

# Kablosuz Örgü Ağlarda Verimlilik Analizi ve Çözüm Önerileri

Ramazan KOCAOĞLU<sup>1</sup>, M. Ali AKCAYOL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye  
ramazankocaoglu@gazi.edu.tr, akcayol@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 16.08.2011, Kabul/Accepted: 24.10.2011)

**Özet**— Veri aktarımı için kablosuz ortamların kullanılması sonucunda, bilgisayar ağlarının kullanım amaçları ve kullanım alanları değişmiştir. Bu nedenle, kablosuz örgü ağlar gelecek nesil kablosuz ağ teknolojisi olarak ortaya çıkmıştır. Kablosuz örgü ağlar, afet kurtarma işlemleri ve askeri bölgeler gibi birçok alanda kullanılır. Bunun dışında, kablosuz yerel alan ağlarının kapsama alanını genişletmek ve bağlantı kopmalarından etkilenmeden yüksek hızda internet erişimi sağlamak için kablosuz örgü teknolojilerinden yararlanılacaktır. Ancak, kablosuz örgü ağlarının yaygın kullanılması için çözülmesi gereken bazı sorunlar mevcuttur. Bu çalışmada, kablosuz örgü ağlardaki verimlilik sorunları ve bu sorunların çözümüne yönelik yapılan araştırmalar detaylı bir şekilde incelenmiş ve sonuçları sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler**— Kablosuz örgü ağlar, kanal atama sorunu, çoklu sıçrama

## Performance Analysis and Solutions for Wireless Mesh Networks

**Abstract**— As a result of the use of wireless media for data transfer, the objectives of using and application areas of computer networks have changed. Therefore, wireless mesh networks are emerged as next generation wireless technology. Wireless mesh networks uses in many areas such as disaster recovery operations and military. Additionally, wireless mesh technology will be utilized to extend coverage of wireless local area networks and provide broadband internet access without sense disconnection. However, there are some problems to be solved for the widely using of wireless mesh networks. In this paper, solutions and performance problems of wireless mesh networks are investigated in details and results of studies have been given.

**Keywords**— Wireless mesh networks, channel assignment issues, multi-hop

### 1. GİRİŞ

Kablosuz iletişimin evlerde, ofislerde, üniversitelerde, endüstriyel ve ticari kuruluşlarda kendine kullanım alanı bulmasıyla beraber bir çok kablosuz ağ teknolojilerinden faydalanma imkanı doğmuştur [1]. Bununla beraber, internet ve ağ teknolojilerinde yaşanan gelişmeler sonucunda günümüzde kablosuz bir ağdan beklenen yeterlilikler geleneksel kablosuz ağlar ile karşılanamayacak duruma gelmiştir. Günümüzde kablosuz ağlar, afet kurtarma işlemlerinden askeri bölgelerde verinin toplanıp iletilmesine kadar birçok alanda kendine kullanım alanı bulmuştur. Ağ teknolojilerinde yaşanan bu gelişmeler sonucunda kablosuz örgü ağlar (KÖA) yeni bir ağ teknolojisi olarak ortaya çıkmıştır.

Normal kablosuz ağlar ile karşılaştırıldığında kablosuz örgü ağlar; anlık alt yapısını oluşturabilme, kendi kendini

ayarlayabilme, geniş bantlı erişim sunma, geniş kapsama alanı içinde farklı noktalardaki verileri tek merkezde düşük maliyet ile toplayabilme gibi avantajlarından dolayı, çekici bir kablosuz yerel alan ağı çözümüdür [2]. Ayrıca, kablosuz erişim noktalarının kapsama alanlarını genişletmek için kablosuz örgü ağlar düşük maliyetli çözümler sağlayabilir [3].

Kablosuz örgü ağlar, hareketli öz organizeli ağların (MANET) bir türevi olarak ortaya çıkmıştır. MANET'in sağladığı tüm avantajları sağlar. Kablosuz örgü ağlar, örgü yönlendiricisi ve örgü istemciden oluşur. Her bir düğüm hem istemci hem de yönlendirici olabilir ve kendi kapsama alanında olmayan bir düğüme paketini gönderebilir. Kablosuz ağ arabirim kartına sahip dizüstü bilgisayarlar, cep bilgisayarları, PDA'lar kablosuz örgü yönlendiricisine doğrudan bağlanabilir. Kablosuz ağ arabirime sahip olmayan kullanıcılar kablolu ağ kartlarını kullanarak örgü yönlendirici vasıtası ile kablosuz örgü

ağa dahil olabilir. Bundan dolayı, kablosuz örgü ağlar kullanıcılarına herhangi bir yerde ve zamanda sürekli çevrim içi olabilmeye imkanı sağlar [4]. Kablosuz örgü ağlar, hareketli öz organizeli ağlara oranla daha fazla kablosuz çoklu sıçrama teknolojisi sunar. KÖA birbirleri ile iletişime geçebilen, birbirlerinin paketini kendi üzerinden yönlendirebilen kablosuz düğümler kümesidir. MANET’lerde olduğu gibi her bir düğüm hem istemci hem de yönlendirici olabilir [5].

Kablosuz örgü ağı mimarisi ağın içerisinde bulunan düğümlerin işlevselliğine göre; omurga örgü ağı, istemci örgü ağı ve melez örgü ağı olarak üç gruba ayrılır [4]. Omurga örgü ağı, farklı ağ teknolojilerinin ve kablosuz örgü ağı içerisinde bulunan örgü istemcilerinin birbirleri ile iletişime geçebilmesi için alt yapı sunar. Kablosuz omurga örgü ağı içerisinde sadece örgü yönlendiricileri bulunmaktadır ve bu yönlendiriciler IEEE 802.11’de kullanılan bir çok radyo teknolojisi ile donatılmıştır. Omurga örgü ağı içerisinde bulunan örgü yönlendiricilerin sahip olduğu anten, kablosuz ağ arayüz kartı gibi donanımsal parçaların miktarı örgü istemcilerde bulunanlardan fazladır [4].

Örgü istemci ağında, istemciler kendi aralarında noktadan noktaya bağlantı kurdukları için arada bir yönlendirici olmasına gerek yoktur. Genelde tek bir radyo ve tek bir anten ile donatılmıştır. Hem istemci hem de yönlendirici görevi gördükleri için, öz organizeli ağ gibi işlev görür ve ağ mimarisi olarak benzerdir. Melez örgü ağı, yönlendirici örgü ağı ile istemci örgü ağının birleştirilmesi ile oluşturulan ağ yapısıdır. Melez yapıda, örgü istemciler doğrudan örgü yönlendiricisine bağlanabileceği gibi, başka bir örgü istemcisi üzerinden de ağa dahil olabilirler.

Kablosuz omurga ağlar, her zaman her yerde internet erişimi sağlayan kablosuz omurga oluşturan bir yapıdır. Kablosuz omurga ağlar hareketli öz organizeli ağların doğasında olan hareketlilik ve enerji tüketimi gibi sınırlılıkların üstesinden gelebilen, çok sıçramalı iletişim imkanı sunan yeni bir iletişim teknolojidir. Bunun yanı sıra, KÖA görüntü ve ses gibi çoklu ortam uygulamaları için yüksek kalitede hizmet sunabilme imkanı vardır [6]. Kablosuz örgü ağlar, sabit kablosuz yönlendiricilerden oluşan bir grup üzerinden çoklu sıçrama yönlendirmesini kullanarak erişim noktalarının kapsama alanını genişletmek için düşük maliyetli çözümler sunabilir. Bu ağlar için kullanılacak olan yönlendirme protokolü kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılayacak nitelikte olması gerekmektedir. Son yıllarda, görüntü ses gibi çoklu ortam uygulamaları hareketli kablosuz cihazlar içerisinde gittikçe popüler hale gelmeye başlamıştır [3].

Bir kablosuz örgü ağı uygulaması çok zor değildir. Çünkü gerekli olan tüm unsurlar öz organizeli ağlar için geliştirilen yönlendirme protokollerinde zaten mevcuttur [4]. Bununla birlikte, kablosuz örgü ağlar çok fazla yedek bağlantı imkanı sunduğu için en büyük sıkıntısı, mimari açıdan karışık bir yapıya sahip olmalarıdır. Ölçeklenebilirlik, güvenilirlik, sağlamlık ve veri

güvenliğini sağlayarak en iyi performansı elde etmek oldukça zordur.

KÖA’lar hızlı yayılım kapasitesi, kendi kendini ayarlayabilme ve düşük maliyet gibi avantajlarından dolayı son zamanlarda ön plana çıkmıştır. KÖA’ların kullanılabileceği uygulama alanlarını; halka açık yerler, şehir alan ağları, akıllı ulaşım sistemleri ve akıllı ev alanları oluşturur. KÖA’lar durağan örgü yönlendiricileri ve hareketli örgü istemcilerinden oluşur. Örgü yönlendiriciler ağın omurgasını oluşturarak örgü istemciler arasında iletişimi sağlar. Ayrıca, örgü yönlendiriciler kablolu ağlara bağlantıyı sağlar. Örgü istemciler hareketli oldukları için, genellikle örgü yönlendiricilerine oranla daha kısıtlı kaynaklara sahiptir [8].

Kablosuz örgü ağların üzerinde barındırdığı bu yeteneklerinden dolayı gelecek nesil kablosuz ağ teknolojileri için ortak bir kablosuz ağ alt yapısı oluşturabilir. Bu sayede tüm farklı ağ uygulamaları ve teknolojileri kablosuz örgü ağlar vasıtasıyla birbirlerine bağlanabilir ve iletişime geçebilir.

Akyıldız ve arkadaşları 2005 yılında yaptıkları “Wireless mesh networks: a survey” başlıklı çalışmada kablosuz örgü ağların temel karakteristik özelliklerini belirtmişlerdir [4].

