüler baz istasyonu olarak adlandırılır. İkinci tür mobil kablosuz ağ ise, altyapısız olandır ve öz organizeli ağlar olarak adlandırılırlar. Öz-

organizeli ağlar, mevcut ağ altyapısına ya da merkezi sistem yönetimine ihtiyaç duymayan mobil radyo düğümlerinden oluşur. Bu ağlar, anlık bir altyapıya ihtiyaç duyulduğu durumlar için uygundur.

Gelecek nesil servisler, yüksek veri seviyelerine, gönderilen ve alınan trafik seviyelerinde tam bir esnekliğe, düşük ekipman maliyetine ve servis talebinde bulunan her aboneye ulaşma kapasitesine sahip olmaya ihtiyaç duyacaktır. İşte bu noktada tüm bu sorunları ortadan kaldırmak için Kablosuz Mesh Ağ (Wireless Mesh Networks - WMNs) teknolojisi ortaya atılmıştır. WMN'ler teknolojinin yeni bir alanıdır ve sahip oldukları birçok özellik ile yeni nesil kablosuz mobil ağlar içinde önemli bir rol oynayacaklardır.

2. Kablosuz Mesh Ağlar

Geleneksel kablosuz ağların aksine, WMN'ler sabit bir altyapı üzerine kurulmuş değildir. Bunun yerine hostlar bağlantıyı korumak adına birbirlerine dayanırlar. Kablosuz mesh ağlar hem ağ operatörleri için hem de kullanıcılar için, sabit ya da mobil hostlara düşük maliyetli internet genişband erişim, kablosuz LAN kapsamı ve ağ bağlantısı sağlar. Temel teknoloji, kablosuz routerlardan oluşan ve birbirlerinin paketlerini çok sıçramalı WMN'ün tercih edilmesinin sebeplerinden biri de kolay, hızlı ve ucuz bir kurulumla sahip olmasıdır. Tipik bir WMN, mesh yönlendiriciler ve mesh clientlardan oluşur [1]. Mesh yönlendiriciler statiktirler. Kablosuz bir altyapıdan oluşur ve mesh clientlara çoklu sıçramalı bir internet bağlantılılığı sağlamak için diğer kablolu ağlarla beraber çalışırlar. Mesh clientlar ise ağa mesh yönlendiriciler üzerinden bağlanabilirken birbirleri üzerinden de bağlantı sağlayabilirler. Bu ağlarda yüksek sayıdaki düğümlerin olması, güvenlik, ölçeklenebilirlik, yönetilebilirlik gibi konularda çalışmalar yapılmasını zorunlu kılmaktadır. WMN'lerin yeni uygulamalarının ortaya çıkması gizlilik korunumunu ve WMN'lerin güvenlik mekanizmalarını bir ihtiyaç haline getirmiştir.

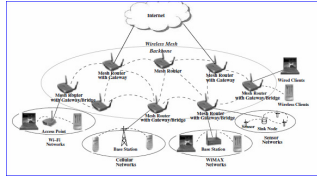
WMN'lerin en büyük sıkıntısı ise kompleks olmalarıdır. Bir WMN'ü dizayn etmesi, oluşturması ve paketleri iletmesi çok kolay olmasına rağmen güvenlik ve sağlamlığı sağlamak için optimum performansa ulaşabilmek oldukça zordur.

3. Kablosuz Mesh Ağ Mimarisi

WMN yönlendiricilerinin normal yönlendirici görevlerinin yanında, mesh yönlendirme işlemlerini desteklemek için ekstra işlem kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Bunun için mesh yönlendiriciler birden fazla ağ arayüz kartıyla(Network Interface Card - NIC)donatılır. Mesh clientların, yönlendiriciler gibi geçit ve köprü özelliklerine sahip olması gerekmediğinden genelde tek bir kablosuz NIC'a sahiptir.

