

**KABLOSUZ AĞLARDA EN AZ KESİNTİ İHTİMALİ İŞBİRLİKLİ
YOL ATAMA**

GÜLİZAR DUYGU KURT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2011

ANKARA

**KABLOSUZ AĞLARDA EN AZ KESİNTİ İHTİMALİ İŞBİRLİKLİ
YOL ATAMA**

GÜLİZAR DUYGU KURT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2011

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Ünver Kaynak

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Kahraman Güçlü KÖPRÜLÜ

Anabilim Dalı Başkanı

Gülizar Duygu KURT tarafından hazırlanan KABLOSUZ AĞLARDA EN AZ KESİNTİ İHTİMALİ İŞBİRLİKLİ YOL ATAMA adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. A. Melda YÜKSEL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

Üye : Doç. Dr. Kemal BIÇAKÇI

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Gülizar Duygu KURT

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Ocak 2011

Gülizar Duygu KURT

KABLOSUZ AĞLARDA EN AZ KESİNTİ İHTİMALİ İŞBİRLİKLİ YOL ATAMA

ÖZET

Çok sekmeli kablosuz ağlarda “kablosuz yayın avantajı”, hem kablosuz ortamda bulunan sinyallerin verimli kullanılmasını hem de uzaysal çeşitlemeye imkân vererek uçtan-uca kesinti ihtimalinin azalmasını sağlar. Bu çalışmada kablosuz ağlarda işbirlikli teke iletim ve yayın algoritmaları önerilmiştir. Önerilen algoritmalarda, ağda uçtan-uca kesinti ihtimalini en aza indirmek amaçlanmış ve başarımlı ölçütü olarak kesinti ihtimali kullanılmıştır. Düğümlerin sabit iletim güçleri olduğu kabul edilmiştir. Problem sönümlemeli kablosuz ağda genel kesinti ihtimalini en aza indiren iletim yapan düğümler kümesini ve sırasını bulmaktır. Her düğüm kendisinden önce iletim yapmış düğümlerin sinyallerini kullanabilmektedir. Böylece daha iyi SNR elde edilmektedir. Teke iletim ve yayın stratejileri için en iyi çözüm dal ve sınır Yöntemi kullanılarak bulunmuştur. Ayrıca en iyi altı algoritmalar üzerinde de çalışılmıştır. Yapılan benzetimler ve sayısal değerlendirmeler sonucunda önerilen algoritmalarından bazılarının neredeyse en iyi algoritma olan dal ve sınır yöntemi ile yol atama algoritmasına çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Ağlar, Kesinti İhtimali, İşbirliği, Yol Atama, Teke İletim, Yayın

University : TOBB Economics and Technology University
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Electrical and Electronics Engineering
Supervisor : Assistant Professor Dr. Tolga GİRİCİ
Degree Awarded and Date : M.Sc. – January 2011

Gülizar Duygu KURT

MINIMUM OUTAGE COOPERATIVE ROUTING IN WIRELESS NETWORKS

ABSTRACT

In multihop wireless networks “wireless broadcast advantage” can be utilized in order to both exploit all the useful signal in wireless environment and decrease outage probability by utilizing spatial diversity. We propose cooperative unicast and broadcast algorithms in wireless networks. Objective of this work is to minimize end-to-end outage probability so we use outage probability as a performance metric. Nodes have fixed transmission power. We consider the problem of finding the optimal set and order of transmitters that minimizes the overall outage probability in a wireless fading channel. The receiving nodes are able to combine all the previous transmission and achieve better receive SNR. We find the optimal solution based on the branch&bound method. Also we consider some suboptimal algorithms. The simulation results and the numerical evaluations show that some suboptimal algorithms perform very close to routing with branch&bound method, the optimal one.

Keywords: Wireless Networks, Outage Probability, Cooperation, Routing, Unicast, Broadcast

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Tolga GİRİCİ'ye ve kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
SEMBOL LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Teke İletim	3
1.2. Yayın ve Çoğa İletim	4
1.3. En Kısa Yol Bulma ve Kapsayan Ağaç Algoritmaları	5
1.3.1. En Kısa Yol Bulma Algoritmaları	5
1.3.2. Kapsayan Ağaç Algoritmaları	10
1.4. Kablosuz Ağlarda Yol Atama	11
1.5. Kablosuz Ağlarda Kanal Durumu ve Kesinti Kavramı	15
2. SİSTEM MODELİ	19
3. ASGARİ KESİNTİLİ TEKE İLETİM	23
3.1 Merkezi Yol Atama Algoritmaları	24
3.1.1 En İyi Çözüm: Dal ve Sınır Yöntemi	25
3.1.2 İşbirlikli Yol Atama ile İşbirlikli İletim	28
3.2 Dağıtık Yol Atama Algoritmaları	29

3.2.1. İşbiriksiz Yol Atama ile İşbirlikli İletim	29
3.2.2. En Az Kesinti İhtimalli İşbirlikli Yol Atama	30
3.2.3. Geliştirilmiş En Az Kesinti İhtimalli İşbirlikli Yol Atama	32
3.3. Sayısal Değerlendirmeler	33
4. ASGARİ KESİNTİLİ YAYIN	37
4.1. En İyi İletim Sırası: Dal ve Sınır Yöntemi	37
4.2. En İyi Altı Algoritmalar	38
4.3. Sayısal Değerlendirmeler	40
3. SONUÇLAR	45
KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ	50

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 3.1.	Asgari Kesintili Teke İletim Algoritmaları	23
Çizelge 4.1.	Asgari Kesintili Yayın Algoritmaları	37

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1.	Çok Sekmeli İletim	3
Şekil 1.2.	Kablosuz Yayın Avantajı	5
Şekil 1.3.	Dijkstra Algoritması ve Rahatlatma Tekniği	8
Şekil 1.4.	İşbirlikli İletim	13
Şekil 2.1.	Kablosuz Ortam Topolojisi	19
Şekil 2.2.	İşbirlikli İletim Örneği	21
Şekil 3.1.	Teke İletim Yol Örnekleri	24
Şekil 3.2.	Doğrudan İletim (DT) ve İşbirlikli İletim (CT) Blokları	31
Şekil 3.3.	$N = 15$, $C_h = 1/30$ için kesinti ihtimali dağılım fonksiyonu	34
Şekil 3.4.	$N = 15$, $C_h = 1/50$ için kesinti ihtimali dağılım fonksiyonu	35
Şekil 3.5.	$N = 25$, $C_h = 1/30$ için kesinti ihtimali dağılım fonksiyonu	36
Şekil 4.1.	$N = 10$, $T_{max} = 4$ için göreceli kesinti ihtimal oranlarının dağılımı	42
Şekil 4.2.	$N = 30$, $T_{max} = 5$ için göreceli kesinti ihtimal oranlarının dağılımı	43
Şekil 4.3.	$T_{max} = 5$ için göreceli kesinti ihtimal oranlarının dağılımı	44

KISALTMALAR

Kısaltmalar Açıklama

BB	Dal ve Sınır Yöntemi
RBB	Dal ve Sınır Yöntemi ile Teke İletim
CR-CT	İşbirlikli Yol Atama ile İşbirlikli İletim
NCR-CT	İşbiriksiz Yol Atama ile İşbirlikli İletim
MOCR	En Az Kesinti İhtimalli İşbirlikli Yol Atama
IMOCR	Geliştirilmiş En Az Kesinti İhtimalli İşbirlikli Yol Atama
BBB	Dal ve Sınır Yöntemi ile Yayın

