

# 802.11s Örgü (Mesh) Ağ Yönlendirme Algoritmaları

Mehmet Burak Uysal, Gökhan Akın, Mustafa Ünal, Tugay Sarı

Istanbul Teknik Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, İstanbul

uysalmeh@itu.edu.tr, akingok@itu.edu.tr, unal@itu.edu.tr, saritu@itu.edu.tr, www.gokhanakin.net

**Özet:** Kablosuz Mesh Ağları; kolay kurulumları ve kendi kendini iyileştirebilen otonom sistem oluşturabilmeleri gibi özellikleri sayesinde var olan kablolu yapıya alternatif olacak şekilde gelişmeye devam etmektedirler. 802.11 ağlarında oluşturulabilecek mesh sistemler için tasarlanan 802.11s protokolü henüz standardizasyonu tamamlanmamış olsa da protokolün içeriği ve getirdiği yenilikler büyük ölçüde ortaya çıkmış bulunmaktadır. 802.11s protokolü ile birlikte 802.11 mesh ağlarına yönlendirme, güvenlik ve bazı MAC katmanı özellikleri eklenmiştir. Bu çalışmada IEEE 802.11s protokolüne cihazlarda bulunması zorunlu olan Hybrid Wireless Mesh Protocol'ü ve bu protokol ile birlikte çerçeve yapısında oluşan bazı değişikliklerden bahsedilecektir.

**Anahtar Sözcükler:** Kablosuz Mesh, Hybrid Protocols, Wireless Mesh Networks, Airtime-Link Metric, 802.11s.

## 1. Giriş

Kablosuz olarak merkezi bir yapısı olmayan, istemcilerin kendileri arasında haberleşmesi şeklinde gerçekleşen iletişim teknolojilerinin genel adı "Ad-hoc" ağlar olarak geçmektedir. Ad-Hoc, geçici anlamına gelen Latince kökenli bir kelimedir. Bu kelime oluşan özel veya acil sorunlar için kullanılan çözümler olarak da kullanılmaktadır.

İhtiyaca göre oluşturulmuş birden fazla Ad-Hoc kablosuz ağ türü bulunmaktadır. Bunlardan biri olan Mesh (Örgü) ağlar, cihazların sabit olduğu ve enerji sınırlı olmayan, bantgenişliğinin de önemli olduğu ağ tipine genel olarak verilen isimdir.

## 2. Kablosuz Mesh Ağları

Bir mesh ağı, aynı ağ içerisinde bulunan cihazların bir kısmının ya da hepsinin birden fazla uç ile fiziksel ya da mantıksal bağlantısının olması esasına dayanır. Bu yolla sağlanan yedeklilik ve güvenilirlik sayesinde

ağ içerisinde bulunan bir cihazın bozulması ya da işlevini yerine getirememesi durumunda diğer uçlar arası iletişimin devamlılığı sağlanmış olur. Kablosuz iletişimin yaygınlaşmasına paralel olarak mesh topolojiler kablolu iletişime göre daha fazla hata oluşumuna yatkın olan kablosuz iletişimde de kullanılmaya başlanmıştır.

İlk nesil kablosuz mesh ağlarında son kullanıcılar ve mesh ağını diğer ağlara bağlayan backhaul haberleşmesi aynı radyo yayını üzerinden yapılmaktaydı. Bu yapı interferans oluşumuna engel olamamakla birlikte performans açısından da bekleneni karşılayamamaktaydı. Bu şekilde oluşturulacak mesh yapı birkaç hoptan öteye gidememekteydi. Bu soruna mesh ve son kullanıcı arası iletişimin ayrı frekanslardan yapıldığı ikinci nesil mesh ağlarda bir nebze olsun çözüm getirildi. İkinci nesil meshlerde erişim noktaları(access point) arası haberleşmede 802.11a - 5 Ghz bandından yapılırken son kullanıcılarla olan iletişim de 802.11b/g - 2.4 GHz bandı kullanılmaya başlandı. İkinci nesil mesh ağları ile

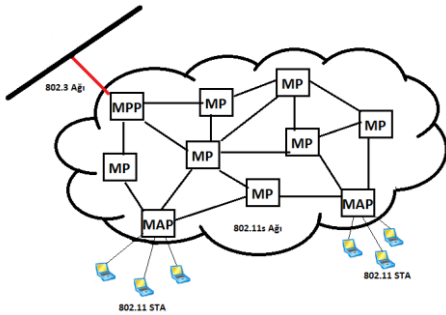
performans olarak önemli bir gelişme kaydedilse de ağdaki yoğunluğun artmasına paralel olarak backhaul bağlantılarda oluşan interferans ve yoğunluk problemi hala devam etmekteydi. Yine bu ağlar üzerinde çalışan çoklu ortam(multimedia) uygulamaları gereken performansı gösterememekteydi.[1]