WMN'ler üç kısımda incelenebilir [1]:

- Altyapı/Omurga WMN'leri: WMN Şekil 1'de gösterildiği gibidir. Birbirine bağlı onlarca istemci araçtan oluşmaktadır. Yönlendiriciler ile internet ağı ve diğer client'lar arasındaki bağ kablo ile (Şekil 1'de düz çizgiyle gösterilmiştir) veya kablosuz bağlantı (Şekil 1'de kesikli çizgi ile gösterilmiştir) kurulmaktadır. WMN omurgası çeşitli kablosuz teknolojiler arasında ağırlıklı IEEE 802.11 teknolojisini kullanır.
- İstemci WMN'ler: İstemciler arasında P2P şeklinde kurulan ağlarda bir yönlendiriciye gerek yoktur. Bu kademede en fazla veri iletişimi gerçekleştirilir. Bir paket kaynaktan çıkıp hedefe ulaşmak için ağ içindeki birden fazla istemciden sıçramalar yapar. Tüm trafik tekil düğümlerden geçirilir. Yönlendirme ve öz yapılandırma gibi özelliklere sahip olmaları gerekmektedir.
- Hibrit WMN'ler: Ek bir ağ yapısı, temel mesh ağının üzerini örterek uzun mesafe paket trafiğini kontrol eder. Altyapı ve istemcilerden oluşur. Altyapı kısmı mesh ağlarla internetin, WiFi ve WiMAX ağlarının iletişimini sağlarken istemciler de yönlendirme işlemlerini düzenlerler.



Şekil 1: Dağıtık, Çok katmanlı Mesh Mimarisi [1]

3.1. Kablosuz Mesh Ağların Karakteristik Özellikleri

- Özellikle merkezi kablosuz ağlardaki görüş hattı (LoS - Line of Sight) problemini çözmek için, birden fazla düğüm üzerinden paketleri göndererek kayıp oranını minimuma indirilebilir.
- Ağa sonradan ek ya da çıkartma yapılabilir.
- WMN'ler hem P2P network özelliği taşırken hem de farklı ağ ortamları ve teknolojilerine kolaylıkla erişim sağlayabilir.
- Enerji tüketiminde, hâlihazırda geçerli olan protokoller gibi kısıtlamalara sahip değildir.
- Var olan kablosuz ağ teknolojileriyle uyumludur.
- Fonksiyonelliğin sağlanması ve taşınması mesh ile sağlanır. Bu yönlendirme, güvenlik, yönetim ve güç denetimlerini de içerir.
- Düğümler hareketlerinde özgürdürler. WMN'ler çok dinamik bir yapıya sahiptir.
- Hareketliliği desteklemek için kablosuz operasyon gereklidir, bunu sağlamak için sinyaller veya optik donanım kullanılabilir.
- Tüm düğümlerin bir yönlendirme protokolüne katılması gerekir.

3.2. Mesh teknolojileri Tasarım Faktörleri

İnternet teknolojisi mantıksal bir şekilde düzenlenmiş katmanlardan oluşmuştur. Her katman verilerin doğru bir şekilde iletilmesi ve iletişimin düzgün bir şekilde yapılabilmesi için belirli özelliklere sahiptir [2]. Bu katmanları bir yığın yapısı olarak düşünürsek, üstten alta doğru Şekil 2'deki gibi sıralayabiliriz:

Application
Transport
Routing
MAC
PHY

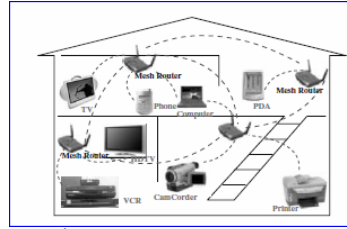
Şekil 2: Bir Ağın Katmanları [2]

Bir ağ tasarımı ve uygulamasında WMN'ler için önemli olan performans faktörleri şunlardır:

- **Sinyal iletim teknikleri:** Piyasa teknolojileri geliştikçe kablosuz iletişim alanında da büyük değişimler yaşandı. Sinyal iletim tekniklerinin yeni protokoller üretildikçe devrimsel çıkışlar yapması gerekmektedir.
- **Ölçeklenebilirlik:** Çoklu sıçramalı ağlarda, iletişim protokolleri ölçeklendirmede problem yaşamaktadır. Ağ boyutu arttıkça performans ciddi anlamda düşmektedir. Bunun ana nedeni ağın boyutunun artmasıyla uçtan uca güvenilirliğin düşmesidir. Ölçeklenebilirliği arttırmak için TDMA ve CDMA ile CSMA-CA karışımı hibrid bir yapı kullanılır.