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
d	Düğümler arası uzaklık
α	Yol kaybı katsayısı
d^a	Yol kaybı oranı
g_{ij}	Yol kaybı (i ve j düğümleri için)
h_{ij}	Rayleigh sönümlemesi (i ve j için)
P	İletim gücü
N_0	Gürültü güç spektral yoğunluğu
W	Bant genişliği
γ	Sinyal – Gürültü oranı
R_0	Hedef iletim hızı
e_0	Sinyal – Gürültü oranı eşik değeri
P_s	Başarı olasılığı
T_{max}	En yüksek verici sayısı
LB	Alt kesinti olasılığı sınırı
UB	Üst kesinti olasılığı sınırı
C_{ij}	Bağlantı masrafı (i ve j düğümleri için)
C_h	Sekme sayısı masrafı

1. GİRİŞ

1800'lü yılların sonunda ilk adı Marconi olan bilim adamı kablosuz telgrafı keşfetti. 1900'lü yılların başlarında telegrafik sinyalleri Atlas Okyanusu'nun üzerinden geçirerek yaklaşık 3200 km'lik mesafeye iletmeyi başardı. Bu buluş analog sinyaller aracılığıyla ikili iletişime olanak sağladı. Geçtiğimiz yüzyıl boyunca kablosuz teknoloji radyo, televizyon, mobil telefonlar ve uydu iletişimi gibi bir çok uygulama alanında kullanılmıştır. Günümüzde teknolojik gelişmelerle beraber dünyanın herhangi bir yerinden herhangi bir yerine veri transferi rahatlıkla gerçekleştirilmektedir.

İletişim uyduları ilk olarak 1960'lı yıllarda kullanılmaya başlandı. İlk uydular sadece 240 ses devresine sahipken, bugünün uyduları tüm televizyon sinyallerini tüm televizyon sinyallerini ve sesli iletişim trafiğinin yaklaşık üçte birini taşımaktadır. Mobil telefonlar Marconi'nin keşfinin gelişmiş uygulamalarıdır, iki yönlü iletişim sağlarlar. İlk nesil mobil telefonlar analog sinyal teknolojisini kullanıyorlardı. Bu telefonlar ağır ve kullanışsız olmalarına rağmen yeni nesil mobil telefon teknolojisinin yol göstericileri oldular. Yeni nesil kablosuz araçlar hata oranı daha düşük olan ve yük taşıma kapasitesi daha fazla olan dijital sinyal teknolojisiyle çalışmaktadır. Son 10 senede yaygınlaşan 3. nesil teknoloji sayesinde cep telefonu ağlarında yüksek hızda veri ve görüntü iletimi de yapılabilmektedir.

Buraya kadar anlatılan uygulamaların tamamında sistemin çalışması için belirli bir alt yapı ihtiyacı vardır. Örneğin radyo ve televizyon için verici istasyonlar, alıcılar ve çeşitli kablo düzenekleri; uydu iletişimi için uydular ve mobil telefonlar için baz istasyonları gerekmektedir. Belirli bir alt yapı ihtiyacı olmayan kablosuz ağlar oluşturmak mümkündür. Böyle ağlara Tasarsız Kablosuz Ağlar adı verilir. Tasarsız kablosuz ağlar genellikle pille çalışan, hareketli veya taşınabilir düğümlerden oluşan ağlardır. Tasarsız ağlar esnek yapıları sayesinde, kişisel alan ağları (mobil telefon, dizüstü bilgisayar), askeri ortamlar (savaş alanları), acil durum operasyonları (arama kurtarma, yangın) ve sivil ortamlarda (konferans salonu, ofis, üniversite)

kullanılmaktadırlar. Tasarsız ağlarda sistemin birbirine bağılı olması bileşenlerin birbirlerine mikrodalga frekanslarını kullanarak ulaşabilmesinden ibarettir. Tasarsız ağlara örnek olarak Bluetooth teknolojisi, WiFi, Wi-max ve ZigBee gibi birçok örnek verilebilir.

Bluetooth teknolojisi tasarsız kısa menzilli bir kablosuz ağ örneğidir. Bluetooth donanımına sahip bir araç başka bir Bluetooth donanımına sahip aracın kapsama alanına girdiğinde hemen bağlantı kurabilir. Bu teknoloji kullanıcılara evrensel kısa mesafeli kablosuz iletişim sağlar. Bluetooth ile en fazla sekiz kullanıcının kullanabileceği piconet adı verilen küçük kapasiteli ağlar oluşturulabilir.

IEEE 802.11 ile standartlaştırılan ve geniş bant kablosuz Internet erişimi sağlayan WiFi (Wireless Fidelity) teknolojisi genellikle bir erişim noktası (Access Point) ile kullanılsa da tasarsız kullanım modu da vardır. Yerel alan ağı olan WiFi'nin aksine WiMax bir kentsel alan ağıdır ve genellikle baz istasyonları üzerinden iletişim sağlanır. Ancak WiMax'in de bir tasarsız modu vardır. WiFi teknolojisinin kapsama alanı birkaç yüz metreyken, WiMAX'in menzili 40-50 km arasındadır. WiMAX IEEE 802.16 adıyla standartlaştırılmıştır.

ZigBee IEEE 802.15.4 standardıdır ve yukarıdakilerin aksine direkt olarak tasarsız ağ için geliştirilmiştir. WiFi ile kıyaslandığında oldukça kısa mesafelerde ve düşük iletim oranlarıyla çalışır. Bu teknoloji geliştirilirken düşük maliyetli ve düşük enerji tüketimi yapan ürünler elde edilmesi amaçlanmıştır. ZigBee sayesinde ofisler, tarlalar, fabrikalar gibi çeşitli ortamlarda ısı, kimyasal, hareket, su vb. algılamak gibi değişik görevlerde kullanılabilen binlerce küçük algılayıcı arasındaki iletişimin düzenlenmesi mümkün olmuştur. Bu algılayıcıların buldukları yerlerde 5-10 yıl sürelerle çalışmaları istenmektedir. Dolayısıyla düşük enerjilerle çalışmaları gerekmektedir. ZigBee sayesinde iletişim için harcadıkları enerji oldukça düşmüştür.

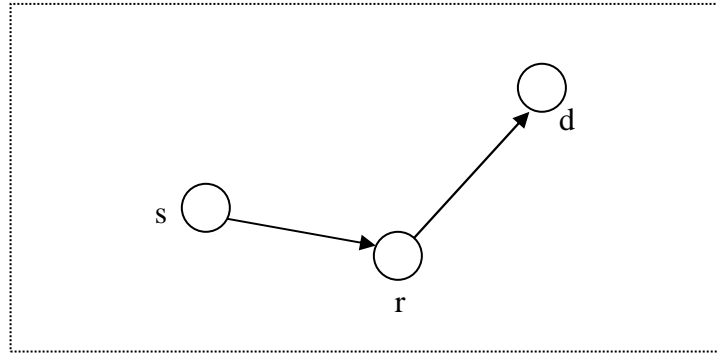
Ağda bulunan düğümlerin birbirleriyle iletişim kurmak için hangi yolu kullanacaklarının belirlenmesi işine "yol atama" (routing) adı verilir. Yol atama

stratejileri iletilen sinyallerin ulaşması istenilen alıcı sayısına göre 1- Teke İletim (Unicast) 2-Yayın (Broadcast) ve 3- Çoğa İletim (Multicast) olarak gruplandırılabilir.

1.1. Teke İletim

Teke iletim, bir verici ile bir alıcı arasındaki iletişimi tanımlayan kavramdır. Bu iletişimde belirli bir hedef düğüm vardır. Kaynak düğüm yeterli enerjisi varsa iletmek istediği mesajı hedef düğüme doğrudan iletebilir. Bunun yanı sıra, yardımcı düğümler kullanarak çok sekmeli (multihop) iletimle de amacına ulaşabilir.