Üçüncü nesil mesh ağları ile birlikte backhaul de çoklu radyo desteklenir hale geldi. Üçüncü

nesilde mesh noktaları arasında iletim tek bir radyo üzerindeki farklı kanalları vasıtasıyla yapılabildiği gibi MIMO ile birlikte birden fazla yayın üzerinden upstream ve downstream bağlantıları yapılmaya başlandı. Bu yapı kablosuz mesh performansında büyük ölçüde artışa neden oldu.[2]

### 3. 802.11s Mimarisi

Bir IEEE 802.11s ağının içerisinde bulunan cihazlar aşağıda gösterilmektedir. (Şekil 1) Kablosuz mesh ağının içerisinde bulunan her bir noktaya Mesh Noktası (Mesh Point - MP) adı verilmektedir. Mesh Noktasını, üzerine mesh kabiliyetleri eklenmiş, IEEE 802.11 protokol özelliklerini taşıyan bir cihaz olarak adlandırabiliriz. Mesh Noktaları bir mesh ağında verinin yönlendirilmesinden sorumludur. Mesh Noktaları hem son kullanıcılara hizmet verebilir hem de verinin diğer IEEE protokolünü destekleyen cihazlara aktarılmasını sağlayabilirler.

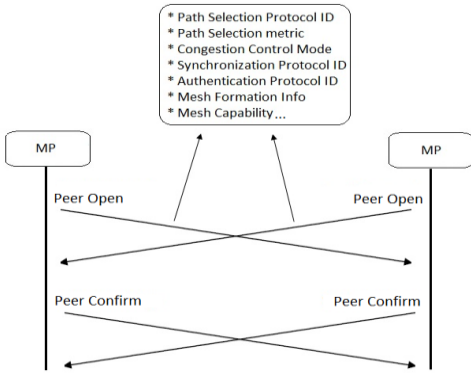


Şekil 1. 802.11s Mimarisi

Mesh iletiminin yanında IEEE 802.11 protokolünü destekleyen son kullanıcıların (station -STA) da mesh'e erişimini sağlayan cihazlara Mesh Erişim Noktası (Mesh Access Point - MAP) adı verilir. Mesh Erişim Noktaları son kullanıcı trafiğinin mesh'e dahil edilip mesh içerisinde yönlendirilmesinden sorumludur. Bu türden mesh cihazları son kullanıcılar için bir vekil görevi üstlenirler. Bir Mesh ağının çıkış noktası olarak görev yapan ve Mesh Ağının diğer ağlara bağlanmasını sağlayan mesh noktalarına Mesh Çıkış Noktası (Mesh Portal Point - MPP) adı verilir. Mesh çıkış noktaları 802.11 protokollerini destekleyen arayüzlerinin haricinde ethernet (802.3), WiMax (802.16) v.b. arayüzleri de bünyelerinde bulundurlar. Bu üç ayrı yapıda hizmet veren mesh noktaları bir araya gelerek mesh ağlarını oluştururlar.

Bir mesh destekli cihaz, mesh özelliği olan bir diğer cihazla komşuluk kurabilmek için Mesh Peer Management Protocol'ünü kullanır. Bu komşuluğun kurulması beacon/probe çerçeve (frame) aracılığıyla aktif ya da pasif olarak gerçekleşebilir. Beacon ve probe çerçeveleri transferi esnasında mesh içerisinde kullanılan parametreler ve servisler karşı tarafa aktarılır. Bir mesh ağını karakterize eden 3 ana kıstas vardır. Bunlar mesh ID'si, mesh içerisinde kullanılacak 2.katman yönlendirme protokolü ve bu protokol içerisinde kullanılacak metrik türüdür. Bu bilgiler mesh noktaları tarafından meshe dâhil olmak isteyen cihazlara aktarılır. Cihazların karşılıklı mutabakata varması sonucu yeni cihaz meshe dâhil olur. Bütün bu eş (peer) noktalar arası aktarımlar beacon/probe çerçeveleri vasıtasıyla gerçekleşir. Eğer iki eş nokta mesh konfigürasyonu hususunda anlaşırsa birbirlerine Peer Open ve Peer Confirm çerçeveleri gönderirler.(Şekil 2) Böylelikle komşuluğun kurulması tamamlanmış olur. Eğer iki nokta arası komşuluk koparılmak istenirse karşı tarafa Peer Close çerçevesi gönderilir. [3]

802.11 ağları yapıları itibari ile kablosuz mesh aktarımının yapılmadığı, genel olarak her erişim noktasının başka bir geniş alan bağlantısı tarafından beslendiği tek hop'luk aktarım noktalarından oluşmaktadır. Bu işleve uygun olarak düzenlenmiş ikinci katman protokolleri ise kablosuz meshin doğasında var olan, iletişimin kablosuz aktarım noktaları üzerinden yapılması durumlarında gerekli performansı gösterememektedirler. Bu nedenden dolayı 802.11s protokolü ile birlikte var olan ikinci katman yapısında bazı eklenti ve yeniliklere



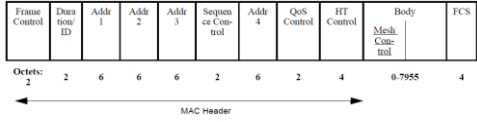
Şekil 2. Peer Oluşturma

ihtiyaç duyulmuştur fakat bu konu yazının kapsamı içerisine girmediğinden burada değinilmeyecektir.