3.3. Kablosuz Mesh Ağ Uygulamaları

Çok yönlülüğünden dolayı WMN'ler birden çok uygulamanın ihtiyaçlarını karşılayabilir [3]. Kablosuz ağ uygulamaları mevcut haliyle evlerde birçok "ölü noktalara" sahiptir. WMN ile kurulan bir genişbant ev ağında ise kapsamı arttırmak için fazladan fiziksel donanıma gerek kalmadan sadece mesh yönlendiricinin yeri değiştirilerek veya sinyal gücü artırılarak kapsam da genişletilebilir. WMN'ler yük dengeleme sağladığı için idealdir.



Şekil 3: Ev İçinde -Kısa Mesafeli- Mesh Ağı [1]
Aynı şekilde bir mesh yönlendiriciler zinciriyle birden fazla evi bir mahalleyi, hatta bir şehri kapsayacak şekilde mesh yönlendiriciler konumlandırılabilir. Özellikle maliyet açısından kablo ve mevcut IEEE.802.11 Kablosuz LAN yönlendiricileri ile kurulmaya çalışacak bu kapsamda bir ağın maliyeti, WMN'lere göre çok daha yüksek ve verimsiz olacaktır.

WMN'lerin kullanımında farklı örnekleri şöyle sıralayabiliriz [2]:

- **Hücresel ya da WLAN çok sıçramalı tehlikeli bölge**

- *Topluluk ağı*
- *Ev ya da ofis kapalı ağı*
- *Mikro baz istasyonu backhaul*
- *Araçlar arası ad-hoc ağlar (Vehicular ad hoc Networks-Vanets)*
- *Kablosuz Algılayıcı Ağları (Wireless Sensor Networks-WSNs)*

3.4. WMN'lerin Güçlü ve Zayıf Tarafları

Mesh teknolojisinin en büyük avantajı altyapıya bağlı olmadan çalışabilmesidir. Düşük maliyet, kolay ağ bakımı, sağlamlık, güvenilir servis alanı gibi avantajları da onun var olan teknolojiler arasında sıyrılmasını olanak tanımaktadır. Mesh ağların avantajlarını kısaca özetlemek istersek [2]:

- Düşük seviyedeki kullanıcı yoğunluğunda bile yüksek kapsama alanı.
- Mükemmel spectral verim ve kapasite.
- Baz istasyonuna ihtiyaç duyulmaması ve bu nedenle düşük maliyet.
- Düşük seviyede parazit ile sistem performansında görülen artış.
- Servis alımında kompleks esneklik.
- Anten noktalamasının otomatik olarak gerçekleştirilebilmesi.
- Azaltılmış kurulum zamanı.

Mesh ağlarda çok sayıda düğümün bulunması bu ağlardaki kompleksiteyi arttırdığı gibi, bu sistemleri güvenlik, ölçeklenebilirlik, yönetilebilirlik gibi konularda da tehditlerin hedefi haline getirmektedir.

4. WMN'lerde Yönlendirme

Öz-organizeli ağlar için geliştirilen yönlendirme protokollerinin ağ topolojisindeki ve servislerindeki değişiklikleri saptamak ve cevap vermek, bu bilgiyi yönlendirme çalışması için etrafa yaymak, mobilite yönetimini sağlamak, yolların bakımı ve seçimi, seçilen yollara bağlı olarak trafiği iletmek gibi fonksiyonları sağlamaları gerekmektedir [4].

4.1. Yönlendirme Metrikleri

Radyo kaynaklarının verimli bir şekilde paylaşılabilmesi için, kablosuz mesh ağlara yönelik birçok yönlendirme metriği dizaynı

yapılmıştır. Bu metrikler arasındaki performans farklılıklarını ölçmeye yönelik çalışmalar yapılmışsa da tam olarak ifade edebilen bir çalışma gerçekleştirilmemiştir.

WMN'ler yüksek servis alanı sağlarken, ucuz kurulumla da olanak tanımaktadır. Mevcut kurulumlar [5][6], WMN'lerin yüksek potansiyellerini ve ticari değerlerini ortaya koymuştur. Buna rağmen müşterilerin servis kalitesinin keskinleşmesi için ortaya koydukları artan isteklerini karşılamak için yeterli kaynak yönetimi ve servis sağlama mekanizmaları geliştirilmelidir.