Çok-sekmeli iletim yönteminde düğümler iki farklı rol oynayabilirler; 1- Kendi ürettikleri veriyi iletebilirler 2- Diğer düğümlerin ürettikleri paketleri ileterek yardımcı (yönlendirici) olabilirler.



Şekil 1.1. Çok-sekmeli İletim (s kaynak düğüm, d hedef düğüm ve r yardımcı düğüm)

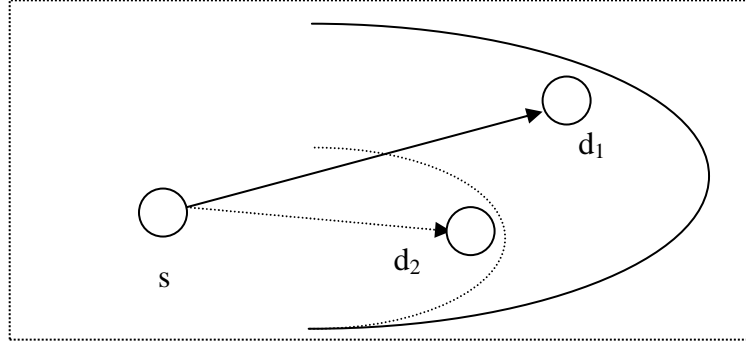
Çok sekmeli iletim sayesinde enerjiden tasarruf etmek mümkündür. Kablosuz ağlarda düğümler arası uzaklık arttıkça bir sinyali iletmek için gereken enerji miktarı da artmaktadır ve verileri doğru biçimde iletmek için gereken enerji d^α ile doğru orantılıdır. Burada d düğümler arası uzaklık ve α yol kaybı katsayısını göstermektedir. Yol kaybı katsayısı (α) genellikle 2 ve 4 arasında bir değer alır. Bir düğümün (s) d_{sd} mesafesindeki diğer bir düğüme (d) doğrudan iletim yapması için harcanacak enerji miktarı, kendisine d_{sr} ($d_{sr} < d_{sd}$) mesafesinde bulunan başka bir

düğümün (r) yardımıyla yapacağı iletimde harcanacak enerjiden daha fazla olma olasılığı vardır. Başka bir deyişle, harcanacak enerji miktarını c ile gösterirsek, $P \{ c(s, d) > c(s, r) + c(r, d) \} > 0$ olabilir. Çok sekmeli iletim, enerji tasarrufu sağlamanın yanı sıra tek sekmede ulaşmanın mümkün olmadığı düğümlere ulaşım sağlamanın bir yoldur.

1.2. Yayın ve Çoğa İletim

Yayın, bir ağ içerisindeki bir düğümden diğer tüm düğümlere veri gönderilmesiyle sağlanan iletişimi tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Bu durumda sadece bir kaynak düğüm varken gönderilen veri ağa bağlı bulunan tüm düğümlere ulaşmış olur. Çoğa Gönderim ise ağda bulunan bir veya daha fazla kaynak düğümden bir düğümler kümesine veri gönderilmesiyle sağlanan bir iletim modelidir.

Kablosuz ağlar yayın/çoğa gönderim açısından kablolu ağlardan farklıdır ve kendilerine özgün avantajları/dezavantajları bulunmaktadır. Kablosuz ağlarda antenden iletilen radyo sinyali her tarafa yayılır. Bu nedenle kablosuz ağlarda bir girişim (interference) problemi vardır. Ancak bu problem çoğa iletimde veya yayında yapılan bir iletimin tek bir komşu yerine kapsama alanındaki bütün komşulara ulaşması amaçlanıyorsa bir avantaja dönüşür. Bu özel duruma “Kablosuz Yayın Avantajı” adı verilmektedir [4]. Bu şekilde hem enerji hem de gecikme açısından başarıyı artırmak mümkündür. Kablosuz ağlarda düğümler arasında fiziksel bir bağlantı bulunmamakta ve bu sebeple bağlantı kavramı sinyalin iletim gücüne dayanmaktadır. Bu sayede bir iletilen iletim gücünü biraz daha artırarak daha fazla alıcıya ulaşabilir. Bu da enerji verimli çoğa gönderim yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır.



Şekil 1.2. Kablosuz Yayın Avantajı (s kaynak düğüm, d_1 ve d_2 alıcı düğümler)

Çeşitleme (diversity), kablosuz ortamda aynı verinin değişik tekrarlarının birbirinden bağımsız yollarla alıcı düğüme gelmesi ve alıcıda orijinal sinyalin tekrar oluşturması sayesinde elde edilen kazançta verilen addır. Uzaysal çeşitleme, frekans çeşitlemesi, zaman çeşitlemesi ve açı çeşitlemesi gibi farklı türleri vardır. Kablosuz ortamın sağladığı avantajlardan biri 'uzaysal çeşitleme' dir. Çok sekmeli iletimde düğümlerin aynı mesajı birden çok defa duyma şansları vardır ve düğümler farklı yerlerden aldıkları sinyalleri birleştirerek daha güçlü bir sinyal elde edebilirler. Bu şekilde düğümlerin farklı yerlerden gelen sinyalleri kullanmasına uzaysal çeşitleme adı verilir. Uzaysal çeşitleme işbirlikli iletimin bir çeşididir.

1.3. En Kısa Yol Bulma ve Kapsayan Ağaç Algoritmaları

1.3.1. En Kısa Yol Bulma Algoritmaları

İnternetin ilk yaygınlaştığı yıllarda, kablolu ağlarda teke iletimde ana hedef en az sekme (hop) ile hedef düğüme ulaşmaktı. Sinyalin az zayıfladığı, kesintilerin olmadığı bu ağlarda amaç paketlerin ağı mümkün olduğu kadar az meşgul etmesiydi. Daha sonra sıkışıklığı azaltmak amacıyla bağlantılarda bekleyen paket miktarını göz önüne alan yöntemler ortaya çıktı.

Kablosuz ağlarda ise durum biraz farklıdır. Kablosuz ağlarda düğümler arasında fiziksel bir bağ yoktur. Bunun yanı sıra iletilen sinyaller birçok engelle karşılaşarak zayıflayabilirler. Sinyal seviyesi her an gerekli seviyenin altına düşebilir ve kesintiler olur. Dolayısıyla kablosuz ağlarda problem en güçle ve/veya az kesinti ihtimaliyle sinyalleri iletme problemine dönüşür.

Haberleşme ağlarında her bağlantıda iletimin belli bir masrafı vardır ve çok adımlı iletimde toplam masraf yol üzerindeki bağlantıların masraflarının toplamı olarak ifade edilebilir. Bu durumlarda en az masraflı yol için genellikle Bellman-Ford ve Dijkstra gibi en kısa yol algoritmaları kullanılmaktadır.

Bu algoritmalar ağlıklı (weighted) çizgeler üzerinde çalıştırılır. Üzerinde çalıştığımız problemde çizge ağlıkları sinyallerin iletim masrafıdır (c ile gösterilmiştir). Kaynak düğümden hedef düğüme olan yolun ağlığı masrafların toplamına eşittir. İnternette en basit yol masrafı her bağlantı için 1'dir, bu sayede en az sekme ile alıcıya ulaşılır. Sıkışıklığı azaltmak amacıyla bağlantıda iletmek üzere bekleyen paket sayısı masraf olarak verilebilir. Kablosuz ağlarda ise enerji verimli iletim amacıyla bağlantıda iletim için gereken güç miktarı masraf olarak seçilir. İleride göreceğimiz gibi kablosuz ağlarda kesinti ihtimali de masraf olabilir.