- Çok sıçramalı kablosuz ağ teknolojisi sunar. KÖA’larda mevcut kanallar kullanılmadan o anki kablosuz ağın kapsama alanı daha az maliyet ile genişletilebilir. Ayrıca, merkezi kablosuz ağlardaki görüş hattı problemi sonucu yaşanan paket kayıplarını birden fazla düğüm üzerinden paketleri göndererek en aza indirebilir.
- Farklı birçok ağ teknolojisi ile birlikte çalışabilirken, aynı zamanda kendi aralarında bir alt yapı gereksinimi olmadan P2P bağlantı sağlar.
- Mevcut bulunan bir ağa hiç bir gereksinim olmadan sonradan ekleme ya da çıkartma yapılabilir.
- Enerji kısıtlaması gibi bir sorun KÖA’larda yoktur.
- Çok sayıda yedek bağlantı imkanı sunduğu için güvenilirlik seviyesi oldukça yüksektir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde, KÖA’larda mevcut bulunan verimlilik sorunları ve bu sorunların çözümüne yönelik yapılan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan tasarımlar, modellemeler, geliştirilen protokoller ilgili sorunlara göre kümelenecek sunulmuştur. Çalışmanın üçüncü bölümünde sonuçlar ve öneriler, dördüncü bölümünde de yararlanılan kaynaklar yer almaktadır.

## 2. KÖA VERİMLİLİK ANALİZİ VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

802.11 kablosuz yerel alan ağını temel alan kablosuz örgü ağı, son yıllarda aktif olarak araştırılmaktadır. Kablosuz yerel alan örgü ağların performansını arttırmak için bir kaç tane yeni iletişim protokolü son yıllarda geliştirilmiştir. Fakat bu çözümler genellikle belli bir

yapıya özgüdür ve KÖA'ların diğer ağ teknolojileriyle birlikte çalışmasını engeller. Bundan dolayı KÖA'lar için bir standart olması zorunlu hale gelmiştir. Bu gerekliliği gidermek için, 802.11 çalışma gruplarından biri olan 802.11s KÖA'lar için bir standart belirlemektedir. Bir kaç standart taslağı 802.11s tarafından sunulmasına rağmen, çözülmemiş sorunlar hala mevcuttur [9].

Wang ve Lim 2008 yılında yaptıkları "IEEE 802.11s wireless mesh networks: Framework and challenges", başlıklı çalışmada 802.11s mevcut standart taslağının detaylı analizini yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada 802.11s standardının neler kazandıracığı, halen mevcut bulunan sorunların neler olduğunu belirtmişlerdir [9].

Bu çalışmada, kablosuz örgü ağların çalışma performansını etkileyen etmenlerin çözümüne yönelik yapılan araştırmalar 7 başlık altında toplanmış ve her biri için literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir.

### 2.1. Soruna Uygun Metrik Geliştirmek

Kim ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları "Comparative analysis of link quality metrics and routing protocols for optimal route construction in wireless mesh networks" başlıklı çalışmada KÖA içerisinde sondan sona bağlantı performansını etkileyen çeşitli yönlendirme protokollerinin analizini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir [2]. OLSR ve AODV protokolünün zincir topolojisine benzer topolojilerde ETX ölçütünün kullanılması sonucunda en iyi olan rotayı seçemediği ve paket çarpışması gibi durumların oluşabildiğini göstermiştir [2]. Ayrıca, kablosuz bağlantı ölçütü ve yönlendirme protokolü tasarımının kablosuz örgü ağların performansına etkisini araştırmışlardır. Bilinen bağlantı metriklerinin (ETX ve ETT) sondan sona bağlantı performansına etkisini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir.

Zhao ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları "An efficient Neighbourhood Load Routing metric for Wireless Mesh Networks" başlıklı çalışmada kablosuz bağlantı ölçütlerinin kablosuz örgü ağların performansına etkisini incelemişlerdir [10]. KÖA içerisinde kullanılan mevcut yönlendirme protokollerinin performansını daha fazla arttırmak için yeni bir ölçüt sunmuşlardır. Yazarlara göre, bir düğümün iletim alanı içerisinde bulunan bölgedeki yükü göz önünde bulunduran bir ölçüt yoktur. Bu yüzden bu durumu göz önünde bulunduran NLR yönlendirme ölçütünü geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri ölçütün performansını literatürde mevcut olan sıçrama sayısı, ETX [45, 46], yük hesabı [47,48] ve SPP [49] ölçütlerini, hem düzenli hem de düzensiz şekilde dağıtılmış düğümlerden oluşan kablosuz örgü ağları için karşılaştırmışlardır. NLR ölçütünün ortalama ağ verimliliği ve ortalama paket teslim etme oranının diğer mevcut ölçütlere oranla daha başarılı olduğunu, sondan sona gecikme miktarı göz önünde bulundurulduğunda ise sıçrama sayısının daha başarılı olduğu sonucuna ulaşmışlardır [10].

### 2.2. Yapıya Özgü Yönlendirme Protokolü Geliştirmek

Jun ve Sichitiu 2008 yılında yaptıkları "MRP: Wireless mesh networks routing protocol" başlıklı çalışmada kablosuz örgü ağlar için bir yönlendirme protokolü geliştirmişlerdir [5]. Ağ ile ilgili olan ölçütleri hesaplamak için yeni bir metot ya da metrik sunmamışlardır. Yazarların sunduğu protokol olan MRP, rotaları bulmak için ağına tümüne paket yayılımı yapan ya da diğer protokollerin düzenlenip geliştirilmesi ile elde edilen bir protokol değildir. Tamamen yeni bir bağlantı durumu tespiti yapan protokoldür. MRP protokolünün isteği bağlı MRP, işaret gönderimine dayalı MRP ve melez MRP olmak üzere üç farklı türevini geliştirmişlerdir. MRP protokolünün performansını değerlendirmek için farklı sınıflar içerisinde bilinen yönlendirme protokolleri ve geliştirdikleri MRP türevleri ile kıyaslamışlardır. Benzetim yaparken oluşturulan trafiğin %75'ini http %5'ini ise ftp paketleri içermektedir. Trafik yüküne göre kıyaslama yapıldığında en az yönlendirme yükü getiren, en çok paket teslim etme oranını sağlayan, en az sondan sona gecikme ve en az ortalama geçilen düğüm sayısı değerlerini yakalayan protokol MRP-H olmuştur. Ağ boyutu, ağ içerisindeki hareketli düğüm sayısı, örgü ağı iç trafiği, internet trafiği gibi durumlara göre kıyaslama yapıldığında da benzer sonuçlar almışlardır.

Kablosuz örgü ağlar için geliştirilen yönlendirme protokolü, kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılayabilmek için veri transferini en üst seviyede tutması, kaynak ile hedef arasındaki gecikme süresini en az seviyeye indirmesi gerekmektedir. Bundan dolayı Pal ve Nasipuri yaptıkları çalışmada, rota seçimini yapabilmek için yeni bir metrik ortaya atmışlardır [3]. Sunulan yeni metrik ağ içerisindeki kontrol paketlerinden daha çok, gerçek paketlerin iletilmesinin hesaplanması esasına dayanır.

Pal ve Nasipuri, bu metriğe dayanan yeni bir yönlendirme protokolü olan IDAR'ı sunmuşlardır. Sunulan yönlendirme protokolü veri transferini ve gecikme süresini en uygun seviyede tutmak için aday yönü seçerken gerekli olan parametreleri toplamak için tepkili rota keşfini kullanır. Yazarlar, IDAR'ın iki türü olan IDAR-v1 ve IDAR-v2'nin performansını geleneksel tepkili yönlendirme protokolü olan AODV ve kalite tabanlı bir yönlendirme yaklaşımı olan MARIA [7] ile kıyaslamışlardır. Akış miktarına göre paket teslim etme oranını karşılaştırdıklarında IDAR-v2 ve MARIA'nın birbirlerine yakın sonuçlar aldığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, akış miktarına göre gecikme ve paket istikrarsızlığı kıyaslandığında IDAR-v2'nin diğerlerine oranla daha başarılı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, AODV protokolü ile IDAR-v2'yi akış miktarına göre; paket teslim etme oranı, gecikme ve paket istikrarsızlığı durumlarında karşılaştırmışlardır. IDAR-v2'nin AODV'ye oranla etkili sonuçlar aldığını sunmuşlardır. Bununla beraber, AODV protokolü ile IDAR-v2'yi veri hızına göre; paket teslim etme oranı, gecikme ve paket istikrarsızlığı durumlarında karşılaştırmışlardır. Bir önceki durumda olduğu gibi IDAR-v2'den daha verimli sonuçlar almışlardır [3].

Öz organizeli ağlar için kullanılan yönlendirme protokolleri üzerinde barındırdığı özelliklerinden dolayı, melez KÖA ve istemci KÖA içerisinde yönlendirme protokolü olarak kullanılabilir. Fakat bir melez KÖA içerisindeki örgü yönlendiricilerin karakteristik özelliği olan, birden fazla kablosuz arayüz bulundurma gerekliliği, öz organizeli ağ yönlendirme protokollerinin melez KÖA içerisinde kullanılma imkanını azaltmaktadır.