#### 4. 802.11s Çerçeve (Frame) Yapısı

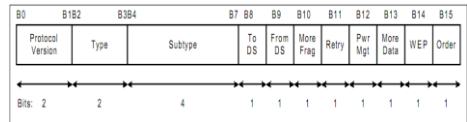
IEEE 802.11s protokolü var olan 802.11 protokolleri ile birlikte çalışabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Bunun için standart 802.11 çerçeve yapısını tamamen değiştirmek yerine 802.11 protokolü temel alınarak bazı düzenlemeler yapılmıştır. IEEE 802.11s çerçevesine bakıldığında göze çarpan en büyük değişiklik 802.11 çerçevesinin body kısmına eklenen mesh başlığıdır. (Şekil 3) Bu eklentinin dışında kablosuz mesh ağlarında verilerin yönlendirilmesi ve multihop işlevlerinin yerine getirilebilmesi adına IEEE 802.11s protokolü ile birlikte var olan

çerçeve yapısına bazı yeni tanımlamalar getirilmiştir.



Şekil 3. 802.11s Çerçeve Yapısı

802.11 çerçevesinin ilk iki oktetini oluşturan Çerçeve Kontrol (Frame Control) başlığında mesh içerisinde verinin en iyi yol üzerinden hedefe iletilmesini sağlayacak yönlendirme çerçeveleri için yeni bir kategori tanımlanmıştır. 802.11 çerçevesinde bulunan Çerçeve Kontrol başlığının üçüncü ve dördüncü bitleri, bir çerçevenin tipini belirtmek için kullanılır. Bu iki bitin aldığı değere göre çerçevenin bir yönetim, kontrol ya da data çerçevesi olduğu belirtilmekteydi. Kablosuz sistem içerisinde son kullanıcılara ait verileri iletmekte kullanılan çerçevelerler data çerçevelerini; ortam üzerindeki erişimi yönetmek amacıyla kullanılan çerçeveler(RTS, CTS, ACK vb.) kontrol çerçevelerini; kablosuz sistemi yönetmek için kullanılan çerçeveler(beacon, probe vb.) yönetim çerçevelerini oluşturmaktaydı. Üçüncü ve dördüncü bitin aynı anda bir olması durumu rezerve durumdaydı. 802.11 çerçeve kontrol başlığında bulunan üçüncü ve dördüncü bitin haricinde 5-8 arası bitler de bir çerçevenin alt tipini belirtmekteydi.(Şekil 4)



Şekil 4. Çerçeve Kontrol Başlığı

Alt tipinin aldığı değer 0x4 olan bir yönetim (management) çerçevesi, bir probe isteği anlamına gelmekteydi. Alt tipinin aldığı değer 0xD olan bir kontrol çerçevesi, bir ACK çerçevesini belirtmekteydi. 802.11 de rezerve durumda bulunan 0x3 çerçeve tipleri, önceleri mesh trafiği için kullanılmak istense

de 802.11s in önceki standartlarla uyum halinde çalışabilmesi için bu fikirden vazgeçildi. Yeni çerçeveler, var olan çerçeve tiplerinin alt tiplerine atandı. İki mesh noktası arasında veri transferinin gerçekleştiğini belirten mesh data çerçevesi; data çerçeve tipinin (0x2) içerisine atandı. Mesh'e özgü rota yönetim çerçeveleri(PREP, PREQ); yönetim çerçeve tiplerinin (0x0) daha önce rezerve durumda bulunan 0xF alt tipine atandı ve adına Multihop Action Frame adı verildi.

802.11s protokolü ile yeni anlamlar kazanan diğer bir kısım ise yine Çerçeve Kontrol başlığı içerisinde yer alan ToDS ve FromDS bitleridir(sıra ile 9 ve 10. sıradaki bitler). Merkezi bir erişim noktasının olmadığı ad-hoc topolojilerde bu bitler 0 değerini almaktaydı. 802.11 ağlarında bu bitler aynı WLAN içerisinde bulunan iki ayrı erişim noktasına bağlı iki uç arasındaki trafiği yönetmek için kullanılmaktaydı. 802.11s öncesi kablosuz ağlarda bu bitler sayesinde veriler üçüncü katmana çıkmadan hedefe iletilmekteydi.[3] Bu iletim esnasında kullanılan 4 MAC adresli iletim şemasında adresler aşağıdaki noktaları belirtmektedir.

- Kaynak Adresi: Çerçeveyi oluşturan kaynağın mac adresini belirtmektedir.
- Hedef Adresi: Çerçevenin ulaşacağı hedef noktanın mac adresini belirtmektedir.
- İletici Adresi: Veriyi ileten noktanın mac adresini belirtmektedir. Bu adres kaynak adres ile aynı olabileceği gibi kablosuz ortam içerisinde veriyi hedefe aktaran erişim noktasının adresi de olabilmektedir
- Alıcı Adresi: Veriyi alacak noktanın mac adresini belirtir. Hedef adres ile aynı olabileceği gibi verinin hedefe ulaştırmak için başka bir noktadan veriyi alan bir erişim noktasının mac adresini de belirtebilir.