• Sıçrama Sayısı (Hop Count)

Sıçrama sayısı, kablosuz çoklu sıçramalı ağlarda en çok kullanılan metriktir. Seçilen yol bir kaynakla hedef arasındaki link sayısından minimize edilmiş olanıdır. Bu metrik, ad-hoc ağlarda uygulaması kolay olduğundan oldukça popülerdir, diğer taraftan belirli kablosuz ortamlarda başarısız olabilir ve tıkanmayı göz önüne almaz.

• Bloklama Metriği (Blocking Metric)

Bu teknik, basit olması, komşuların sayısı bilgisini korumaktan başka ek bir masraf getirmemesi gibi avantajlara sahiptir. Ama, link kapasitesi ya da trafik akışını göz önüne alan hiçbir karakteristiği ortaya koymamakta ve sadece yüzeysel bir şekilde parazit konusu üzerinde durmaktadır.

• Beklenen İletim Sayısı (Expected Transmission Count - ETX)

ETX, bir paketin kablosuz bir link üzerinden başarılı bir şekilde teslim edilmesi için gereken iletimlerin sayısıdır [7]. Bir yolun ETX'i yol boyunca yer alan her linkin ETX'lerinin toplamıdır. p_f ve p_r ileri ve geri yönlerdeki paket kayıp olasılığı olsun. Başarısız bir iletim olasılığı, p :

$$p = 1 - (1 - p_f)(1 - p_r)$$

Bundan dolayı, 1 sıçrayışta başarılı bir şekilde bir paketi teslim edilebilecek iletimlerin sayısı da;

$$ETX = \sum_{k=1}^{\infty} k p^k (1-p)^{k-1} = \frac{1}{1-p}$$

ile ifade edilir.

ETX, artan self-parazit yüzünden, daha uzun yollar daha düşük yük miktarına sahip oldukları için, yolları daha yüksek yük ve

daha az sayıda sıçrama ile destekler. Bunun yanında, bu metrik, iletim seviyeleri arasındaki farkı göz önünde bulundurmaz. Kontrol paketlerinin iletim seviyesi genellikle düşük olduğundan, bir linkin gerçekten ne kadar meşgul olduğu ile ilgili sağlam bilgi vermez. Ayrıca, verimli link paylaşımıyla ilgili de bir bilgi vermez.

• **Beklenen İletim Zamanı (Expected Transmission Time - ETT)**

ETT, ETX'deki hesaplama bandwidth'inde dahil edilmesiyle yapılmış bir geliştirmedir [8]. S paket boyutu, B de ele alınan linkin bandwidth'ı olsun. ETT:

$$ETT = ETX \frac{S}{B}$$

şeklinde hesaplanır.

ETX'le benzer şekilde, bir yolun beklenen iletim zamanı, yol boyunca tüm linklerin ETT'lerinin toplamına eşittir. Daha sonra ortaya atılan ağırlıklı birikimli ETT (weighted cumulative ETT - WCETT)[8], çeşitli kanallı yolları dikkate almak için dizayn edilmiştir. Bir p yolu için WCETT şu şekilde tanımlanır:

$$WCETT(p) = (1 - \beta) \sum_{link \in p} ETT_i + \beta \max_{1 \leq j \leq k} X_j$$

Burada β , 1'den küçük ayarlanabilir bir parametredir ve X_j , j kanalının p yolu boyunca kaç kez kullanıldığını göstermektedir.

Yine de bu metrik hala efektif link paylaşımını hesaplamadığı için ETX/ETT gibi aynı kısıtlamalardan etkilenir ve inter-flow paraziti tam olarak yakalamaz.

• **Modifiye edilmiş Beklenen İletim Sayısı (Modified Expected Transmission Count - mETX)**

ETX, kanal çeşitliliğini göz önüne almadığı ve sadece ortalama kanal davranışını önemseydiği için bu eksikliği gidermek için bir genişletme yapılmıştır. mETX şu şekilde ifade edilir:

$$mETX = exp(\mu_{\Sigma} + \frac{1}{2}\sigma_{\Sigma}^2)$$

ve σ_{Σ}^2 hata olasılığının ortalamasını ve değişebilirliğini göstermektedirler.