Pirzada ve arkadaşları 2008 yılında yaptıkları “Performance analysis of multi-radio AODV in hybrid wireless mesh networks” başlıklı çalışmada, bu sınırlılığı ortadan kaldırmak için, AODV protokolüne çoklu kablosuz arayüz ile yönlendirme yapabilme özelliği kazandırarak melez KÖA’lar için değerlendirmişlerdir. Yüksek oranda trafik yükü ve hareketlilik durumlarında etkili sonuçlar almışlardır [8]. Standart AODV, AODV-MR ve AODV-ST protokollerinin verimliliğini paket teslim etme oranı, protokol ek yükü, ortalama gecikme ve en iyi yol seçimi kriterlerine göre ölçmüşlerdir. Yaptıkları benzetim içerisinde dört farklı senaryo kullanmışlardır. İlk olarak, hareketli örgü istemcilerin hızlarını değiştirerek belirttikleri 4 kritere göre değerlendirmişlerdir. Düğümler hareketli değilken AODV-ST, 20 m/s hıza sahip iken AODV-MR daha fazla paket teslim etme oranı yakalamıştır. Aynı şartlar altında protokol ek yükü en az standart AODV’de olmuştur. Ortalama gecikme kriterinde ise AODV-ST ve AODV-MR birbirine yakın sonuçlar almışlardır. Bunun dışında, Trafik yükünü artırarak, paket büyüklüklerini artırarak, AODV ve AODV-MR protokollerini kıyaslamışlardır. AODV-MR’nin ek protokol yükü dışındaki diğer kriterlerde AODV’ye oranla daha verimli olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, kablosuz ağ arayüz kartı sayısını artırarak AODV-MR protokolünün verimliliğini 4 kritere göre ölçmüşlerdir. Arayüz sayısının artmasına doğru orantılı olarak protokolün verimliliği de artmıştır [8].

Pirzada ve arkadaşları 2009 yılında yaptıkları “SafeMesh: A wireless mesh network routing protocol for incident area communications” başlıklı çalışmada AODV protokolünün üzerinde değişiklikler yaparak SafeMesh isimli yeni bir protokol sunmuşlardır [11]. Standart AODV protokolüne; düğüm tipine göre yönlendirme yapabilme, çoklu bağlantı keşfi, kanal çeşidi ve yoğunluğunu göz önünde bulundurarak bağlantı seçimi, yerel bağlantı onarımı gibi özellikler eklemişlerdir. SafeMesh protokolünün performansını ölçmek için paket teslim etme oranı, protokol ek yükü ve ortalama gecikme durumlarını göz önünde bulundurarak genişletilmiş üç tane AODV protokolünü ve SafeMesh protokolünü 6 farklı senaryoya göre karşılaştırmışlardır.

Benzetim yaparken 1000×1000 metrelik bir alan içerisine düzenli olarak 5×5 metrede, sabit olan bir örgü yönlendiricisi ve benzetim alanı içerisinde rastgele hareket edebilen 50 tane örgü istemcisi yerleştirmişlerdir. İlk olarak örgü istemcilerin hızını 0 m/s’den 20 m/s’ye çıkartmışlardır ve ilgili protokollerin paket teslim etme oranını ölçmüşlerdir. 0 m/s’de AODV %77, AODV-ETT %84, AODV-WCETT %94 ve SafeMesh %100 başarı

sağlamıştır. Hız 20 m/s getirildiğinde AODV %46, AODV-ETT %36, AODV-WCETT %55 ve SafeMesh %78 başarı sağlamıştır. Ayrıca, protokol ek yükü ve ortalama gecikme durumlarını değerlendirmişlerdir. İkinci senaryoda, akış miktarını 10’dan 50’ye arttırmışlardır. Üç ayrı durumda da SafeMesh’in diğerlerine göre daha başarılı olduğunu göstermişlerdir. Bunun dışında, TCP bağlantı miktarı ve VoIP oturum sayısı miktarlarını artırarak test etmişlerdir. Örgü yönlendiricilerinin sayısını, üzerlerindeki radyo sayısını artırarak yine üç ayrı durumda kıyaslama yapmışlardır ve SafeMesh protokolünden diğerlerine oranla daha verimli sonuçlar almışlardır [11].

Kablosuz örgü ağlarda çoklu kanal kullanımı ile ağın toplam verimliliği artırılabilir. Bu yüzden, çoklu kanal kullanımı için geliştirilen birçok MAC protokolü literatürde mevcuttur. Kablosuz örgü ağlarda veri paketlerinin iletimi için ayrı bir kanal, yönlendirme ve ortam denetimi paketleri için ayrı bir kanallın atanması (DDC) ile çoklu kanal kullanımı durumunda oluşacak problemler azaltılabilir. Bununla beraber, ortak denetim kanalı toplam performansın dar boğaza girmesine neden olacaktır. Ayrıca, veri kanallarının seçiminin ağın toplam verimliliğine doğrudan etkisi vardır [12].

Jeng ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları “Release-time-based multi-channel MAC protocol for wireless mesh networks” başlıklı çalışmada, RTBM olarak adlandırdıkları çoklu kanal kullanımı için yeni bir MAC protokolü sunmuşlardır. Geliştirdikleri protokol ile DDC yaklaşımında veri kanalı seçme problemleri ve denetim kanalındaki tıkanıklık problemini çözmeyi amaçlamışlardır [12]. RTBM protokolünün 3 farklı türevini RTBM(CIP), RTBM(CIP+DDC), RTBM(CIP+DDC+ECS) geliştirerek, her bir bileşenin performansa ne oranda etki ettiğini değerlendirmişlerdir. RTBM türevlerini 802.11, DCA ve MCMAC yaklaşımlarıyla hem tek sıramalı hem de çok sıramalı durumlarda hem veri kanalı sayısını artırarak, hem de akış miktarını artırarak ağın toplam verimliliğini ölçmüşlerdir. RTBM türevlerinin diğerlerine oranla daha başarılı sonuçlar aldığını göstermişlerdir [12].

Galvez ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları “Responsive on-line gateway load-balancing for wireless mesh networks” başlıklı çalışmada, içerisinde birden fazla geçit yolu bulunan KÖA için çevrim içi yük dengelemeye yapabilen bir protokol sunmuşlardır. Trafik TCP protokolünün çalıştığı katmanda iken dengelemişlerdir. GWLB olarak adlandırdıkları yaklaşım, ağa fazladan herhangi bir yük getirilmeden ve o anki trafik durumunda bir aksaklık yaşatmadan geçit yolunun ayarlanması konusunda oldukça duyarlıdır. Yazarlar, GWLB protokolünün performansını değerlendirmek için benzetim kullanarak bazı mevcut yaklaşımlar ile kıyaslamışlardır. GWLB’nin diğerlerine oranla daha etkili olduğunu görmüşlerdir [13].

KÖA’lar için mevcut bulunan yönlendirme protokolleri genellikle kesin olmayan kablosuz bağlantıları göz önünde bulundurmadan sayısal bağlantı ölçümleri ile en

iyileme yapar. KÖA içerisinde sahte-belirleyici bir yönlendirme protokolü ile PHY ve MAC katmanında geçici kesin olmayan bağlantı durumları gibi tüm olası durumlar detaylıca incelenebilir [14].

Chen ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları “Probing-based anypath forwarding routing algorithms in wireless mesh networks” başlıklı çalışmada dinamik olarak bir sonraki seçilecek düğümün düşük maliyet ve en az iletim gecikmesi ile nasıl sağlanacağını araştırmışlardır. Durdurma teorisi denilen bir çözüm sunmuşlardır. Farklı ağ biçimleri altında ST ve SRCTP algoritmalarının etkinliğini doğrulamak için benzetim kullanmışlardır. EXOR ve HWMP protokolleri ile kıyasladıklarında sunulan yaklaşımın ağ verimliliği ve paket gönderim düzeni ölçütlerinde başarılı sonuçlar aldığı görülmüştür [14].

Kablosuz sistemlerde ve çoklu ortam uygulamalarında yaşanan gelişmeler sonucunda, KÖA’larda kullanılacak olan yönlendirme protokollerine yeni bir bakış açısıyla yaklaşılması gerekmektedir. Bu protokollerin hem QoS için en az gerekliliği hem de çoklu ortam uygulamaları için gerekli QoE desteği sağlaması gerekmektedir. Bu şartlarda, farklı tipte paketlerin yönlendirilmesi için sadece bir tane bağlantı kalite metriğinin kullanımı uygun QoS için yeterli değildir [15].

Gomes ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları “Using fuzzy link cost and dynamic choice of link quality metrics to achieve QoS and QoE in wireless mesh networks” başlıklı çalışmada KÖA yönlendirme protokolü olan OLSR üzerinde çoklu ortam uygulamalarının gerekliliklerini sağlayacak şekilde değişiklikler yaparak bir türevini OLSR-FLC sunmuşlardır. Metriklerin dinamik olarak seçimini yapabilmek amacıyla çoklu ortam paketleri iletilirken en iyi rotaları belirlemek için bulanık bağlantı maliyetini (FLC) temel almışlardır. Sunulan FLC metriği, yeni bir metrik tanımlamak için iki tane kalite metriğini (ETX, MD) kullanan bulanık bir sistemi esas alır. Sunulan metriğin performansını ölçmek için asıl OLSR ve OLSR’nin şu anki sürümlerini (OLSR-ETX, OLSR-MD, OLSR-DC), farklı QoS metriklerini kullanarak kıyaslamışlardır. Kullanıcılar tarafından alınan görüntü kalitesinin daha yüksek olduğunu göstermişlerdir [15].

Kablosuz örgü ağların tasarımında dikkate alınması gereken en temel şeylerden biri de iletişim için kullanılan yolların kullanılabilirliği ve güvenilirliğidir. Güvenilirlik, yayılım maliyeti ve ağ topolojisinin kararlılığı KÖA’lar için önemlidir. Yani, eklenen yedek ağ bileşenleri bir ağın güvenilirliğini artırırken bu durum büyük oranda maliyeti de artırır. Genellikle, ağ performansı ve güvenilirlik ayrı ayrı dikkate alınır [16].