FromDS ve ToDS bitleri 802.11s protokolü ile birlikte bir mesh bulutu içerisinde aktarılan çerçevelerde daima 1 değerine kurulmuş durumdadır. 802.11s protokolü ile

mesh ağları yeni bir kabiliyet kazanmışlardır. Bu yenilik mesh ağlarının üst katmanlardan şeffaf olarak çalışması özelliğidir. 802.11s protokolü ile birlikte kablosuz dağıtım sistemleri, mesh haricinde bulunan iki ayrı nokta arası veri iletimini gerçekleştirebilir konuma gelmiştir. Bu noktada devreye 802.11s çerçevesi mesh başlığı içerisinde bulunan iki bitlik Address Extension bayrakları devreye girmektedir.(Şekil 5) Mesh kontrol başlığı içerisindeki mesh bayrakları(flags) oktetinde bulunan Address Extension bitlerinin kurulması ile birlikte çerçeve yapısında bulunan mac adres sayısı 6 ya çıkabilmektedir. (Şekil 6) Bu ek tanımlama ile gelen adresler ise verinin iletişim boyunca uçtan uca taşındığı hedef ve kaynak adresleridir. Bu durumda mesh ağı içerisinde oluşan adreslenme yapısını inceleyecek olursak: 1 numaralı adres, bir sonraki mesh noktasının adresi; 2 numaralı adres, adresi aktaran mesh noktasının adresi; 3 numaralı adres, mesh bulutunun başlangıcındaki mesh noktasının adresi (çerçevenin mesh ağına girdiği noktanın adresi); 4 numaralı adres, mesh bulutunun sonundaki mesh noktasının adresi (çerçevenin meshten çıkacağı adres); 5 numaralı adres, verinin asıl kaynağının adresi; 6 numaralı adres ise varının asıl hedefinin adresini belirtir.[4]

802.11s protokolü çerçevesi mesh kontrol başlığı içerisinde, mesh bayrakları alanı haricinde 8 bitlik Mesh Time-to-Live (TTL) kısmı eklenmiştir. Bu alanın amacı tıpkı üçüncü katman başlığında bulunan gözdesi gibi bir çerçevenin sonsuz döngüye girmesini engellemektir. Bu kısım oluşabilecek döngülerin ağ üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır.

Mesh Flags	Mesh Time To Live (TTL)	Mesh Sequence Number	Mesh Address Extension (present in some configurations)
Octets: 1	1	4	0, 6, 12, or 18

Şekil 5. Mesh Kontrol Başlığı

B0	B1	B2	B3	B4	B7
Address Extension (AE) Mode	Power Save Level	Receiver Service Period Initiation (RSPi)	Reserved		
Bits: 2	1	1	4		

Şekil 6. Mesh Bayrakları

## 5. 802.11s Rota Seçimi (Path Selection)

Şüphesiz IEEE 802.11s protokolü ile gelen en büyük özellik mesh içerisinde ikinci katman MAC adreslerine bakılarak yönlendirmenin yapılabilmesidir. Bu noktada yapılan işlemin üçüncü katmanda yapılan yönlendirme (routing) işlemi ile karıştırılmaması için MAC adreslerine göre yapılan yönlendirmelere yol seçimi (path selection) adı verilmektedir. Path selection işleminde kullanılacak protokol mesh komşuluğunun kurulumu esnasında gönderilen beacon ve probe çerçeveleri içerisindeki Mesh Configuration Element başlığında belirtilir. Mesh Configuration Element içerisinde bulunan 4 baytlık Active Path Selection Protocol Identifier kısmında mesh içerisinde kullanılacak yol seçim protokolü eş noktaya aktarılır. 802.11s protokolünde zorunlu olarak desteklenen yol seçimi protokolü Hybrid Wireless Mesh Protocol'üdür.(HWMP) Bu protokolün haricinde başka protokoller de kullanılabilir gibi kurumlara özel yol seçimi algoritmaları da 802.11s protokolü ile birlikte kullanılabilir.

HWMP; reaktif (reactive) ve proaktif (proactive) olmak üzere iki ayrı kısımdan oluşmaktadır. Reaktif kısım Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) protokolünün ikinci katman adreslerine uyarlanmasıyla oluşan Radio Aware Metric - Ad Hoc On Demand Distance Vector (RM-AODV) protokolünden oluşmaktadır.[5] Proaktif kısım ise ağaç yapıları baz alınarak yapılan yönlendirme işlemleri esasına dayanmaktadır. Bu işlem; mesh içerisinde atanmış ya da otonom olarak seçilmiş bir root noktasının ağa gönderdiği çerçeveler vasıtası ile gerçekleştirilir. HWMP protokolü reaktif yol seçimi, iki nokta arası