Bahsedilecek olan Dijkstra ve Bellman-Ford algoritmalarında rahatlatma (relaxing) adı verilen bir teknik kullanılmaktadır. Çizgede bulunan her düğüm v için, kaynak düğüm s 'den v düğümüne olan en kısa yol ağlığının üst sınırını belirtmek için $d(v)$ değişkeni tanımlanmıştır. Bu $d(v)$ değişkenine en kısa yol tahmini de denilebilir. Ayrıca en kısa yolu belirlerken kullanılacak olan her düğümün kendisinden önce gelen düğümü tuttuğu $p(v)$ değişkeni kullanılmıştır.

Düğümlerin $p(v)$ özelliklerini güncelleyerek en kısa yol tahminini azaltmak mümkündür. Rahatlatma tekniğinin sözde kodu aşağıda verildiği gibidir.

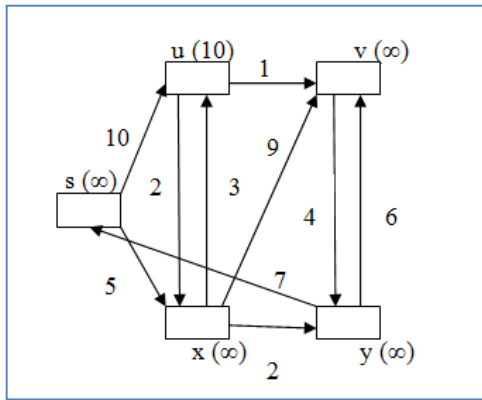
Rahatla [3]

1. **if** $d(v) > d(v) + c(u, v)$ **then**
2. $d(v) = d(v) + c(u, v)$
3. $p(v) = u$
4. **end if**

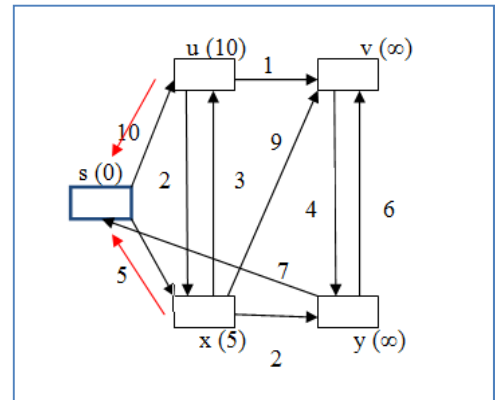
Dijkstra algoritması kaynak düğümünden diğer tüm düğümlere giden en kısa yolları bulur. Algoritmanın sonunda kökü kaynak düğüm olan en kısa yol ağacı ve kaynak düğümünden diğer düğümlere olan en kısa yolların uzunluklarından oluşan S vektörü elde edilir. Düğümlerin komşularının bulunduğu vektörler Adj ile gösterilmiştir.

Dijkstra Algoritması [3]

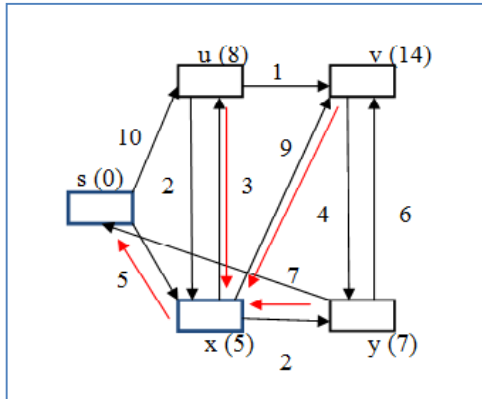
1. **for** $v, \forall v \in G$ **do**
2. $d(v) = \infty$
3. $p(v) = \text{tanımsız}$
4. **end for**
5. $d(s) = 0$
6. $S = \emptyset$
7. $Q = \{v\}, \forall v \in G$
8. **while** $Q \neq \{\emptyset\}$ **do**
9. $u = \text{argmin}_{v \in Q} \{d(v)\}$ sağlayan n düğümünü bul
10. u düğümünü Q kümesinden çıkar $Q = Q - \{u\}$
11. $S = \{S, u\}$
12. **for** $v, \forall v \in \text{Adj}(u)$ **do**
13. Rahatla(u, v, c)
14. **end for**
15. **end while**



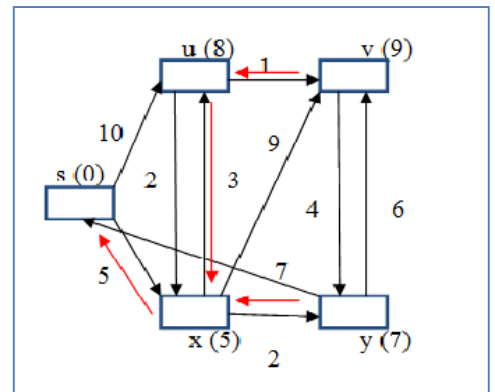
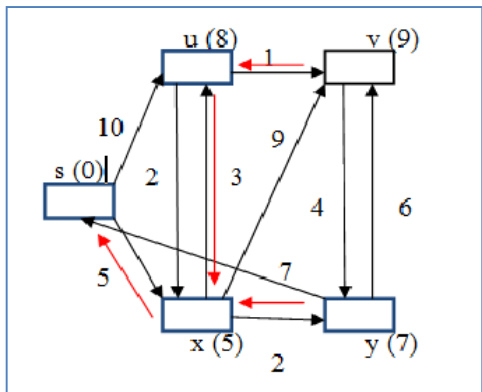
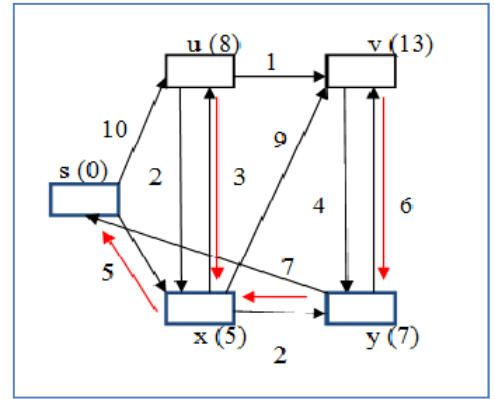
Başlangıçta tüm düğümlerin masrafı ∞ olarak belirle.



Kaynak düğüme (s) komşu olan düğümlere Rahatla yöntemini uygula.



s'e en yakın düğümü seç (x) ve komşularına Rahatla yöntemini uygula. Masraf güncellemelerini yap. Diğer düğümler için tekrar et.



Şekil 1.3. Dijkstra Algoritması ve Rahatlatma Tekniği

Burada ilk olarak çizgeye dahil olan tüm düğümlerin kaynağa olan en kısa yol uzunlukları sonsuz ve $p(v)$ özelliği tanımsız olarak belirlenmiştir. Daha sonra çizgeye dahil olan tüm düğümlerin bulunduğu Q kümesi boş küme olana kadar kaynak düğüme uzaklığı en kısa olan düğüm bulunarak S kümesine eklenmiş ve Q kümesinden çıkartılmıştır. 12-14. adımlar arasında rahatlatma tekniği kullanılarak u düğümünün komşularından bulunan en kısa yol ağırlığını azaltan düğüm olup olmadığı kontrol edilmektedir. Dijkstra algoritmasının en kötü durumda çalışma zamanı $O(E + N \log N)$ ile gösterilir. Burada E kenar (bağlantı) sayısı, N düğüm sayısıdır.

Dağıtık veya merkezi olarak uygulanabilen Bellman-Ford Algoritması ağırlıklı çizgeler üzerinde bir kaynak ve bir hedef düğüm arasındaki en kısa yolu bulur. Algoritmanın karmaşıklığı kenar sayısı kadardır, $O(E)$. Sözde kodu aşağıda verilmiştir.