Bu metriğin uygulanmasındaki ana engel, iletim kanalının değişkenliğini tam anlamıyla modellemek ve ölçmektir.

• **Ağ Tahsis Vektör Sayısı (network Allocation Network Count - NAVC)**

NAVC [9], verilen bir inceleme periyodu için, bir link boyunca bir düğüm tarafından gözlemlenen Ağ Tahsis Vektörlerinin ortalamasının alınması ile elde edilen interflow parazit ile ilgilidir.

• **Arayüz ve Kanal Anahtarlama Metriği (Metric of Interface and Channel Switching - MIC)**

MIC, WCET üzerinden verimli link paylaşımı ile ilgili daha fazla bilgi edinerek geliştirme yapmak amacıyla tasarlanmıştır. N düğüm ve p yoldan oluşan bir ağ için, MIC mevcut tüm linkler üzerinden iletim yapmak için zamanı ortalama. MIC kanal çeşitliliğini hesaba katmak için Kanal Anahtarlama Masrafı (Channel Switching Cost - CSC) adı verilen bir terim eklemiştir.

$$MIC(p) = \frac{1}{N \times \min(ETT)} \sum_{link \in p} IRU_i + \sum_{node \in p} CSC_i$$

Bu metrik, uygulama bakımından, bazı büyük dezavantajlara sahiptir. Her linke ait ETT'nin güncel bilgisini sağlamak için ihtiyaç duyulan masraf trafik yüküne bağlı olarak ağ performansını ciddi şekilde etkileyebilir. Ayrıca çakışma alanında yer alan tüm linklerin her düğümdeki trafik yükü farklılıklarından habersiz olan aynı seviyedeki parazite katkıda bulunduğunu varsayar.

Her ne kadar bir çok yönlendirme ölçütü varsa da, ortak bir görüş yoktur. Tablo 1'de ortaya konulan bu ölçütlerin ana karakterleri belirtilmektedir.

Metric	Quality-aware	Data rate	Packet size	Intra-flow interference	Inter-flow interference	Medium instability
Hop	x	x	x	x	x	x
ETX	√	x	x	x	x	x
ML	√	x	x	x	x	x
ETT	√	√	√	x	x	x
WCETT	√	√	√	√	x	x
MIC	√	√	√	√	√	x
mETX	√	√	√	x	x	√
ENT	√	√	√	x	x	√
AWARE	√	√	√	√	√	√

Tablo 1: Ana yönlendirme ölçütlerinin karakteristik özellikleri [10]

4.2. Yönlendirme Protokolleri

Ad-hoc yönlendirme protokolleri genellikle proaktif, reaktif ya da hibrittir. Proaktif strateji, kablolu ağlardaki klasik yönlendirme gibi çalışır. Yönlendiriciler, ağdaki herhangi bir hedefe giden en az bir yolu tutarlar. Diğer taraftan reaktif protokoller, bir hedefe giden

bir yolu ancak o düğümün gönderecek bir paketi varsa tutarlar.

Bir çok WMN yönlendirme protokolü benzer stratejileri kullanır. Fakat, WMN'lerin özelliklerine uyarlanmıştır. WMN'ler için 4 sınıftan oluşan bir sınıflandırma verilebilir [10] : ad-hoc tabanlı, kontrollü taşmalı, trafik farkındalıklı ve fırsatçı.

- Ad-Hoc Tabanlı WMN Yönlendirme Protokolü

Bu protokoller link kalitesi değişimlerine ayak uydurabilmek için ad-hoc yönlendirme protokollerine uyarlanmıştır.

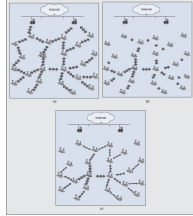
Link kalitesi kaynak yönlendirme protokolü (Link Quality Source Routing - LQSR) [11], link-konum proaktif yönlendirme ile ad-hoclardaki reaktif stratejiyi birleştirir. LQSR, en kısa yolları hesaplamak için ağın tamamı hakkındaki bilgiyi kullanır.

SrcRR [12], reaktif protokolüne benzeyen, çapraz linklerin yönlendirme bilgilerini güncellemek için sadece bir keşif prosedürü kullanır. Fakat, yolları hesaplamak için ağın bütün bilgisini kullanmaz.