rotanın ihtiyaç duyulduğunda hesaplanması esasına dayanır. Bu durum, ilk etapta iki nokta arası iletişimde bir miktar gecikmeye neden olsa da ağ hakkında en güncel rotanın hesaplanıp kullanılmasına imkân sağlar. Kablosuz ortam kablolu ortama göre daha değişken bir yapıdadır. Bu yüzden bir rotanın güncelliği ve verimliliği büyük önem arz etmektedir. Bir mesh noktası nerede olduğunu bilmediği hedef mesh noktasına ulaşmak için ortama broadcast olarak yol isteği(path request/PREQ) mesajı yollar. Bu mesaj mesh ağı içerisinde yayılarak hedef noktaya ulaşır ve kaynak ile hedef arasındaki geri yol (reverse path) oluşturulmuş olur. PREQ isteğini alan hedef mesh noktası bu isteğe unicast olarak yol cevabı (path reply/PREP) yollayarak cevap verir. Böylece kaynak ile hedef arasındaki ileri yol (forward path) oluşturulmuş olur.[6] Bu işlemler sonrası oluşan en iyi rota üzerinden veri aktarımı gerçekleştirilir. Bu işlem HWMP'nin reaktif kısmını oluşturmuş olur. Bu işlemi ayrıntılı olarak inceleyecek olursak:

### HWMP Reaktif Yol Seçimi

Bir mesh ağında bulunan A noktası, mesh içerisinde bulunan bir B noktasına veri göndermek istediğinde öncelikle kendi yönlendirme tablosuna bakarak B noktasına ait herhangi bir rotanın var olup olmadığını kontrol eder. Eğer hedefe ait bir satır tabloda yok ise hedefe doğru bir path keşfi başlatır. Bu keşif PREQ çerçevesinin ortama yollanmasıyla başlar.(Şekil 7) PREQ çerçevesinde bulunan "PREQ ID" ve "Originator Mac Address" kısmı bir isteği belirleyen iki ana unsurdur. PREQ ID, aynı mesh noktası tarafından gönderilen birden fazla PREQ isteği olması durumunda çerçevelerin birbirinden ayırt edilebilmesini sağlar. Yine PREQ çerçevesinde bulunan 4 baytlık "originator sequence number" kısmı sayesinde gönderilen çerçevenin güncel olup olmadığı kontrol edilir. Bir PREQ çerçevesi içerisinde birden fazla hedefe yönelik sorgu ortama aktarılabilir. Çerçeve içerisinde bulunan "target count N" kısmında

belirtilen değer ile PREQ ile sorgulanacak hedef adres adedi belirtilir. Bu kısımda belirtilen adet sayısında adres, çerçevenin hedefe ait bilgiler kısmında belirtilir. Hedefe ait bilgiler kısmında bulunan “per target flags” kısmında spesifik bir hedefe ait sorgu sırasında kullanılan bayraklar bulunur. Bu kısmın hedefin mac adresi ve sequence numarası bilgisi takip eder.

Element ID	Length	Flags	Hop-count	Time to Live	PREQ ID	Originator mesh STA Address	Originator HWMP Sequence Number	Originator Proxied Address	Lifetime
Octets:1	1	1	1	1	4	6	4	0 or 6	4

Metric	Target Count	Per Target Flags #1	Target Address #1	Target HWMP Sequence Number #1	...	Per Target Flags #N	Target Address #N	Target Sequence Number #N
4	1	1	6	4	...	1	6	4

Şekil 7. PREQ Çerçevesi

Bir kaynaktan çıkan bazı sorgulara, hedefe varmadan, mesh içerisinde bulunan diğer mesh noktaları tarafından cevap verilebilme imkânı vardır. Bunun için “per target flags” kısmında bulunan Target Only(TO) ve Reply and Forward(RF) bitleri kullanılır. (Şekil 8) TO bitinin 1 olması durumunda yapılan sorguya sadece hedef mesh noktası cevap verebilmektedir. TO bitinin 0 olması durumunda ise sorguya ortamda bulunan mesh noktaları cevap verebilmektedirler. RF biti ise bir sorgunun mesh ağı içerisindeki yayılımını kontrol eder. RF bitinin 0 değerini alması durumunda ortamda bulunan mesh noktaları sorguya cevap verir ve o sorgunun mesh ağına yayılması sona erer. Eğer RF biti 1 değerine kurulmuşsa ortamda bulunan mesh noktası bir sorguya cevap verse bile sorgunun ortamda yayılımını devam ettirir. RF ve TO bitlerinin 1 olması durumu hedefe ait rotanın bir an önce öğrenilip iki nokta arası iletişimin başlamasına ihtiyaç duyulduğu, bunun yanı sıra ise hedefe giden en iyi rotanın öğrenilmek istenildiği durumlarda kullanılır.