Bellman-Ford Algoritması [3]

1. **for** $v, \forall v \in G$ **do**
2. $d(v) = \infty$
3. $p(v) = \text{tanımsız}$
4. **end for**
5. $d(s) = 0$
6. **for** $i = 1$ to $|G|$ **do**
7. **for all** $(u, v) \in G$ **do**
8. Rahatla(u, v, c)
9. **end for**
10. **end for**
11. **for all** $(u, v) \in G$ **do**
12. **if** $d(v) > d(u) + c(u, v)$ **then**
13. **return** FALSE
14. **end if**
15. **end for**

16. return TRUE

Bellman-Ford algoritması da aynı Dijkstra algoritmasında olduğu gibi işleme çizgeye dahil olan tüm düğümlerin kaynağa olan en kısa yol uzunlukları sonsuz ve $p(v)$ özelliği tanımsız olarak tanımlayarak başlar. En kısa yol bulunana kadar rahatlatma işlemi tekrarlanır. 11-14. adımlar arasında ise çizge üzerinde kaynaktan başlayan negatif ağırlıklı döngülerin olup olmadığını kontrol eder.

Bellman-Ford algoritmasının Dijkstra algoritmasından asıl farkı negatif ağırlıklı çizgelerde de çalışmasıdır.

1.3.2. Kapsayan Ağaç Algoritmaları

Ağlarda bir düğüme başlayıp birden fazla düğüme sonlanan iletimler bir kapsayan ağaç ile ifade edilebilir. Burada ağacın kökü kaynak düğümdür, dallar düğümler arası bağlantılardır ve yapraklarının her biri ayrı bir varış noktasıdır. Kablolü ağlarda yayın/çoğa iletim en küçük masraflı kapsayan ağaç problemidir. Burada toplam masraf ağaçtaki her bir dalın masrafları toplamıdır ve bu problemin en iyi çözümü bilinmektedir. Kablosuz ağlarda ise bağlantı kavramı iletim gücüne bağlı olduğu için bu problem cihazlar için iletim sırası ve iletim gücünü bulmaya dönüşür. Bu problem için en sık kullanılan algoritmalar Prim ve Kruskal algoritmalarıdır. Ağdaki tüm düğümleri kapsayacak şekilde oluşturulabilecek en küçük masraflı ağacı oluşturmak için gerekli bağlantı kümesini, toplam maliyetin en aza indirgenmesini göz önünde tutarak bulurlar.

Prim algoritmasının en kötü durumda karmaşıklığı $O(N^2)$ 'dir, burada N düğüm sayısıdır. Sözde kodu aşağıda açıklanmıştır.

Prim Algoritması[3]

1. Başlangıçta, herhangi noktayı ağacı oluşturmaya başlamak için seç (veya kaynak düğümü belirle).
2. Oluşturulan ağaca eklemek için, şu ana kadar oluşturulmuş ağaç üzerinden erişilebilen ve daha önceden ağaca katılmamış olan en küçük ağırlıklı bağlantıyı seç.
3. Eğer bu bağlantının ağaca katılması, bir çevre (mesh/loop) oluşmasına sebep olmuyorsa, ağaca ekle.
4. Ağaçtaki bağlantı sayısı $(N-1)$ 'e ulaşana kadar ikinci adıma geri dön.

Kruskal algoritması ise en kötü durumda $O(E \log N)$ karmaşıklığıyla çalışır. Burada E çizge üzerindeki kenar sayısı, N ise düğüm sayısıdır.

Kruskal Algoritması[3]

1. Başlangıçta ağacımız hiç bağlantı içermez.
2. Daha önceden ağaca katılmamış en küçük ağırlıklı bağlantı seçilir.
3. Eğer bu ayrıtın ağaca katılması, bir çevre oluşmasına sebep olmuyorsa ağaca katılır.
4. Ağaçtaki ayrıt sayısı $(N-1)$ 'e ulaşana kadar ikinci adıma geri dönülür.

Bu iki algoritmada çalışmaları sonucunda aynı kapsama ağacını bulurlar. Aralarındaki fark; Prim algoritmasının eklenecek kenarın ağaca bağlı olmasını istemesi, buna karşılık Kruskal algoritmasında kenarların aralarında bağlantı olup olmadığına bakılmaksızın eklenmesidir.

1.4. Kablosuz Ağlarda Yol Atama

Kablosuz ağlar ile ilgili pek çok yol atama yöntemi önerilmiştir. Burada en çok amaçlanan kavram enerji verimliliğidir. Kablosuz ağlarda her düğümün bireysel ve

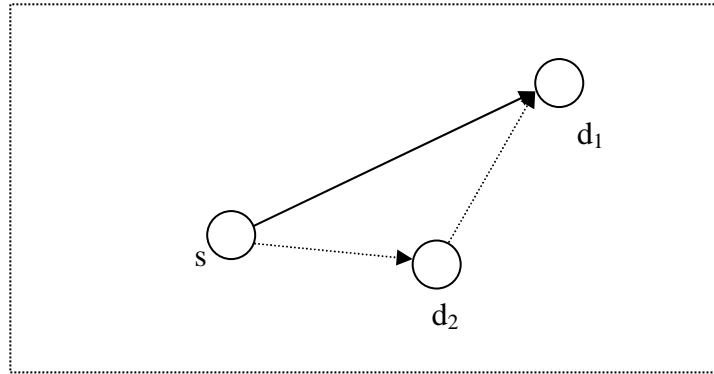
kısıtlı enerji kaynağı bulunmaktadır ve ağ ömrü enerji kaynaklarına bağımlı bir kavramdır. Ağ ömrü için birçok tanım yapılmış ve bu tanımlara göre de kablosuz ağ ömrünü uzatmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda genellikle ağ ömrü, enerjisi ilk biten düğümün enerjisinin bitme süresi olarak tanımlanmıştır. Bu tanım kablosuz ağlar için karamsar bir yaklaşım olmasına rağmen (düğümleden birinin enerjisi bitse bile diğer düğümler arasında iletişim sağlanmaya devam edebilir) basitlik sağlaması nedeniyle sık kullanılmıştır. Ağ ömrünün yanında toplam enerji harcaması, gecikme, kesinti ihtimali gibi ölçütlerin de azaltılması amaçlanmıştır. Örneğin belli bir iletim gücüne karşılık toplam sürenin veya kesinti ihtimalinin en aza indirgenmesi de enerji verimliliği sağlar.

[5]'in yazarları sekme mesafesini kısaltarak enerjiden tasarruf etmek için çok-sekmeli iletimi kullanmak üzerine bir çalışma yapmıştır. Burada bağlantı masrafı olarak o bağlantıdan verilen veri hızında iletim yapabilmek için gereken güç miktarı seçilmiştir. Bu çalışma bağlantı temelli trafik için yapılmıştır (ör. Telefon). Aramaların başarılı olma ihtimalini artırmak için o bağlantı üzerinde kullanılabilir kaynak (ör. Kanal) miktarı bağlantı masrafına eklenmiştir. Ağ ömrünü artırmak amacıyla da o bağlantıdaki iletilen düğümün artı kalan enerjisi fiyata dahil edilmiştir.