Çoklu radyo LQSR (MR-LQSR) [11], LQSR'ı çoklu kanallar ve arayüzler üzerinden, WCETT ölçütünü kullanarak çalışabilmek için uyarlanmıştır.

- Kontrollü Taşma WMN Yönlendirme Protokolü

Kontrollü taşma protokolleri, kontrol masrafını azaltmak amacıyla tasarlanmıştır. Klasik taşmayla karşılaştırıldığında, yönlendirme masrafını azaltacak 2 temel yaklaşım ortaya konulmuştur [10] (Şekil 4a).



Şekil 4: Kontrollü Taşma Biçimleri (a) Klasik taşma, (b) Zamansal taşma, (c) Uzamsal taşma [10].

Zamansal taşmada (Şekil 4b), frekans kaynak yönlendiriciye olan uzaklığa göre belirlenmiştir. Diğer taraftan uzamsal taşmayı kullanarak (Şekil 4c), uzak düğümler kaynaktan daha az kesin ve detaylı bilgileri

alırlar. Komşu düğümlere gönderildiği sıklıkta uzak düğümlere paket gönderilmesi gerekmez. Merkezi isteğe bağlı link durum (LOLS) [13], linklere bir uzun süreli bir de kısa süreli masraf atfetmektedir.

Mobil Mesh Yönlendirme Protokolü (MMRP), yönlendirme protokollerine, open shortest path first (OSPF) protokolünün yaptığı gibi bir yaş ataması yapar. Ne zaman bir düğüm bir yönlendirme mesajı gönderse, mesajı iletmek için gerekli olan zamanı yaşından çıkartılır.

Optimize edilmiş link durum yönlendirme (OLSR) kontrollü taşma protokolünün bir başka örneğidir [10]. Her düğüm ayırıcı düğümlerden alınan yönlendirme bilgisini iletmekle sorumlu düğümlerin bir birleşimi olan kendi MPR'larını seçerler.

- Trafik Farkındalıklı WMN Yönlendirme Protokolü

Trafik farkındalıklı ya da ağaç tabanlı protokoller, WMN'lerin genel trafik matrisini dikkate alır [10].

Ad-hoc on demand distance vector-spanning tree (AODV-ST) [14], AODV'yi ad-hoc ağlardan adapte eder. AODV-ST'de, geçit periyodik olarak ağdaki her düğümden yönlendirme tablosunu güncellemek için mevcut yol bilgisini ister.

Raniwala ve Chiueh [15] kablolu ağlarda kullanılan yayılım ağacına dayanan bir yönlendirme algoritması önermişlerdir. Bu protokol, yük dengeleme için sıçrama metriği ve diğer metrikleri kullanır.

- Fırsatçı WMN Yönlendirme Protokolü

Fırsatçı protokoller, işbirlikçi çeşitlilik şemalarına dayanan yönlendirmeyi geliştirir. Bu protokoller, verinin daima en azından bir sıçrayışın olduğu yere iletilmesini garanti eder.

ExOR protokolü, yönlendirmeyi MAC katmanı fonksiyonelliği ile kombinler [16]. Yönlendiriciler, yayılma paketlerini yığın haline, bir önceki yol hesaplamalarını içermeyecek şekilde gönderirler. Yayılma veri paketleri güvenilirliği artırır, çünkü bir iletimi işitmesi için sadece bir ara yönlendiriciye ihtiyaç vardır.

Dirençli Fırsatçı Mesh Yönlendirme Protokolü (Resilient Opportunistic Mesh Routing Protocol - ROMER) [17] uzun süreli

en kısa yol ile anında fırsatçı iletimli minimum gecikme yollarını, dayanıklı yollar sağlamak ve ortam kalitesinde kısa süreli varyasyonların üstesinden gelmek için birleştirir. ROMER, uzun süreli yolları hesaplar ve bunları çalışma anında, fırsatçı bir şekilde kısa süreli daha yüksek kalitede linklerden faydalanmak için uzatır ya da kısaltır. ROMER ortam değişimlerine daha hızlı uyabilmek için paket temelinde iletim yapar.