Benyamina ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları “On the design of reliable wireless mesh network infrastructure with QoS constraints” başlıklı çalışmada güvenilir bir KÖA oluşturulması için ağdaki bozulmaları anlayabilen yeni bir algoritma sunmuşlardır. Ağ yayılım maliyeti, performans ve güvenilirlik arasındaki bu sıkıntıyı

aşabilmek için trafik yük dengelemesi ve maliyet açısından aynı anda en iyileme yapabilen bir model sunmuşlardır [16].

Amaldi ve arkadaşları 2008 yılında yaptıkları “Optimization models and methods for planning wireless mesh networks” başlıklı çalışmada kablosuz örgü ağ içinde bulunan kablosuz istemcilere tam bir kapsama alanı sağlarken, aynı anda kurulum maliyetini de en aza indirebilen bir kablosuz ağ tasarımı yapabilmek için yeni bir en iyileme modeli sunmuşlardır [17]. Yazarların sunduğu karmaşık sayılar ile lineer programlama modeli, örgü yönlendiricilerinin ve erişim noktalarının miktarını ve bulunması gereken yeri seçmeye imkan tanır. Gerçek ortamlardakine benzer oranlarda düğüm içeren KÖA kümesi için üç tane problemin en iyi çözümlerini sunmuşlardır. Ayrıca, ilgili ağdaki farklı parametrelerin her birinin etkilerini tartışmışlardır. Tasarlanan ağın kalitesini farklı trafik koşulları altında benzetim kullanarak değerlendirmişlerdir [17].

Kablosuz örgü ağlarda geniş yayın kullanımı, literatürde genel kabul gören önemli bir iletişimdir. Ağ içerisindeki her düğümün doğru ve eksiksiz şekilde bilgiye almasını sağlamak için güvenli bir geniş yayına ihtiyaç duyar. Güvenilir olmayan kablosuz bağlantıların olduğu KÖA’da güvenilir geniş yayın yapılmasındaki temel amaç, her düğümün geniş yayın ile gönderilen paketlerin tümünü doğru bir şekilde, en az gecikme ile alabilmesini sağlamaktır. Son yıllarda, ağ kodlama, bir kaynaktan çok hedefe doğru yapılan iletişimin etkinliğini sağlamak açısından ele alındığında öncü bir kodlama yaklaşımı olarak ortaya çıkmıştır [18].

Yang ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları “R-Code: Network coding-based reliable broadcast in wireless mesh networks” başlıklı çalışmada geniş yayın protokolünü temel alan bir ağ kodlama yaklaşımı ortaya atmışlardır. R-Code olarak adlandırdıkları yaklaşım ile %100 oranında paket teslim etme başarısı sağlarken, iletim ek yükünü ve geniş yayın gecikmesini önemli ölçüde azaltmışlardır [18].

KÖA’lar büyük ölçekli kablosuz internet erişimini sağlayabilecek uygun maliyetli çözümler sunan etkin bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. KÖA içerisinde hücreler arası geçiş yönetimi hareketli kullanıcılara etkili bir QoS hizmeti sunması açısından önemli bir role sahiptir. Bundan dolayı, KÖA’larda hücreler arası geçiş performansının analizi ağ mühendisleri ve araştırmacılarının dikkate alınması gereken bir durumdur [19].

Zhao ve Xie 2011 yılında yaptıkları “OPNET-based modeling and simulation study on handoffs in Internet-based infrastructure wireless mesh networks” başlıklı çalışmada KÖA alt yapısı ile internet erişimi sağlamak için gerekli olan hususları ve ağ topolojilerini içeren detaylı bir benzetim modeli sunmuşlardır. KÖA içinde belirli tasarım sıkıntılarını dikkate alarak iki tane hücreler arası geçiş tasarımını benzetim kullanarak modellemişlerdir. Uygulanan benzetim modeli, aynı ve

farklı ağlardaki geçit noktaları arasında etkili şekilde hücreler arası geçişin yapıldığını göstermiştir [19].

### 2.3. Parazitenmeyi Dikkate Almak

Birçok düğüm üzerinden sıçrayarak paketlerin taşınmasını sağlayan kablosuz örgü ağlar içerisindeki yönlendirme protokolleri, algoritmalar ve metrikler önemli rol oynar. Kablosuz örgü ağ içerisinde birçok düğüm aynı bandı paylaşır. Bundan dolayı bağlantı üzerinde parazit oluşabilir.

Borges ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları “The impact of interference-aware routing metrics on video streaming in Wireless Mesh Networks” başlıklı çalışmada parazitlerin ağın performansını önemli ölçüde etkilediğini söylemişlerdir. Bu yüzden parazitlenmeden haberdar olabilen yönlendirme metriklerini önermişlerdir. Kablosuz örgü ağlar çoklu ortam uygulamaları için yüksek kalitede hizmet sağlayabilme yeteneğine sahiptir. Video ve diğer çoklu ortam uygulamaları için bu yönlendirme metrikleri önemlidir. Bundan dolayı, parazitlenmeden haberdar olan yönlendirme metriklerinin video akış performansı üzerindeki etkisini gösterebilmek için diğer metrikler ile kıyaslamışlardır [6].

Benzetimde kullanılan her bir düğüm aynı fiziksel donanıma sahiptir. Her bir düğümün iki tane kanalı ve iki tane ağ arayüz kartı vardır. Elde edilen sonuçların daha doğru olmasını sağlamak için, farklı düğüm yerleşimleriyle senaryo 10 kez çalıştırılmıştır. Benzetimde ortalama 256 kb/s’de kararsız bit oranı ile görüntü aktarımına yoğunlaşmıştır. Yazarlar, benzetimde üç farklı senaryo oluşturmuşlardır. İlk olarak dış ortamlarda yönlendirme ölçütlerinin ağın performansına etkisini karşılaştırmışlardır. 5 farklı yönlendirme ölçütünü; düğümlerin kapsama alanına göre ortalama akış durumu, gecikme, paket istikrarsızlığı ve protokolün getirdiği ek yükü değerlendirmişlerdir. İkinci senaryoda, iç ortamlarda 5 farkı yönlendirme ölçütünü; kapsama alanına göre ilk senaryodakine benzer durumlar için değerlendirmişlerdir. Her iki senaryoda da MIND metriğinin diğer 4 yönlendirme metriğine oranla daha başarılı bulmuşlardır. Son senaryoda 5 tane yönlendirme ölçütünü artan trafik yükü altında, akış durumu, gecikme, paket istikrarsızlığı, protokol ek yükü gibi ölçütler ile karşılaştırmışlardır. MIND metriğinin trafik yükünün arttığı durumlarda diğer metriklerle oranla daha başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermişlerdir [6].

Genellikle kablosuz örgü ağlar, ağ kapasitesini arttırmak için birden fazla radyo arayüzü ile donatılan örgü yönlendiricilerinden oluşur. En az parazitlenme ile KÖA oluşturabilmek için en önemli etken, her bir radyo arayüzüne farklı bir kanal atamaktır. Kanal atamada işleminde bir örgü yönlendiricisi üzerinde bulunan bir arayüze atanabilecek farklı sayıda kanal kısıtlamasına uyulmalıdır [20].

Riggio ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları “Interference and traffic aware channel assignment in WiFi-based wireless mesh networks” başlıklı çalışmada

çok radyolu KÖA için parazitlenme ve ağ yoğunluğuna göre kanal atama (ITICA) yapmaya yönelik melez bir yaklaşım sunmuşlardır [20]. ITICA, yönlendirilen trafik sonucu oluşan ölçeklenebilme sorunları için geliştirilen bir yaklaşımdır. Sunulan çözüm hem benzetim yoluyla hem de gerçek ortamlarda sınanarak değerlendirilmiş ve geliştirdikleri yaklaşımı durağan rastgele kanal atama yaklaşımı BFS [21] ile kıyaslamışlardır. Parazitlenmenin etki ettiği zaman süresince ITICA yaklaşımının BFS’ye oranla yaklaşık %40 civarında daha verimli olduğu sonucuna ulaşmışlardır [20].

Caillouet ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları “Optimization Framework for optimizing the capacity of wireless mesh networks” başlıklı çalışmada internete erişim için kullanılan kablosuz örgü ağların iletim kapasitesi hesaplama problemlerini araştırmışlardır. Yönlendirme ve iletim yaklaşımları, istemcilere sunulan kapasitenin üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Verilen bir KÖA’ı içinde geçit yollarının yerleştirilmesi, yönlendirme ve düzenleme için genel bir sayısal lineer programlama tanımı sunmuşlardır. Yönlendirme sırasında QoS’un gerekliliklerini göz önünde bulunduran ve radyo parazitlenme sorunlarını içine alan yeni bir en iyileme metodu geliştirmişlerdir. Gerçek ortamlardaki büyüklükte KÖA’lar için etkin çözüm metotları geliştirmişlerdir [22].

### 2.4. Kanal Atama Problemleri

KÖA içerisinde bulunan örgü yönlendiriciler ve örgü istemciler birden fazla kanal üzerinden yayın yaparak paket gönderimi yapabileme yeteneğine sahiptir. KÖA’ları öz organizeli ağlardan ayıran en önemli fark budur. İletişim için çoklu kanal kullanabilme yeteneği KÖA’lara yüksek oranda veri iletimi imkanı sağlamasına karşın, iletişim için kanal atama problemini de beraberinde getirmiştir.

Crichigno ve arkadaşları 2008 yılında yaptıkları “Protocols and architectures for channel assignment in wireless mesh networks” başlıklı çalışmada, tek radyo ile çoklu kanal ve çoklu radyo ile çoklu kanal kullanımı durumunda karşılaşılan çoklu kanal gizli bağlantı, sağrlık, kanal kördüğümü gibi problemleri incelemişlerdir [23].