B0	B1	B2	B3 B5	B6	B7
Portal Role	Addressing Mode	Proactive PREP	Reserved	AE	Reserved
Bits: 1	1	1	3	1	1

Şekil 8. PREQ Hedefe Özel Bayraklar

PREQ isteklerinin mesh içerisinde aktarımı yapılırken, mesh noktaları çerçevenin TTL değerini 1 düşürüp, Hop count derecesini 1 artırırlar ve bir önceki mesh noktası ile kendisi arasındaki metriği çerçevenin metrik değerine eklerler. İsteği alan mesh noktasında isteğinin kaynağı olan mesh noktasına giden bir rota bulunmaması durumunda PREQ içerisindeki bilgilere bakılarak yönlendirme tablosuna yeni bir satır eklenir. Eğer daha önce isteğin kaynağına giden bir satır yönlendirme tablosunda bulunuyorsa PREQ içerisindeki bilgilere bakılarak güncellenmesi gereken bilgiler varsa güncellenir.[4] Eğer gelen çerçevenin içerisinde bulunan sıra numarası (sequence number) değeri var olan değerden daha güncel ise yönlendirme tablosu içerisindeki satır güncellenir, değilse çöpe atılır. PREQ paketinin içerisinde bulunan sıra numarası değeri ile kendi tablosunda bulunan değerin aynı olması durumunda ise çerçevenin metrik değerine bakılır. Eğer yeni alınan PREQ kaynağa giden daha iyi bir metrik değeri içeriyorsa yönlendirme tablosu güncellenir. Bu şekilde yayılmaya devam eden PREQ çerçeveleri hedefe ulaştığında hedeften kaynağa bir PREP cevabı gönderilir. PREQ çerçevesi birden fazla hedef için sorgu içeriyorsa tamamlanan sorgu paketin içerisinde çıkarılır ve diğer sorguların mesh ağı içerisinde yayılmasına devam edilir. PREQ çerçeveleri ile alınan bilginin yönlendirme tabloları içerisinde sonsuza dek tutulmaz ancak belli bir süre için tutulur. Bu süre PREQ çerçevesi içerisindeki 4 baytlık “lifetime” alanında belirtilir.[4]

Bir PREQ isteğinin hedefe ulaşması sonrasında, hedeften kaynağa PREP gönderileceğinden bahsetmiştik. (Şekil 9) PREP çerçeveleri ister hedef tarafından ister ağ içerisindeki mesh noktaları tarafından gönderilsin kaynağa unicast olarak iletilir. Hedef noktasına aynı sorguyu içeren birden fazla PREQ gelebilir. Burada izlenen yol

yukarıda belirtilen ile aynıdır. Yani gelen paketin daha güncel ve daha iyi metrik bilgisi içermesi durumunda kaynağa yeni bir PREP gönderilir. PREP çerçevesini alan ağdaki mesh noktaları, tıpkı PREQ isteklerinde olduğu gibi, hedeften gelen bilgileri doğrultusunda yönlendirme tablolarını güncelleyerekten çerçeveyi bir sonraki noktaya aktarırlar. Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise gerektiğinde hedef mesh noktasının vekilliğini yaptığı(proxy) son kullanıcıya ait adres bilgisinin PREP cevabı içerisindeki hedefte vekilliği yapılan adres (target proxied address) kısmında belirtildiğidir.

ID	Length	Flags	Hopcount	Time to Live	Target mesh STA Address	Target HWMP Sequence Number	Target Posted Address	Lifetime
Octets: 1	1	1	1	1	6	4	0 or 6	4

Metric	Originator mesh STA Address	Originator HWMP Sequence Number
4	6	4

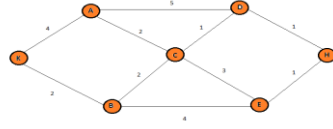
Şekil 9. PREP Çerçevesi

PREQ ve PREP çerçevelerinin dışında kullanılan bir diğer yönlendirme elemanı yol hata (Path Error/PERR) çerçevesidir.(Şekil 10) PERR bir mesh noktasının komşularından biri ile mesh komşuluğunun kaybolması durumunda gönderilir. PERR ile bozulan link üzerinden yönlendirilmesi yapılmış bütün rotalar için, o rotaları kullanan mesh noktalarına grup olarak ya da tek tek PERR çerçevesi gönderilir. PERR bilgisini alan komşular öncelikle kaybolduğu belirtilen hedefler için bir sonraki hop(sıçrama) noktasının PERR çerçevesinin alındığı nokta olup olmadığını kontrol ederler. Eğer öyleyse bahsi geçen satır iletim tablosundan silinir.

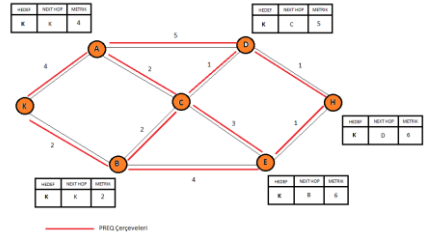
ID	Length	Mode Flags	Number of Destinations N	Destination Address #1	HWMP Sequence Number #1
Octets: 1	1	1	1	6	4

Şekil 10. PERR Çerçevesi

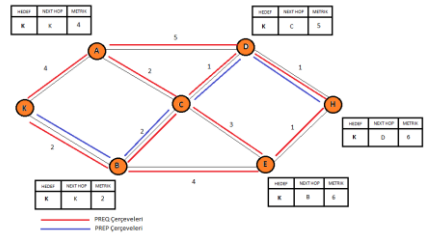
Aşağıdaki şekillerde PREQ ve PREP çerçevelerinin kullanımı ile kaynak(K) ve hedef(H) noktaları arası reaktif olarak en iyi rotanın bulunması gösterilmiştir.