Tablo 2’de verilen sınıflandırmaya göre yönlendirme protokolleri ve kullandıkları metrikler gösterilmiştir.

Class	Protocols	Metrics
Ad hoc based	LQSR	ETX
	SrCR	ETX
	MR-LQSR	WCETT
Controlled flooding	LOLS	ETX or ETT
	MMRP	Not specified
	OLSR	Hop, ETX, ML, or ETT
Traffic-aware	AODV-ST	ETX or ETT
	Raniwala and Chueh's	Hop or load-balancing metrics
Opportunistic	ExOR	Unidirectional ETX
	ROMER	Hop or delay

Tablo 2: WMN Yönlendirme Protokolleri ve Kullandıkları Metrikler [10]

4.3. Metriklere Bağlı Olarak Ağ Performansının Değerlendirilmesi

• Sıçramaların Sayısı

ML metriğinin link kalitesini ilk sırada tutması nedeniyle en fazla sıçramalı yoları seçtiği, ETX ve ETT metriklerinin ise aynı yolu seçmeden aynı sayıda sıçrayışlı yolları seçtiği gözlenir. Sonuçlar düğümler arasındaki fiziksel uzaklık ve bunlar arasındaki linklerin kaliteleri ile tutarlılık göstermektedir.

• Paket Kayıp Seviyesi

Paket gönderimi sırasında, hedef düğüme olan uzaklık arttıkça, sıçrayış ölçütünün kullanımı yüksek paket kayıp oranlarına neden olmaktadır. Bu davranış, sıçrama metriğinin link kalitesini göz önüne almamasından ve paketleri uzun gürültülü linkler boyunca iletmeye dayanmasından kaynaklanmaktadır. ETX ve ETT ölçütleri ise uzaklığa bakmaksızın düşük seviyelerde paket kaybına neden olmaktadır. ML ölçütü, bu dört ölçüt arasında en iyi performansı sergileme eğilimindedir, çünkü dizaynının temeli düşük kayıplı linkleri seçmesine dayanmaktadır.

• Ağ Gecikmesi

Bir kaynaktan hedefe paketlerin gönderilmesi ve geri dönme süresine bağlı olarak ağ gecikmesi ölçümünde sıçrama metriğinin kullanılması, ağ gecikmesi değerini artırmaktadır. Bunun temel nedeni, her ne kadar az sıçrayışlı linkler kullanılsa da bu linklerin gürültülü olması katman 2 tekrar gönderilme sayısını arttırması, doğal olarak bunun da katman 3 paketlerinde daha uzun gecikmelerin olmasına neden olmasındır. ETX için 150 ms’den az, ML için 75 ms, ETT için ise 35 ms’lik gecikme değerleri gözlenebilir. ETT metriği iletim zamanını tahmin eden tek metriktir ve bu özellik gecikme açısından en iyi yüksek performansı sağlamasına neden olur.

• Yük

Tipik ETT, ETX ve ML metrikleri, sıçrayış metriği ile karşılaştırıldığında daha fazla sayıda sıçramalı yolları seçerler. Paylaşılan ortamdaki çoklu sıçramalı iletimlerde fazladan her bir sıçrayış, çekişme ve çakışma olasılığında bir artışa, bu da yük üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmaktadır. Kısa mesafeler için, tüm metriklerde yüksek yük değerlerine ulaşılabilir. Uzaklığın artmasıyla beraber, sıçrayış metriğinin performansı gözle görülür bir keskinlikle düşerken, bunun yanında diğer metrikler tatmin edici seviyelerde bir yük sonucu vereceklerdir.

4. Sonuç

Her yerde bağlantı ve servis kalitesinin garantilenmesi isteğinin artması nedeniyle, yeni kablosuz teknolojiler kolay kurulum, düşük maliyet ve çok yönlülükleriyle beraber ortaya çıkmışlardır. Kablosuz mesh ağlar, çoklu sıçramalı iletişimlerden yararlanan kablosuz teknolojilerin bir karmasına dayanan genişletilmiş bir ağ kapsamı sunan bir çözüm olarak ortaya atılmıştır. WMN’lerin bazı karakteristik özellikleri onları geleneksel kablolu ve kablosuz ağlardan ayırmakta ve bu nedenle de yeni kaynak yönetim tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu sorunlarla başa çıkmak için, bahsi geçen parametreleri yol hesaplamasında birleştirecek olan bir yönlendirme algoritmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

WMN'lerin tasarımı, bir çok problemi de beraberinde getirmektedir. Bunlar yönlendirme metriklerinin sayısından güvenliğe kadar uzanabilir. Yönlendirme verimliliğini arttırmanın bir yolu çapraz katmanlı tasarımıdır (cross-layer design).