Kablosuz yayın içinse, ağda bulunan bir düğümün kapsama alanını genişletmek için sinyal iletiminde harcadığı enerji miktarını arttırabileceği veya çok-sekmeli (multi-hop) iletim yöntemini kullanabileceği gerçeğine dayanarak [6] çalışmasında en küçük kapsayan ağaç problemini çözmeye yönelik bir algoritma olan Prim algoritmasının değişik biçimleri olan Broadcast Incremental Poker (BIP) ve Multicast Incremental Power (MIP) algoritmaları önerilmiştir. Bu algoritmalarda, enerji verimli yayın/çoğa gönderim ağacı (kaynak düğüm, hedef düğümler) oluşturulmaktadır. Yayın/çoğa gönderim ağacı oluşturulurken düğümler bir iletimle daha fazla düğüme ulaşabilmek için iletim güçlerini arttırarak enerji tasarrufu yapıp yapamadıklarını kontrol ederler ve yeni düğüm ağaca eklenir. Örneğin kaynak düğüm s ve hedef düğümler kümesi $\{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$ olsun. Başlangıçta ağaç sadece kaynak düğüm olan s 'den oluşmaktadır. Daha sonra s 'in en az güç harcayarak

ulaşabileceği düğüm belirlenir (d_1 olsun) ve ağaca eklenir. Bu noktada ilerlemek için iki seçenek vardır; ya s iletim gücünü arttırarak kapsama alanına ikinci bir düğüm daha ekleyecek, ya da d_1 henüz ağaçta olmayan ve kendisinin en az güç harcayarak ulaşabileceği düğüme iletim yapacaktır. Yazarlar bu yöntemle enerji verimliliğinin sağlandığını çalışmalarında göstermiştir fakat bu yöntem her zaman en düşük enerji ile sonuçlanmaz. Kablosuz ağlarda çoğa gönderim probleminin zor bir problem olduğu [7]'de ispatlanmıştır. Bazı durumlarda iletilen sinyalin uğradığı doğrusal olmayan sönmüleme sebebiyle birçok kısa sekme ile iletim uzun tek bir sekme üzerinden yapılan iletimden daha az enerji harcayabilir. Ayrıca çok sekmeli iletimde bir düğümün aynı sinyali birkaç kere alıp bunları birleştirerek uzaysal çeşitliliği sağlaması mümkündür.

İşbirlikli iletimde konusunda, [8]'de “Kablosuz Yayın Avantajı” kullanılarak bir işbirlikli enerji verimli çok-sekmeli yayın metodu önerilmiştir. Kablosuz ağlarda veri iletiminin başarılı sayılması için alınan sinyal gücünün belirli bir eşik değerinin üstünde olması gerekmektedir fakat alınan sinyal gücü eşik değerinin altında olsa bile düğümler tarafından toplanabilir ve değerlendirilebilir.



Şekil 1.4. İşbirlikli İletim (s kaynak düğüm, d_1 hedef düğüm ve d_2 yardımcı düğüm)

Önerilen metotta ağda bulunan düğümlerin her bir iletimde duyduğu sinyalleri toplayabildiği ve bu sinyalleri birleştirerek iletilen veriyi güvenilir biçimde aldığı varsayılmaktadır. Yazarlar bu varsayıma dayanarak kablosuz ağ ömrünü uzatmak

üzerine de bir çalışma yapmışlardır [9]. Önerilen çözüm hedef düğümler için iletim sırasını ve iletim güç seviyesini belirlemektedir. Ağda yük dengesinin sağlanması sonucu belirlenen güç seviyeleri tüm düğümlerin enerjilerinin eş zamanlı olarak bitmesini garantilemektedir. [8] ve [9]'da önerilen çözümler için düğümler arasında sıkı bir eşzamanlılığa ihtiyacı yoktur, bu da uygulamada kolaylık sağlamaktadır. Kablosuz ağlarda yayın ağaçlarıyla işbirlikli iletim üzerine yapılan çalışmalardan bir diğeri de enerji tasarrufu için birkaç düğümün işbirliği yaparak aynı anda verileri ilettiği [10]'dur. Ayrıca [11] - [18]'de eşzamanlı iletimlerle ve en iyi işbirlikli yolu bularak enerji verimliliği sağlanan bir çalışmadır. Düğümlerin hangi sırayla iletim yaptığında toplam en az enerji harcayarak iletim yaptığını bulma problemi en kısa yol bulma problemine dönüştürülerek çözülmüş ve her düğümün iletim için gerekli enerjiyi kendisinin dinamik olarak belirlediği kabul edilmiştir. Yakın zamanda yapılan çalışmalardan biri olan [12] ise fiziksel katmanda işbirlikli çeşitlemeyi, ağ katmanında ise çok-sekmeli iletimi kullanarak en az enerjili yol atama üzerinedir. Yol atama için klasik Bellman-Ford algoritması temel alınmıştır. [13]'te kullanılan teknikte bir düğüme hiçbir düğümün tek başına ulaşamadığı durumda düğümlerin beraber iletim yaparak ulaştığı görülmüştür. Buradaki temel fikir Çoğa-Bir (many-to-one) iletimdir. Ağda bulunan düğümler liderler ve liderlere bağlı düğümler olarak alt parçalara bölünürler. Düğümler liderlerinin gönderdiği sinyalin kopyalarını diğer bir lidere iletirler ve sonuçta ağın kapsama alanı genişlemiş olur. Çoğa-Bir iletimi temel olarak yapılan bir diğer çalışma [14]'tür. Yazarlar, düğümlerin dinamik olarak komşu düğümleriyle beraber yerel birlikler kurarak işbirlikli iletimle paketlerin iletimini yaptığı işbirlikli yol atama metodunu incelemişlerdir. Başarım kistası olarak enerji ve gecikme süresini kabul eden çalışmada standart Dijkstra en kısa yol algoritması kullanılmıştır. Çoğa-Bir iletimin gerçekleşmesi için düğümler arasında gelişmiş eşzamanlı (faz eşlemeli) iletim gerektiği için uygulaması zor bir yöntemdir. [15]'te birden çok kaynaktan birbirinden farklı mesajların ağdaki bütün düğümlere iletilmesi çalışılmıştır. Kaynak düğümler dışındaki diğer düğümler hem yardımcı hem de hedef düğüm olarak rol oynarlar. Önerilen protokol dağıtık ve çok aşamalıdır. Zaman dilimlerine göre aşamalara ayrılmış olan protokol eş zamanlı iletim gerektirmektedir. Ağ boyutu arttıkça sinyallerde çakışma görülme olasılığı da artmaktadır.

1.5. Kablosuz Ağlarda Kanal Durumu ve Kesinti (Outage) Kavramı

Önceki bölümde anlatılan çalışmalarda anlık kanal durumunun bilindiği ve hatasız iletim yapıldığı varsayılmıştır. Fakat tasarsız ağlarda sabit bir altyapının mevcut olmaması, bant genişliğinin kısıtlı olması, kanal durumunun çok hızlı değişmesi topolojinin sık sık değişmesine ve kurulan bağlantıların bozulmasına sebep olmaktadır. Sinyal gücü ve birçok nedenden dolayı sönümlenir. Bu nedenlere örnek olarak; sönümlenme (fading), gölgeleme (shadowing), yansıma (reflection), kırılma (refraction), saçılma (scattering), kenarlardan dolayı kırılma (diffraction at edges) gösterilebilir. Bunlardan en önemlileri sönümlenme ve gölgelemedir.

Sönümlenme, iletilen sinyalin pek çok engele çarpıp yansiyarak alıcıda toplanması ve değişik gecikmelerle gelen sinyal parçalarının alıcıda birbirlerini rastgele zayıflatıp güçlendirmesi durumudur. Bu sönümlenme türü genellikle rastgele değişken veya süreç olarak modellenir. Hızlı sönümlenme olan ortamlarda kanal durumu çok kısa sürelerde değişiklik gösterir. İletimden iletme kanal durumu değişeceği için her zaman kanal durumunu bilmek kolay değildir. Kanal durumu tahmin edilse bile bu bilgiyi kullanana kadar değişebilir.