Örgü düğümler üzerinde bulunan radyolar genellikle çok yönlüdür. Bir radyo ile yapılan iletişim, kapsama alanı içerisinde bulunan diğer düğümler tarafından fark edilecektir. Bağlantı yönetim algoritmaları kablolü ağlar ve tek yönlü kablosuz ağlar için kullanıldığında problem olmamasına rağmen, çok yönlü radyolar ile kablosuz iletişimde bağlantı yönetim algoritmaları problem çıkartmaktadır. Kablosuz örgü ağlarda genellikle çok yönlü radyolar kullanılmaktadır. Bundan dolayı, bağlantı yönetimi kullanılarak topoloji korunumu ile kanal atama yaklaşımı kablosuz ağlar için uygun değildir [24].

Cheng ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları “Nodes organization for channel assignment with topology preservation in multi-radio wireless mesh networks” başlıklı çalışmada, mevcut kanallara göre düğümleri ayarlayarak kanal atama sorunlarına çözüm bulmayı

amaçlamışlardır [24]. Kablosuz örgü ağlarda topoloji korunumu ile kanal atama yaklaşımı için düğüm yönetiminin kullanımına öncülük eden bir yaklaşım olmuştur. Kanal atama probleminin NP-hard bir problem olduğu kanıtlanmıştır ve polinom zamanı içerisinde en iyi çözümü bulmak mümkündür. Cheng ve arkadaşları, DPSO-CA olarak isimlendirdikleri ayrık parçacık sürüsü optimizasyonuna dayanan bir kanal atama algoritması formüle etmişlerdir. Yazarlar, düzgün yük dağılımının olduğu ağlar için bir algoritma tasarımlarına rağmen, dengesiz yük dağılımının olduğu ağlar için bu algoritmanın genişletilebileceğini göstermişlerdir. Kanal atama problemlerinde radyo kullanımını, çift kanal etkileşiminin etkilerini ve ağ verimliliğini detaylı şekilde incelemişlerdir [24].

Cheng ve arkadaşları geliştirdikleri kanal atama algoritmasının verimliliğini değerlendirmek için literatürde mevcut bulunan CTBA [25], IATC [26] ve CCA-M [27] kanal atama algoritmaları ile kıyaslamışlardır. Düğümler üzerindeki radyo sayısı artırılarak olumsuz ağ etkileşim durumunu ölçmüşlerdir. DPSO-CA'nın diğer iki algoritmaya göre daha az olumsuz ağ etkileşimi sağladığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, radyo miktarının ağın toplam performansına etkisini benzetim ile ölçmüşlerdir. 25 tane düğümün bulunduğu KÖA kümesinde, 2 radyo kullanılması durumunda DPSO-CA ve CCA-M'nin diğer iki algoritmaya oranla daha başarılı olduğu, 4 ile 10 tane arasında radyo kullanımı durumunda DPSO-CA'nın diğerlerine göre daha etkili sonuçlar aldığını göstermişlerdir. Bununla beraber, 12 ve 3 tane radyo kullanımında tüm algoritmaların eşit derecede verimli olduğunu sonucuna ulaşmışlardır. 50 tane düğümün bulunduğu KÖA kümesinde ise öncekine benzer sonuçlar almışlardır. Ayrıca, 25 düğümlü 12 radyolu KÖA'larda ağ verimliliği ile olumsuz ağ etkileşimi için kullanılacak en uygun radyo miktarını bulmaya çalışmışlardır. 25 tane düğümün olduğu kümelerde 5 tane radyo kullanımının en uygun olduğunu, bu durumun 50 tane düğümün bulunduğu KÖA için 25 düğümlü kümede olduğu kadar etkili olmasa da, benzer sonuca ulaşmışlardır [24].

Rad ve Wong 2009 yılında yaptıkları "Congestion-aware channel assignment for multi-channel wireless mesh networks" başlıklı çalışmada kablosuz örgü ağlarda çoklu kanal atama için tıkanıklığı dikkate alan DCACA olarak adlandırdıkları bir kanal atama algoritması geliştirmişlerdir [28]. KÖA'nın toplam performansı çoklu kanal kullanılarak artırılabilir. Verimli bir şekilde kanalların atanması komşu düğümler arası iletişimde meydana gelecek olumsuz etkileşimi azaltmak açısından çok önemlidir. Yazarlar geliştirdikleri algoritma ile Load-Aware [29] algoritmasını ve tek kanal kullanımının performanslarını benzetim yolu ile kıyaslamışlardır. TCP kaynaklı trafik kullanarak 10 farklı topoloji için toplam ağ verimliliği ve paket iletim zamanı ölçütlerini ağ performansını ölçmek için karşılaştırmışlardır. 10 topolojinin her birinde DCACA algoritmasının diğerlerine oranla daha verimli olduğunu göstermişlerdir [28].

Marina ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları "A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks" başlıklı çalışmada çok radyolu KÖA'larda etkin kanal kullanımını sağlamak için radyo arayüzlerine kanal atanması ile oluşan kanal atama problemlerini değerlendirmişlerdir [30]. Yeni bir topoloji kontrol yaklaşımını temel alarak kanal atama formül teorisi sunmuşlardır. CLICA olarak adlandırdıkları yeni bir sezgisel kanal atama algoritması geliştirmişlerdir. Yazarlar, CLICA kanal atama algoritmasını, ağda bulunan düğümler üzerindeki radyo sayılarını artırarak literatürde mevcut bulunan CCA kanal atama algoritması ve her düğümde tek bir kanal kullanım durumunu kıyaslamışlardır. Aynı sayıda radyo kullanıldığında CLICA yaklaşımının CCA'ya oranla çok daha etkili olduğunu, CLICA'da 3, CCA'da 12 radyo kullanılması durumunda bile CLICA'nın CCA'ya göre ortalama paket gecikme değerinin daha iyi olduğunu göstermişlerdir [30].

Ortak kanal atama ve yönlendirme çoklu radyo ve kanallı kablosuz örgü ağlarda hala ciddi bir sorundur. Bu sorunu çözmeye yönelik bir takım yaklaşımlar literatürde mevcut olsa bile, yüksek oranda trafik yükünün olduğu durumlarda çok fazla ek yük getirmeden ağ performansı açısından en iyi çözümün nasıl sağlanacağı hala cevap verilemeyen bir sorudur [31]. Wellons ve Xue 2011 yılında yaptıkları "The robust joint solution for channel assignment and routing for wireless mesh networks with time partitioning" başlıklı çalışmada KÖA'lar için RCART olarak adlandırdıkları yeni bir çözüm sunmuşlardır. Yazarlar RCART çözümünde kanal atama ve yönlendirme sırasında ek bir denetim değişkeni olarak zaman paylaşımını kullanmaları sonucu ortalama performansı önemli ölçüde artırmışlardır. RCART'ın verimliliğini gerçek trafik kullanarak değerlendirmişlerdir. Sunulan çözümün zaman paylaşımı olmadan yapılan mevcut çalışmalara oranla daha etkili sonuçlar aldığını göstermişlerdir [31].

Kablosuz örgü ağlar kullanıcılara geniş bantlı internet erişimi sağlayan olağanüstü teknolojilerden biri olarak görülür. 802.11 PHY ve MAC, çoklu kanal ve hızlı iletişim kapasitesini destekler. Bununla birlikte, mevcutta var olan kanalları ve veri hızlarını etkili bir şekilde kullanabilecek kanal atama protokolünün tasarımı ağ performansının azalmasını engelleyen önemli bir konudur. Hızlı iletişimli kablosuz ağlarda mevcut bulunan düşük hızlı bağlantılar ciddi problemlere neden olabilir. Bu problem genellikle anormal performans olarak adlandırılır [32].

Kim ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları "A Cooperative Channel Assignment protocol for multi-channel multi-rate wireless mesh networks" başlıklı çalışmada çoklu kanal ve hızlı iletişim sağlayan KÖA için anormal performans problemlerini dikkate alan ortaklaşa kanal atama (CoCA) olarak adlandırdıkları bir protokol tasarlamışlardır. CoCA protokolü tahmini teslim zamanı (EDT) metriği ve dengeleme algoritmasından yararlanır. Yazarlar, EDT metriğini kullanarak, çoklu kanal çoklu sıçrama yollarını (MMPs) biçimlendirerek kanal atama yapmışlardır ve mevcut kanallar içerisindeki

yüksek hız oranına sahip olanları, düşük hız oranına sahip olanlardan ayırmışlardır. Ayrıca, CoCA anormal performans problemini dikkate alır ve kanal atama sırasında bir dengeleme algoritması kullanır.

Kim ve arkadaşları CoCA'nın performansını benzetim yolu ile değerlendirmişlerdir. KÖA'larda mevcut bulunan kanal atama protokollerinden daha etkili sonuçlar almışlardır. Yazarlar, CoCA'nın performansını ölçmek için literatürdeki çoklu kanal protokolleri Hyacinth [29] ve ICA [33] ile karşılaştırmışlardır. Ağ içerisindeki yönlendiricilerin sayısını arttırarak bu üç protokolün paket teslim etme oranı, sondan sona gecikme ve ortalama verimlilik ölçütleri ile kıyaslamaları sonucu COCA'nın diğerlerine oranla oldukça başarılı olduğunu göstermişlerdir [32].

Kablosuz örgü ağlar son yıllarda düşük maliyet ve kolay yayılım gibi kendisine özgü özelliklerden dolayı oldukça ilgi görmektedir. Bu ağlarda en uygun yönlendirme, bağlantı kapasitesine bağlıdır. Ağ kapasitesini ve verimliliğini arttırmak için, bu ağlarda çoklu kanal ve çoklu arayüzün kullanılması literatürde sunulmaktadır. Fakat parazitlenmenin olması bu tip ağlarda kanal atama ve bağlantı kullanımını kısıtlar [34].