Şu anda ortaya koyulan mevcut uygulamalar ve protokollerde çok kanallı bir yapıdan ziyade tek kanallı sistemler üzerinden metriklerin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Teorikten pratiğe geçiş sırasında çok kanallı yapının varlığı göz önüne alınmalı ve bu konudaki eksiklikleri giderecek çalışmalara ağırlık verilmelidir.

Kablosuz Mesh Ağların, yeni nesil ağlar arasında bir çok probleme tek başına cevap verecek kapasitede olduğu göz önüne alındığında, bir internet ağından beklenen hız, güvenlik ve her yerden ulaşılabilirlik gibi özelliklerin hepsini yerine getirebilen bu ağ teknolojisi, mevcut eksikliklerin giderilmesi ve gerekli çalışmaların yapılması sonucunda günümüz sorunlarının gelecekteki çözümü olacak gibi görünüyor.

5. Kaynaklar

- [1] AKYILDIZ I.F., WANG X., 2009, Wireless Mesh Networks, WILEY, United Kingdom, 978-0-470-032565.
- [2] METHLEY S., 2009, Essentials of Wireless Mesh Networking, CAMBRIDGE, New York, 978-0-511-58070-3
- [3] Mihail L. Sichitiu, "Wireless Mesh Networks: Opportunities And Challenges", Wireless World Congress, May 2005.
- [4] Eng Chun; Lv Qin, LiuYong, Shi MeiLin, "Routing Protocols Overview and Design Issues for Self- Organized Network", Communication Technology Proceedings, 2000. WCC - ICCT 2000, August, 2000.
- [5] S. Waharte, B. Ishibashi, R. Boutaba, "Performance Study of Wireless Mesh Networks Routing Metrics", Computer Systems and Applications, April, 2008.
- [6] K. Rayner. Mesh wireless networking. Communications Engineer, 1(5):4447,Oct.-Nov. 2003.

[7] H.-Y. Wei, S. Ganguly, R. Izmailov, and Z. Haas. Interference-aware IEEE 802.16 wimax mesh networks. In Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), 2004.

[8] D. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), 2003.

[9] C.E. Koskal and H. Balakrishnan. Quality-aware routing metrics for time-varying wireless mesh networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 24(11):1984-1994, November 2006.

[10] Miguel Elias M. Campista, Pedro Miguel Esposito, Igor M. Moraes, Luís Henrique M. K. Costa, Otto Carlos, Diego G. Passos, Célio Vinicius N. de Albuquerque, Débora Christina M. Saade, Marcelo G. Rubinstein, "Routing Metrics and Protocols for Wireless Mesh Networks", IEEE Network, 2008.

[11] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks," ACM MobiCom, Sept. 2004, pp. 114–28.

[12] D. S. J. de Couto, "High-Throughput Routing for Multi-Hop Wireless Networks," Ph.D. diss., MIT, 2004.

[13] S. Nelakuditi et al., "Blacklist-Aided Forwarding in Static Multihop Wireless Networks," IEEE SECON '05, Sept. 2005, pp. 252–62.

[14] K. N. Ramachandran et al., "On the Design and Implementation of Infrastructure Mesh Networks," IEEE Wksp. Wireless Mesh Networks, Sept. 2005.

[15] A. Raniwala and T.-C. Chiueh, "Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-Based Multi-Channel Wireless Mesh Network," IEEE INFOCOM, Mar. 2005, pp. 2223–34.

[16] S. Biswas and R. Morris, "ExOR : Opportunistic Multi-Hop Routing for Wireless Networks," ACM SIGCOMM, Aug. 2005, pp. 133–44.

[17] Y. Yuan et al., "ROMER: Resilient Opportunistic Mesh Routing for Wireless Mesh Networks," IEEE Wksp. Wireless Mesh Networks, Sept. 2005.