Gölgeleme, iletilen sinyalin izlediği yolun karşılaştığı engeller tarafından değişmesidir. Genellikle yavaş sönümlenmeye sebep olur. Yavaş sönümlenmede kanal durumu kullanılan periyoda göre kabaca tahmin edilebilir.

Kablosuz ağlarda verinin başarılı olarak iletilmesi düğümler tarafından alınan sinyalin Sinyal/Gürültü Oranının (Signal to Noise Ratio - SNR) belirli bir eşik değerinin üzerinde olmasına bağlıdır. SNR'ın eşik değerinin altına düşmesi durumuna “Kesinti (Outage)” adı verilir. Kesinti kablosuz ağlarda en sık rastlanan hata sebebidir. Bu yüzden hızlı sönümlenme olan ortamlar üzerine yapılan çalışmalarda başarımların kistası olarak kesinti kullanılmaktadır. Yavaş sönümlenmeli ortamlarda ise pek tercih edilmemektedir.

Çeşitlemeler (uzay, zaman, işbirlikli, iletim vb.) kanal sönümlemesi yüzünden oluşan kesintiyle başa çıkmanın iyi bir yoludur. [16]'da kuvvetlendir-ve-ilet (Amplify-and-forward) ve çöz-ve-ilet (Decode-and-forward) gibi sabit ve kanal durumuna bağlı olan seçimli röleleme protokolleri çalışılmıştır. Kuvvetlendir-ve-ilet yönteminde düğümler aldıkları sinyali beraberinde içerdiği gürültüyle sadece güçlendirerek iletirler. Çöz-ve-ilet yönteminde ise düğümler kaynaktan kodlanarak gönderilen sinyali çözüp gürültüyü temizledikten sonra tekrar kodlayarak hedef düğüme iletirler. Sönümlemeye bağlı olarak oluşan kesintiler ve kesinti olasılığının röleleme tekniklerine göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda çıkan veriler uzaysal çeşitlemenin kanal sönümlemesinin etkilerini azalttığını ve kesinti ihtimalinin kablosuz ağlarda yol atama algoritmaları için iyi bir kıstas olduğunu göstermiştir. Literatürde kesinti ihtimalini ve enerji verimliliğini başarımlı kıstası kabul eden birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan biri olan [17] - [18]'de güvenilir yol atama yapmak için algoritmalar geliştirilmiştir. Ayrıca güç tüketimi ve uçtan-uca (end-to-end) güvenilirlik ölçütleri arasındaki çekişme de incelenmiştir. Uçtan-uca güvenli yol atamasının sağlanması için ağda bulunan bütün düğümlerin iletilen veriyi doğru bir şekilde alması gerekmektedir. Aksi takdirde ağda bağlantının kopmuş olduğu kabul edilmiştir. Yalnız, [17] çalışmasında işbirlikli iletişim yoktur. Bütün alıcılar yol üzerinde kendilerinden önce gelen düğümden alırlar. [19]'da yol üzerindeki sekme sayısı arttıkça uçtan-uca kesinti ihtimalinin arttığı vurgulanmıştır ve teke iletim protokolü önerilmiştir. Yayın için ise yazarlar [20]'de bağlantı hata oranını hesaba katarak [6] için bir ilave önermişlerdir. [21] 'in yazarları en az enerji tüketimini sağlayacak röle seçimi yapan dağıtık işbirlikli bir algoritma önermişlerdir. Algoritmada kaynak ve hedef düğüm arasında hedeflenen Bit Hata Oranına (Bit Error Ratio) ulaşacak işbirlikli bağlantılar oluşturulmaktadır ve röleler çöz-ve-ilet mantığıyla çalışmaktadır. Burada baştan sona hedef hata oranı yerine her bağlantı için ayrı ayrı hedef hata oranı vardır. [22]'de kaynak düğümden hedef düğüme istenen veriyi iletmek için çok-sekmeli iletim kullanan ve her sekmede düğümler arasında yerel işbirliği yapılan bir yöntem geliştirilmiştir. Yerel işbirliği yapılırken her iletimde yerel kesinti ihtimali kısıt olarak alınmış ve böylece işbirlikli yol atamada uçtan-uca en iyileştirme sağlandığı kabul edilmiştir. Standart dağıtık

Bellman-Ford algoritması kullanılarak yerel işbirlikleriyle iletimde kullanılan ortalama enerjiyi azaltmak mümkün olmuştur. [23], [24], [25] çalışmalarında güç yönetimi ve kesinti ihtimali göz önünde bulundurularak işbirlikli yol atama üzerine çalışılmıştır. [22]'de enerji-farkında bir algoritma tarafından bulunan en iyi yol üzerindeki yardımcı düğümler için güç yönetimi araştırılmıştır. [25]'te işbirlikli bağlantı kurmak için en iyi bağlantı kalitesine sahip olan düğümler röle olarak seçilmişlerdir. Yazarlar başarımlarını değerlendirmesi yapılırken iletimde kullanılan sekme sayısı ile Bit Hata Oranını kullanmışlardır. Yazarlar [26] çalışmalarında ise sinyal çakışmalarının başarımlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Önerilen iletim şemasında aynı anda yapılan çoklu iletime sadece karışan sinyal alıcı tarafından bilindiğinde izin verilmektedir. Karışan sinyal alıcı tarafından bilindiğinde bu sinyalin gelen sinyalden çıkarılarak orijinal sinyale ulaşmak mümkündür. Sonuçta birden fazla düğümün aynı anda iletim yapabildiği bir yöntem geliştirilmiş ve verilerin başarılı olarak iletilmelerinde artış gözlenmiştir. [27] çalışmasında iki aşamalı işbirlikli çoğa gönderim protokolü önermişlerdir. Birinci aşamada kaynak düğüm hedef düğümlerden bazılarına mesajı iletir. İkinci aşamada ise mesajı alan hedef düğümler mesajı henüz almamış olan düğümlere işbirlikli olarak mesajı iletirler. Önerilen protokolle anlamlı bir Shannon kapasitesi kavramı çıkarılmıştır. Fakat bu çalışmada düğümler için bireysel güç kısıtlaması yerine genel bir güç kısıtı vardır. Ayrıca yol kaybı hesaba katılmamıştır. Bunlar gerçekçi olmayan varsayımlardır. [28]'de en az enerji probleminin en iyi çözümünü bulmak için diğer çalışmalardan farklı bir yaklaşım kullanılmıştır. Minimum Power Cooperative Routing (MPCR) adlı bir algoritma önerilmiştir. MPCR algoritması doğrudan iletim ve işbirlikli iletim bloklarının kombinasyonlarını kullanarak belirli bir başarı oranına sahip uçtan-uca iletim için gerekli enerji miktarını en aza indirmeyi hedeflemektedir. Doğrudan iletim blokları noktadan noktaya iletimlerden oluşur. İşbirlikli iletim blokları ise yardımcı düğümler ile oluşturulmaktadır. Bu blokların uygun yerlerde ardı ardına kullanılmasıyla kaynak düğümden hedef düğüme giden yol oluşturulur. Uçtan uca iletim için kullanılan toplam enerji ise bu yol boyunca kullanılan toplam enerji miktarıdır. En azaltma problemini çözmek için dağıtık en kısa yol algoritması kullanılmıştır ve ağ topolojisindeki olasılıklı değişikliklerden haberdar olmak için her