Kumar ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları "Capacity and interference aware link scheduling with channel assignment in wireless mesh networks" başlıklı çalışmada KÖA'nın toplam kapasitesini ve verimliliğini arttırmak amacıyla bağlantı düzenleme ve kanal atama (CA) üzerine yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Kanal atama ve bağlantı düzenleme problemini lineer programlama problemi olarak formüle etmişlerdir. Sunulan algoritmada kısaca, bağlantılar sıralanır ve her bağlantı metrik maliyetine (LCM) göre belirli bir grup içerisine yerleştirilir. LCM değeri bağlantıları bir arada gruplamak için kullanılır. Sonra, bu bağlantılar için kanal atama yapılır. Benzetim sonuçları sunulan yaklaşımın paket teslim etme oranı, sondan sona gecikme, ortalama verimlilik, paket kayıp oranı ölçütlerine göre değerlendirildiğinde önceki yaklaşımlara SRSC ve MCMR [35] oranla daha verimli olduğunu göstermiştir [34].

### 2.5. Veri Güvenliğine İlişkin Problemler

Martignon ve arkadaşları 2009 yılında yaptıkları "Design and implementation of MobiSEC: A complete security architecture for wireless mesh networks" başlıklı çalışmada kablosuz örgü ağlar içerisinde örgü yönlendirici ve istemciler için erişim denetimi sağlayan MobiSec olarak adlandırdıkları bir güvenlik mimarisi sunmuşlardır [36].

MobiSec mimarisinde anahtar etmen KÖA içerisinde oluşacak tüm trafiğin veri gizliliğini ve güvenliğini garantiye almak için 2. katmanda şifreleme desteği sunmasıdır. Güvenliği sağlamak için hem komşu düğümlere kimlik bilgileri sunan hem de kablosuz omurga bağlantılarda iletilen tüm trafiği şifreleyen geçici bir anahtar kullanılır. Martignon ve arkadaşları KÖA'lar

için uygun hale getirdikleri birbirinin türevi olan sunucu ve istemci sürücü olarak adlandırdıkları iki tane protokol sunmuşlardır. Sunucu sürümlü protokolda tüm örgü yönlendiricileri periyodik olarak merkezi bir sunucuya yeni anahtar kelimeyi almak için istek gönderirken, istemci sürücü protokolda örgü yönlendiriciler sunucudan bir kök kelime alırlar ve bir karıştırma algoritmasıyla şifrelenmiş anahtar kelimeler elde eder. Yazarlar, sundukları iki algoritmayı, durağan anahtar kelime kullanımını ve standart IpSec algoritmasıyla kurulan TCP oturum miktarı ve anahtar kelimenin aşım süresine göre kıyaslamışlardır. Yaptıkları tüm benzetim sonuçlarında bir oturum içerisinde kullanılan anahtar kelimelerin sayısının seçiminin paket kaybı gibi bir olumsuzluğa neden olmadığını, ağ performansına göz ardı edilebilecek bir etkide bulunarak KÖA'da güvenliği oldukça arttırdıklarını söylemişlerdir [36].

KÖA diğer iletişim teknolojilerine bir alt yapı hizmeti sunduğundan dolayı, KÖA'da bulunan birçok güvenlik açığı, hem örgü ağın kendi içerisinden hem de ağın dışarısından bir takım ataklara maruz kalabilir [37].

Muogilim ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları "Wireless mesh network security: A traffic engineering management approach" başlıklı çalışmada KÖA içerisindeki güvenlik açıklarını ve saldırı türlerini katmanları baz alarak sınıflandırmışlardır [37]. Ayrıca, KÖA daki bu ataklara karşı mevcut bulunan güvenlik önlemlerini sunmuşlar ve mevcut bulunan 802.11i, MPLS, MPLS VPN, MPLS VPN IPsec protokollerini KÖA'lar için bazı ağ performans ölçütlerini kullanarak değerlendirmişlerdir. Trafik yükü arttıkça ağa en az yük getiren, sondan sona en az gecikme sağlayan protokolün MPLS VPN IPsec olduğunu, ortalama geçilen düğüm sayısı arttıkça en çok paket teslim eden protokolün de MPLS VPN IPsec olduğu sonucuna benzetim yolu ile ulaşmışlardır. Ayrıca KÖA içerisinde Ddos ataklara karşı etkili olan protokolün MPLS VPN IPsec olduğunu göstermişlerdir [37].

### 2.6. Çoklu Yayın Desteğini Sağlamak

Kablosuz örgü ağlarda etkili bir çoklu yayın yönlendirme metriğinin olması çoklu iletişim sırasında kritik bir role sahiptir. Mevcut olan tekli yayın yönlendirme metrikleri çoklu yayın işlemi için kullanıldığında yeteri kadar etkili olamaz. Bundan dolayı çoklu yayın iletişimi için özel yönlendirme metriklerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Pourfakhar ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları "A hybrid QoS multicast framework-based protocol for wireless mesh networks" başlıklı çalışmada bir düğümün bağlantısının kopma ihtimalini veya kullanacağı rotayı tahmin etmek için CMAC sinir ağı modelini kullanmışlardır. Bu tahmin hata oluşmadan önce ağı kurtarmayı hedefler. KÖA'daki yük dengeleme problemini ve internet istemcileri ile örgü istemcileri arasında dinamik olarak çoklu yayın iletişimi sırasında QoS arttırmak için yeni bir QoS çoklu yayın yönlendirme taslağı sunmuşlardır. Bu taslağa dayanarak bir sonraki nesil olan 802.11s içerisinde problemlere karşı tedarikli



olan HMFPM olarak adlandırdıkları melez bir çoklu yayın protokolü sunmuşlardır [38].

Pourfakhar ve arkadaşları tasarladıkları protokolün proaktif ve reaktif protokoller içerisinde çoklu yayın yönlendirmesi yaparken gereksiz olan gecikmeyi yok edebilecek şekilde olduğunu ve geçit yolları arasında dengeleme yapmak için çoklu geçit yolu kullanabilme imkanı sunduğunu ifade etmişlerdir. Sundukları HMFPM protokolünün ölçeklenebilirliğini ve performansını ODMRP [39] ve MNT [40] protokolleri ile farklı senaryolar içerisinde kıyaslamışlardır. Kıyaslama yaparken paket teslim etme oranı, ortalama yayılım, ortalama sondan sona gecikme, çoklu yayın ek yük kriterlerini ve çoklu yayın trafiğinin paket teslim oranına etkisini ölçmüşlerdir. Benzetimde 20 ve 50 tane alıcıdan oluşan düğüm kümeleri kullanmışlardır. Hem 20 hem de 50 tane alıcı düğümün olduğu durumlarda yukarıdaki kriterlere göre değerlendirdiklerinde en verimli sonucu geliştirdikleri HMFPM protokolünden almışlardır [38].

Li ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları “Load-aware multicast routing metrics in multi-radio multi-channel wireless mesh networks” başlıklı çalışmada çoklu kanal ve çoklu radyo kullanılan kablosuz örgü ağlar için çoklu yayın yönlendirme metriklerini araştırmışlardır. *FLMM* ve *FLMM<sup>R</sup>* olarak adlandırdıkları yük durumunu göz önünde bulunduran iki tane çoklu yayın yönlendirme metriği sunmuşlardır. *FLMM* daha az parazitlenme yapan çoklu yayın rotalarını bulmayı amaçlar. *FLMM*, hem bant genişliği ile hem de ağı etkin kullanımını arttırmak için kanal çeşitliliğinden faydalanır [41].

Li ve arkadaşları, *FLMM* ve *FLMM<sup>R</sup>* metriklerini standart çoklu yayın yönlendirme protokolü olan MAODV protokolü içinde metrik olarak kullanmışlardır. *FLMM* ve *FLMM<sup>R</sup>* metriklerinin performansını ölçmek için HOP ve SPP metrikleri ile kıyaslamışlardır. Tüm metriklerin performanslarını, ağ verimliliği ve paket teslim etme oranını dikkate alarak değerlendirmişlerdir. Ağ içerisinde çoklu yayın yükünü arttırdıklarında, HOP ve SPP'nin paket teslim etme oranının hızla düştüğü *FLMM* ve *FLMM<sup>R</sup>*'de düşüş oranının çok daha az olduğunu göstermişlerdir. Tek bir çoklu yayın grubu kullandıklarında, SPP ve *FLMM<sup>R</sup>* %10'un altında paket düşürürken, *FLMM* %17 oranında paket düşürdüğünü göstermişlerdir. Ancak, çoklu yayın grup sayısını 9'a çıkarttıklarında *FLMM* ve *FLMM<sup>R</sup>* 'de %25 civarında paket kaybı olurken, SPP ve HOP'da paket kaybı oranı yaklaşık %50 civarında olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Kullanılan kanal sayısının artırılması sonucu tüm protokollerde ortalama ağ verimliliğinde ciddi düşüş yaşandığı görülmüştür [41].

IEEE 802.11 cihazları veri iletimi yapabilmek için farklı bit hızları ve ayarlama yaklaşımları arasından birini dinamik olarak seçer. Bu hız oranı, sadece bir gönderici ve bir alıcı arasındaki iletişim için uygun olur. Çoklu ve geniş yayınlı iletişimde sabit bit hızlı ayarın kullanımı çoklu yayın akışında verimliliği azaltan mecburi bir durumdur. Özellikle çok sıçramalı örgü ağlarda, bant

genişliğinin etkin kullanılabilmesi IPTV gibi çoklu ortam çoklu yayın uygulamalarını desteklemek açısından oldukça önemlidir [42].