Şekil 11. Örnek bir mesh Ağı



Şekil 12. PREQ Çerçeveleri ve oluşan yönlendirme tabloları



Şekil 13. PREQ isteğine cevap olarak gönderilen PREP çerçeveleri

### HWMP Proaktif Yol Seçimi

Hybrid Wireless Mesh Protocol'ün proaktif kısmı bir ağaç-tabanlı yönlendirme algoritmasından oluşur. Proaktif kısım PREQ ya da RANN(Root Announcement) çerçevelerinin bir root tarafından periyodik olarak mesh ağına gönderilmesi esasına dayanır. İlk yöntemde daha önce reaktif kısımda bahsettiğimiz PREQ paketi bir root tarafından periyodik olarak ortama gönderilir.

Bu paketi alan diğer mesh noktaları root düğümüne, reaktif yöntemde kullanılan esaslara dayanarak, PREP paketleri yollarlar ve böylece ağaç oluşturulmuş olur. Root mesh noktası tarafından gönderilen PREQ çerçevesi içerisindeki “proactive PREP” biti, 1 değeri ile gönderilirse bu çerçeveyi alan mesh noktası zorunlu olarak root düğümüne PREP çerçevesi gönderir. Eğer bu bit 0 değeri ile gönderilirse alıcı mesh noktası PREP çerçevesini göndermek zorunda değildir.[7]

Diğer yöntemde ise root yine periyodik olarak mesh ağına RANN çerçeveleri yollar. (Şekil 11) RANN çerçevesinin yollanmasındaki amaç iki yönlü olarak root ve diğer mesh noktaları arasında bir rota oluşturmaktır. Root mesh noktası RANN çerçevelerini belirli aralıklarla ağa göndererekten mesh noktalarına giden rotalar ve metrikleri öğrenir. RANN anonsunu alan mesh noktası RANN çerçevesini aldığı mesh noktası üzerinden root noktasına belirli bir periyotta en az bir kere PREQ mesajı göndermek zorundadır. PREQ isteklerini alan root mesh noktası diğer mesh noktalarına PREP çerçevesi gönderir. Bu süreçte izlenen prosedür reaktif yöntemde izlenen ile aynıdır. RANN çerçevelerinin bir diğer özelliği de iki nokta arasında mesh komşuluğu kurulurken kullanılan beacon çerçeveleri içerisinde de gönderilebilmesidir.

Element ID	Length	Flags	Hopcount	Time to Live	Root mesh STA Address	HWMP Sequence Number	Metric
Octets: 1	1	1	1	1	6	4	4

Şekil 14. RANN Çerçevesi

HWMP protokolünde PREQ, PREP, RANN çerçevelerinin haricinde kullanılan bir diğer bildirim elemanı (information element) ise portal anonsudur. (portal announcement /PANN) (Şekil 12) PANN çerçevesinin kullanılmasının amacı ortamdaki MPP’lerin varlığının ağa bildirilmesidir. Böylelikle mesh içerisindeki noktalar mesh dışındaki noktalar ile iletişime geçmek istediklerinde

kullanacakları MPP’ye giden rotayı öğrenmiş olurlar. MPP her bir PANN çerçevesi gönderdiğinde çerçevenin içindeki “PANN Sequence Number” değerini bir artırır. Böylelikle PANN anonslarının güncelliği sağlanmış olur. PANN anonslarını alan mesh noktaları çerçevenin içerisindeki TTL değeri 1 den büyük olduğu sürece ve sequence number değeri eski olmadığı takdirde PANN bilgisini yaymaya devam eder. Bir mesh ağında root MP ile MPP aynı mesh noktası olabildiği gibi farklı mesh noktaları da olabilmektedirler. Fakat tavsiye edilen iki MPP ile root mesh noktasının aynı mesh noktası olmasıdır. Bir mesh ağında bir adet root MP ve MPP olabileceği gibi birden fazla sayıda da olabilirler. Bu noktada oluşan iki ayrı ağaç yapısı birbirinden bağımsız olarak çalışabilmektedir. Mesh noktaları root MP ya da MPP’nin mac adreslerine bakarakta gereken ayrımı yapabilirler.