Acharya ve Belding 2011 yılında yaptıkları “MARS: Link-layer rate selection for multicast transmissions in wireless mesh networks” başlıklı çalışmada örgü ağlarda çoklu yayın iletişimi için MARS olarak adlandırdıkları bir hız ayarlama algoritması sunmuşlardır. Sunulan algoritma verilen bir çoklu yayın grubu için hız uygun iletişim seçmek amacıyla yerel ağa ölçümü yapmaya dayanır. Sunulan algoritma ayrıca ortak bir hız oranı ve veri bağlantı mekanizması belirlemeyi kolaylaştırır. Sunulan algoritma geleneksel 802.11 ağları ile kıyaslandığında %600 verimlilik sağlamıştır. Ayrıca, sunulan algoritma temel 802.11 işlemleri ile karşılaştırıldığında %20 oranında kaynak tüketimi yaparak, çoklu yayın akışını destekleyebilir [42].

Kharraz ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ODMRP protokolünün çoklu yayın etkinliğini ve performansını arttırmak için yeni bir etkin rota bulma protokolü geliştirmişler. Geliştirilen protokolü sınırlı paket taşıma ODMRP olarak adlandırmışlardır. Çoklu yayın grubuna katılan düğümlerin paket gecikme değerlerine bakılarak taşıma mekanizmasını yöneterek çoklu yayın işleminin etkinliğini arttırmaya çalışmışlardır. Yazarların sunduğu yaklaşım, sadece gecikme metriğinin belirlenen gereksinimlerini karşılaması durumunda, sorgu-katılma mesajlarını ağa gönderebilir. Sunulan yaklaşımın çeşitli benzetim durumları altında sınırlı taşıma ile ODMRP ve asıl ODMRP ile kıyaslandığında etkili oranda paket ek yükünü azalttığı görülmüştür [43].

## 2.7. Hücreler Arası Geçiş Problemleri

Kablosuz örgü ağlar sağladığı avantajlardan dolayı kablosuz öz organizeli ağların ve geleneksel kablolu ağların eksikliklerini giderebilir. KÖA gelecek nesil ağlar içerisinde öncülük edecek bir role sahiptir. KÖA'lar için kusursuz bir hareketlilik yönetimi sağlanabilmesi araştırılan önemli alanlardan biridir. KÖA'nın durağan bir omurga ve sürekli hareketli olan istemcilerden oluşması, yeni bir hareketlilik yönetim çözümü tasarlamayı ve gerçekleştirmeyi zorunlu hale getirmiştir [44].

Zhang ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları “A mobility management scheme for wireless mesh networks based on a hybrid routing protocol” başlıklı çalışmada iletilen paketler için hem bağlantı katman yönlendirmesi hem de ağ katman yönlendirmesi yapabilen melez bir yönlendirme protokolü sunmuşlardır. Yönlendirme protokolünü temel olarak KÖA'lar için hareketlilik yönetim yaklaşımı geliştirmişlerdir. Hem etki alanı içerisinde hem de dışarısında kusursuz olarak hareket esnekliğini desteklemek için yeni bir hareketlilik yönetimi tasarlamışlardır. 4 tane hareketlilik yönetim modelini paket kayıp oranı ve paket gecikmesi gibi ölçütlere dayanarak kıyaslamışlardır. Yaptıkları benzetimde geliştirilen yaklaşımın düşük miktarlarda paket gecikmesi, düşük oranda paket kaybı ve kısa sürede hücreler arası geçiş sağladığı sonucuna ulaşmışlardır [44].

### 3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kablosuz örgü ağların verimliliğine etki eden etmenler ile ilgili yapılan araştırmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kablosuz örgü ağların getirdiği sayısız avantajın kullanılabilmesi birçok etmene bağlıdır. Kablosuz örgü ağlar, gelecek nesil kablosuz ağ teknolojisi olarak görülmesine rağmen hala çözüm bekleyen bazı sorunlara sahiptir. Bu ağların sorunsuz ve yaygın olarak kullanılabilmesi için fazladan ek yük getirmeyecek ölçeklenebilir bir yönlendirme protokolüne ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda, ağda iletilen verilerin güvenliğini sağlayabilecek bir standardın hala olmaması, bu ağların yaygın kullanımını engellemektedir. Özellikle kablosuz örgü ağlar içerisinde kullanılacak olan yönlendirme protokolünün bu avantajları yerine getirebilecek yetenekte olması oldukça önemlidir.

Kablosuz örgü ağlarda ağ büyüklüğü arttıkça, veri paketlerinin iletimi zorlaşmaktadır. İletişimi sağlayacak olan yönlendirme protokolü, veri iletimini bu durumdan en az etkilenecek şekilde gerçekleştirmelidir.

Jun ve Sichitiu geliştirdikleri MRP protokolünü, ağın içinde bulunan düğüm sayısının artmasına göre değerlendirmişlerdir. Değerlendirme ölçütü olarak protokol ek yükü, paket teslim etme oranı, sondan sona gecikme ve ortalama geçen düğüm sayısı metriklerini kullanmışlardır. Geliştirdikleri MRP protokolünün 3 farklı sürümünü; AODV, DSR, LANMAR, OLSR, RIPv2, ZRP protokolleri ile kıyaslamışlardır [5]. Alınan sonuçlar özetlenerek aşağıda gösterilmiştir. Ağdaki düğüm sayısının artması ağın verimliliğini olumsuz yönde etkilemiştir.

Kablosuz örgü ağlarda çoklu kanal kullanımı sırasında yapılan kanal atama işleminin ağın performansına etkisi oldukça fazladır. Ding ve Xiao yaptıkları çalışmada literatürde mevcut bulunan kanal atama algoritmalarını farklı anten tiplerini göz önünde bulundurarak özetlemişlerdir. Ayrıca, kanal atama algoritmasının ağın performansına etkisini araştırmışlardır [50]. Düğümlerin sahip olduğu kanal ve radyo sayısının fazla olması bazı problemleri beraberinde getirmektedir [23]. Bu yüzden, az sayıda kanal kullanarak etkin çözüm sağlayan kanal atama algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 1. 100 düğümlü kablosuz örgü ağı

Protokol	PDR [%]	E2E (ms)	Ortalama Sıçrama (sıçrama/paket)
MRP-H	73	250	5,0
MRP-OD	54	500	5,8
MRP-B	72	250	5,0
MRP-S	48	250	4,8
AODV	55	480	4,9
DSR	55	2100	-
LANMAR	30	40	3,0
OLSR	53	700	4,4

RIP2	20	250	3,1
ZRP	21	1800	7,0

Tablo 2. 220 düğümlü kablosuz örgü ağı

Protokol	PDR [%]	E2E (ms)	Ortalama Sıçrama (sıçrama/paket)
MRP-H	40	1100	7,2
MRP-OD	28	1000	7,0
MRP-B	40	1100	7,2
MRP-S	37	700	7,0
AODV	4	3500	8,9
DSR	27	2600	-
LANMAR	11	40	2,6
OLSR	26	1600	6,2
RIP2	17	450	4,9
ZRP	14	1950	11,0

Marina ve arkadaşları geliştirdikleri CLICA kanal atama algoritmasını trafik yükünü artırarak değerlendirmişlerdir. Değerlendirme ölçütü olarak ağ verimliliği ve ortalama gecikme metriklerini kullanmışlardır. Geliştirdikleri algoritmayı literatürde bulunan CCA algoritması ile farklı sayıda radyo kullanarak kıyaslamışlardır [30]. Alınan sonuçlar özetlenerek aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 3. 4 Mbps Yük Durumu

Kanal Atama Algoritması	Verimlilik (Mbps)	Ortalama Gecikme (sn)
CCA (3 radyo)	4	0,5
CCA (2 radyo)	3	4
CLICA (2 radyo)	4	0,5
Tek Kanal	2	7
CCA (12 radyo)	4	0
CLICA (3 radyo)	4	0

Tablo 4. 12 Mbps Yük Durumu

Kanal Atama Algoritması	Verimlilik (Mbps)	Ortalama Gecikme (sn)
CCA (3 radyo)	5,9	7
CCA (2 radyo)	3,9	7,8
CLICA (2 radyo)	5,9	4,5
Tek Kanal	2	8,5
CCA (12 Radyo)	12	0
CLICA (3 Radyo)	12	0

Tablo 5. 24 Mbps Yük Durumu

Kanal Atama Algoritması	Verimlilik (Mbps)	Ortalama Gecikme (sn)
CCA (3 radyo)	6	8,5
CCA (2 radyo)	4	8,5
CLICA (2 radyo)	6	5,2
Tek Kanal	2	8,5
CCA (12 Radyo)	18	4
CLICA (3 Radyo)	16,5	1,8

Bu çalışmada, kablosuz örgü ağların verimliliğine etki eden olumsuz etmenler ve bu sorunların çözümüne yönelik yapılan çalışmalar, ilgili soruna göre sınıflandırılarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde ilgili sorunların hepsinin örgü ağın verimliliğine değişik oranlarda etki ettiği, özellikle kanal atama çözümlerinin etkisinin daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. İlgili sorunların hepsine belli oranlarda çözüm olabilecek ve aynı zamanda ağa olabildiğince fazladan yük getirmeyecek ölçeklenebilir yönlendirme protokollerine ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] J. Zheng, M. J. Lee, "A resource-efficient and scalable wireless mesh routing protocol", *Ad Hoc Networks*, 5(6), 704-718, 2007.
- [2] S. Kim, O. Lee, S. Choi, S. Lee, "Comparative analysis of link quality metrics and routing protocols for optimal route construction in wireless mesh networks", *Ad Hoc Networks*, 9(7), 1343-1358, 2011.
- [3] A. Pal, A. Nasipuri, "A quality based routing protocol for wireless mesh networks", *Pervasive and Mobile Computing*, 7(5), 611-626, 2011.
- [4] I. F. Akyildiz, X. Wang, W. Wang, "Wireless mesh networks: a survey", *Computer Networks*, 47(4), 445-487, 2005.
- [5] J. Jun, M. L. Sichitiu, "MRP: Wireless mesh networks routing protocol", *Computer Communications*, 31(7), 1413-1435, 2008.
- [6] V. C. M. Borges, M. Curado, E. Monteiro, "The impact of interference-aware routing metrics on video streaming in Wireless Mesh Networks", *Ad Hoc Networks*, 9(4), 652-661, 2011.
- [7] X. Cheng, P. Mohapatra, S. J. Lee, S. Banerjee, "Maria: interference-aware admission control and qos routing in wireless mesh networks", **IEEE International Conference on Communications (ICC)**, Beijing, 2865-2870, 2008.
- [8] A. A. Pirzada, M. Portmann, J. Indulska, "Performance analysis of multi-radio AODV in hybrid wireless mesh networks", *Computer Communications*, 31(5), 885-895, 2008.
- [9] X. Wang, A. O. Lim, "IEEE 802.11s wireless mesh networks: Framework and challenges", *Ad Hoc Networks*, 6(6), 970-984, 2008.
- [10] L. Zhao, A. Y. Al-Dubai, G. Min, "An efficient Neighbourhood Load Routing metric for Wireless Mesh Networks", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(6), 1415-1426, 2011.
- [11] A. A. Pirzada, M. Portmann, R. Wishart, J. Indulska, "SafeMesh: A wireless mesh network routing protocol for incident area communications", *Pervasive and Mobile Computing*, 5(2), 201-221, 2009.
- [12] A. A. Jeng, R. Jan, C. Li, C. Chen, "Release-time-based multi-channel MAC protocol for wireless mesh networks", *Computer Networks*, 55(9), 2176-2195, 2011.
- [13] J. J. Galvez, P. M. Ruiz, A. F. G. Skarmeta, "Responsive on-line gateway load-balancing for wireless mesh networks", *Ad Hoc Networks*, 10(1), 46-61, 2012.
- [14] F. Chen, Y. Wang, J. Liu, Z. Li, "Probing-based anypath forwarding routing algorithms in wireless mesh networks", *Ad Hoc Networks*, (In Press), 2011.

- [15] R. L. Gomes, W. M. Junior, E. Cerqueira, A. J. Abelem, "Using fuzzy link cost and dynamic choice of link quality metrics to achieve QoS and QoE in wireless mesh networks", *Journal of Network and Computer Applications*, 34(2), 506-516, 2011.
- [16] D. Benyamina, A. Hafid, M. Gendreau, J. C. Maureira, "On the design of reliable wireless mesh network infrastructure with QoS constraints", *Computer Communications*, 55(8), 1631-1647, 2011.
- [17] E. Amaldi, A. Capone, M. Cesana, I. Filippini, F. Malucelli, "Optimization models and methods for planning wireless mesh networks", *Computer Networks*, 52(11), 2159-2171, 2008.
- [18] Z. Yang, M. Li, W. Lou, "R-Code: Network coding-based reliable broadcast in wireless mesh networks", *Ad Hoc Networks*, 9(5), 788-798, 2011.
- [19] W. Zhao, J. Xie, "OPNET-based modeling and simulation study on handoffs in Internet-based infrastructure wireless mesh networks", *Computer Networks*, 55(12), 2675-2688, 2011.
- [20] R. Riggio, T. Rasheed, S. Testi, F. Granelli, I. Chlamtac, "Interference and traffic aware channel assignment in WiFi-based wireless mesh networks", *Ad Hoc Networks*, 9(5), 864-875, 2011.
- [21] K. N. Ramachandran, E.M. Belding, K.C. Almeroth, M.M. Buddhikot, "Interference-aware channel assignment in multi-radio wireless mesh networks", **Proc. of IEEE Infocom**, Barcelona, 2006.
- [22] C. Caillouet, S. Perennes, H. Rivano "Framework for optimizing the capacity of wireless mesh networks", *Computer Communications*, 34(13), 1645-1659, 2011.
- [23] J. Crichigno, M-Y. Wu, W. Shu, "Protocols and architectures for channel assignment in wireless mesh networks", *Ad Hoc Networks*, 6(7), 1051-1077, 2008.
- [24] H. Cheng, N. Xiong, A. V. Vasilakos, L. T. Yang, G. Chen, X. Zhuang, "Nodes organization for channel assignment with topology preservation in multi-radio wireless mesh networks", *Ad Hoc Networks*, (In Press), 2011.
- [25] A. Subramanian, H. Guptake, S.R. Das, "Minimum interference channel assignment in multi-radio wireless mesh networks", *IEEE Trans. Mobile Comput.*, 7(12), 1459-1473, 2008.
- [26] J. Tang, G. Xue, W. Zhang, "Interference-aware topology control and QoS routing in multi-channel wireless mesh networks", **Proceedings of ACM MOBIHOC'05**, New York, 68-77, 2005.
- [27] H. Cheng, N. Xiong, "Channel assignment with topology preservation for multi-radio wireless mesh networks", *Journal of Communications*, 5(1), 63-70, 2010.
- [28] A. H. M. Rad, V. W. S. Wong, "Congestion-aware channel assignment for multi-channel wireless mesh networks", *Computer Networks*, 53(14), 2502-2516, 2009.
- [29] A. Raniwala, T. Chiueh, "Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network", **Proceedings of IEEE Infocom**, Miami, 2223-2234, 2005.
- [30] M. K. Marina, S. R. Das, A. P. Subramanian, "A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks", *Computer Communications*, 54(2), 241-256, 2010.
- [31] J. Wellons, Y. Xue, "The robust joint solution for channel assignment and routing for wireless mesh networks with time partitioning", *Ad Hoc Networks*, (In Press), 2011.
- [32] S. H. Kim, D. W. Kim, Y. J. Suh, "A Cooperative Channel Assignment protocol for multi-channel multi-rate wireless mesh networks", *Ad Hoc Networks*, 9(5), 893-910, 2011.
- [33] R. Draves, J. Padhye, B. Zill, "Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks", **Proc. of ACM Mobicom**, New York, 114-128 2004.
- [34] N. Kumar, M. Kumar, R. B. Patel, "Capacity and interference aware link scheduling with channel assignment in wireless mesh networks", *Journal of Network and Computer Applications*, 34(1), 30-38, 2011.
- [35] G. W. Zeng, B. Ding, Y. L. Xiao, M. Mutka, "Multicast algorithms for multi-channel wireless mesh networks", **Proceedings of IEEE international conference on network protocols ICNP'07**, 1-10, 2007.
- [36] F. Martignon, S. Paris, A. Capone, "Design and implementation of MobiSEC: A complete security architecture for wireless mesh networks", *Computer Networks*, 53(12), 2192-2207, 2009.
- [37] O. E. Muogilim, K. K. Loo, R. Comley, "Wireless mesh network security: A traffic engineering management approach", *Journal of Network and Computer Applications*, 34(2), 478-491, 2011.

- [38] E. Pourfakhar, A. M. Rahmani, "A hybrid QoS multicast framework-based protocol for wireless mesh networks", *Computer Communications*, 33(17), 2079-2092, 2010.
- [39] S.J. Lee, W. Su, M. Gerla, "On-demand multicast routing protocol in multihop wireless mobile networks", *ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications*, 7(6), 441-453 2002.
- [40] P.M. Ruiz, A.F. Gomez-Skarmeta, "Approximating optimal multicast trees in wireless multihop networks", **10th IEEE Symposium on Computers and Communications**, Spain, 686–691, 2005.
- [41] F. Li, Y. Fang, F. Hu, X. Liu, "Load-aware multicast routing metrics in multi-radio multi-channel wireless mesh networks", *Computer Communications*, 55(9), 2150-2167, 2011.
- [42] P. A. K. Acharya, E. M. Belding, "MARS: Link-layer rate selection for multicast transmissions in wireless mesh networks", *Ad Hoc Networks*, 9(1), 48-60, 2011.
- [43] M. A. Kharraz, H. Sarbazi-Azad, A. Y. Zomaya, "On-demand multicast routing protocol with efficient route discovery", *Journal of Network and Computer Applications*, (In Press).
- [44] Z. Zhang, R. W. Pazzi, A. Boukerche, "A mobility management scheme for wireless mesh networks based on a hybrid routing protocol", *Computer Communications*, 54(4), 558-572, 2010.
- [45] S. Keshav, "A control-theoretic approach to flow control", **Proceedings of the Conference on Communications Architecture & Protocols**, Zürich 3-15, 1993.
- [46] D. D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing", **Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking**, San Diego, 134-146, 2003.
- [47] D. Nandiraju, L. Santhanam, N. Nandiraju, D. P. Agrawal, "Achieving load balancing in wireless mesh networks through multiple gateways", **Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS)**, Canada, 807–812, 2006.
- [48] A. Pirzada, R. Wishart, M. Portmann, J. Indulska, "ALARM: an adaptive load-aware routing metric for hybrid wireless mesh networks", **Proceedings of the 32nd Australasian Computer Science Conference**, New Zealand, 25-34, 2009.
- [49] S. Roy, D. Koutsonikolas, S. Das, Y.C. Hu, "High throughput multicast routing metrics in wireless mesh networks", **Proceedings of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems**, Lisboa, 878-899, 2006.
- [50] Y. Ding, L. Xiao, "Channel allocation in multi-channel wireless mesh networks", *Computer Communications*, 34(7), 803-815, 2011.