IEEE 802.11s mesh ağlarında bir çerçevenin yönlendirilmesi işlemini yukarıda belirtilmiştir. Ağ içerisindeki bir nokta, hedefi mesh ağı içerisinde bulamazsa, hedefin mesh dışında olduğunu düşünerek çerçeveyi MPP’ye yollar. Eğer ortamda bir MPP yoksa çerçeveyi çöpe atar. MPP’ler mesh içerisinde bulunan noktaların ve bu noktalarca vekil işlemine tabi tutulan noktaların varlığını kendilerine gönderilen yol seçim elemanlarınca öğrenirler. Mesh içerisinde olup ta varlığını bilmediği adresler içinse sorgular gönderirler. MAP’lere bağlı standart 802.11 kullanıcıların adresleri, MAP’ler tarafından bir vekil tablosunda tutulur. Gerektiğinde bu kullanıcıların adresleri yönlendirme/sorgu paketlerinin içerisinde mesh içerisindeki diğer noktalara aktarılırlar.[4]

Element ID	Length	Flags	Hopcount	Time to Live	Mesh Portal Address	PANN Sequence Number
Octets: 1	1	1	1	1	6	4

Şekil 15. PANN Çerçevesi



HWMP protokolü trafik yoğunluğunun sıklıkla değişebildiği hata oluşum oranının kablolu ortama göre daha çok olduğu kablosuz ortamda, verileri kablosuz bağlantılar üzerinden en etkili biçimde aktarmak için tasarlanmıştır. Protokolün isminde de yer alan hibrit doğası gereği aynı anda iki türden yönlendirme algoritmalarını desteklemektedir. Proaktif ve reaktif kısım ayrı ayrı kullanılabilceği gibi aynı anda da kullanılabilir. İki türden algoritmalarında kullanıldığı durumlarda; hedef ve kaynak arası rota bilinmiyorsa; başlangıçta proaktif kısım devreye girerekten iletişimin başlamasını sağlarken eş zamanlı olarak çalışan reaktif kısım ise hedefe giden en iyi yolun bulunmasına imkan sağlamaktadır.[4] Bu şekilde çalışan bir ağda portal/root mesh noktalarına binen yük optimize edilmektedir.

Bir nokta unutulmamalıdır ki hiçbir yönlendirme protokolü bir ağın bütün performans gereksinimlerini karşılayamaz. Bu yüzden IEEE 802.11s protokolü diğer yönlendirme protokollerinin de tanıtılıp çalışmasına imkân sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu noktada HWMP protokolünün zorunlu tutulmasının nedeni bütün marka cihazların ortak bir şekilde çalışabilmesine imkân sağlamaktır.

## 6. Airtime Link Metrik

IEEE 802.11s tarafından zorunlu olarak tanımlanan yol seçimi (path selection) metriği Airtime Link Metric'tir. Bu metrik çerçevenin bir hat üzerinden gönderilirken hat üzerinde tüketilen kanal kaynaklarının yaklaşık miktarını belirtmektedir. Airtime metriğinin hesaplanırken kullanılan formül Şekil 13'te gösterilmektedir. Bu formülde yer alan  $O$  kanal erişim yükünü belirten bir sabittir.  $B_t$  hat üzerinde test amaçlı gönderilen frame boyutunu belirtir. " $r$ " ve " $e_f$ " değerleri sıra ile Mb/s cinsinden iletilen veri boyutu ve frame hata oranını belirtmektedir. 802.11s protokolünde airtime

haricinde de metrik tanımlanabilmektedir fakat airtime zorunlu tutulmaktadır.

$$c_a = \left[ O + \frac{B_t}{r} \right] \frac{1}{1 - e_f}$$

Şekil 16. Airtime Link Metrik [4]

## 7. Sonuç

Kablolama alt yapısı zorunluluğunu azaltan 802.11s, mesh ağlara bir standart getirmekte olduğundan daha yaygın kullanımına olanak sağlayacaktır. Tasarlanan protokol dahilinde bilgisayarlar bile ağda erişim noktası olarak kullanılabilir. Bu sayede İnternet erişimi kapsama alanlarında yakın gelecekte kayda değer değişimler gözlemlenecektir. Özellikle Open80211s konsorsyumu çalışmaları gelecek için bir hayli heyecan verici gözükmektedir.

Bunların yanı sıra mesh ağlarda güvenlik konusu da, üzerinde ciddi şekilde durulması gereken bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

## Kaynaklar

- [1] Mesh Dynamics Patented Third Generation Wireless Mesh Technology, Mesh Dynamics Inc., <http://www.meshdynamics.com/mesh-network-technology.html>
- [2] S. Seth, A. Gankotiya, A. Jindal; A Comperative Study between Wireless Local Area Networks and Wireless Mesh Networks in 2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications March 2010
- [3] D.P.Agraval, B.Xie; Encyclopedia On Ad Hoc And Ubiquitous Computing Theory and Design of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Mesh Networks. Chapter 19 p 17
- [4] IEEE P802.11s™/D3.0 Draft STANDARD for Information Technology-

Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 10: Mesh Networking. March 2009

[5] K. Yang, J. Ma, Z. Miao; Hybrid Routing Protocol for Wireless Mesh Network December 2009

[6] M. Bahr; Proposed Routing for IEEE 802.11s WLAN Mesh Networks October 2006

[7] M. Bahr; Update on the Hybrid Wireless Mesh Protocol of IEEE 802.11s October