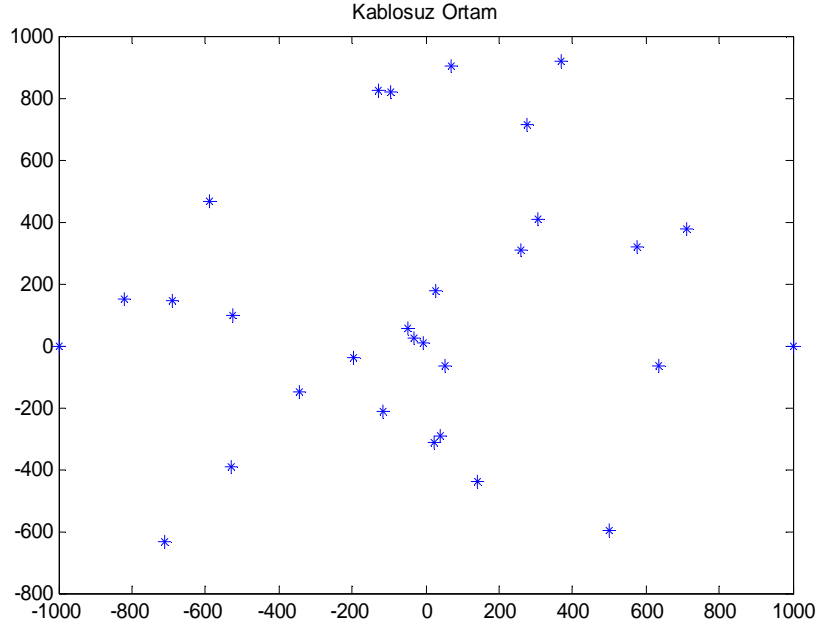
zaman diliminde bütün düğümler komşularına paket yayını yapmaktadır. Yapılan yayın sayesinde kablosuz düğümlerin hareketliliğinden kaynaklanan kesinti olasılığı azaltılmış olur.

Yukarıda anlatılan çalışmalarda kesinti ihtimali göz önünde bulundurulsa bile asıl amaç iletim sırasında harcanan enerji miktarını en aza indirmektir. Bu tezde ise kablosuz ağdaki uçtan-uca kesinti ihtimalini en aza indirmek ve ağdaki hedef düğümlerin iletilen sinyali doğru alma olasılığını arttırmak hedeflenmiştir. Çok-sekmeli teke iletim ve yayın stratejileri üzerinde, başarımlı ölçütü kesinti ihtimali kabul edilerek, çalışılmıştır. Ağda bulunan tüm düğümlerin sabit iletim gücü olduğu varsayılmıştır. Her iki problem için de öncelikle en iyi çözümler bulunmuştur. Bu çözümlerde Dal ve Sınır Yöntemi (Branch&Bound Method) kullanılmıştır. Daha sonra bir takım algoritmalar önerilmiştir. Bu algoritmalar bulunan yollar üzerinde işbirlikli iletim yaparak kesinti ihtimalini en aza indirmeyi amaçlarlar. Önerilen algoritmalar için benzetimler yapılmış ve en iyi sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır.

Tezin geri kalan kısmı şu şekildedir; 2. bölümde üzerinde çalışılan sistem modeli hakkında bilgi verilmiş, 3. bölümde teke iletim stratejileri, 4. bölümde yayın stratejileri anlatılmış ve 5. bölümde ise elde edilen sonuçlar ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

2. SİSTEM MODELİ

Bu tez çalışmasında sistem modeli dairesel bir alana rastgele yerleşmiş N tane düğümden oluşmaktadır ve Şekil 2.1.'de örnek kablosuz ağ topolojisi görülmektedir.



Şekil 2.1. Kablosuz Ortam Topolojisi

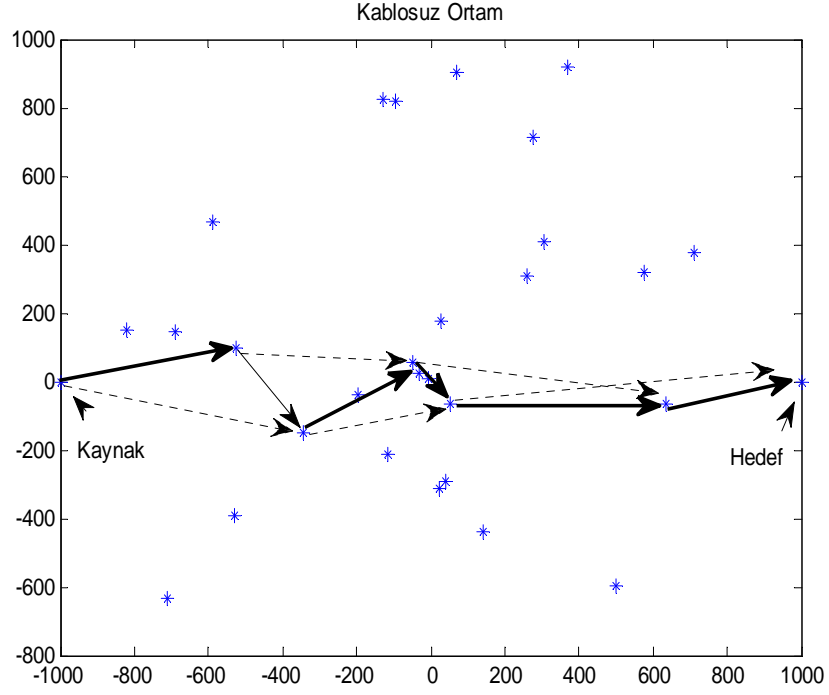
Ağda bulunan tüm düğümlerin sabit güçle iletim yaptığı ve enerjilerini sadece iletim yaparken harcadıkları varsayılmıştır. Hesaplamalarda kolaylık sağlamak adına ağda meydana gelebilecek olan girişim (interference), çarpışma (collision) ve çoklu erişim gibi durumlar yok sayılmıştır. Ele alınan teke iletim stratejisi için ağda en sola kaynak düğüm, en sağa hedef düğüm yerleştirilmiştir. Yayın stratejisi için kaynak düğüm ağın merkezindeki düğüm olarak seçilmiştir ve ağdaki tüm diğer düğümlere bir mesaj ilettiği kabul edilmiştir. Ayrıca çok-sekmeli iletim yapıldığı ve ağda bulunan 1. ve N. hariç tüm düğümlerin iletim sırasında yardımcı düğüm rolü oynayabildikleri kabul edilmiştir. Bu sayede düğümlerin aynı mesajın birden çok kopyasını alması ve iletimdeki güvenilirlik artar. Röleleme (relaying) tekniği olarak çöz-ve-ilet

seçilmiştir. Böylece sinyallerde bulunan gürültüler elenerek sadece mesajın iletilmesi amaçlanmıştır.

Kanal modelinin yol kayıplı ve hızlı sönümlemeli olduğu kabul edilmiştir. Ağda bulunan düğümlerin yerleri sabit kabul edilmiştir. Düğümlerin yerleri ve yol kaybı değerlerinin karar mekanizması/mekanizmaları tarafından bilindiği varsayılmıştır. Hızlı sönümlemeli kanal modeli olarak Rayleigh Sönümlemesi seçilmiştir. Rayleigh sönümlemesi temelde çevrede bulunan ağaç, insan, bina vb. gibi etkenlerden kaynaklanan çok yollu (multipath) sönümlemedir. Sinyal gittiği farklı yollar sebebiyle alıcıya ulaşana kadar öngörülemezliklere uğrayabilir. Bu etkiler toplamda iletilen sinyal gücü üssel bir değişken (1 ortalamalı) ile çarpılarak modellenmiştir. Bu değerlerin bir iletim süresince sabit kaldığı varsayılmıştır. i düğümünden j düğümüne yapılan bir iletim için g_{ij} yol kaybı, h_{ij} Rayleigh sönümlemesi olsun. i ve j düğümlerinden n düğümüne yapılabilecek iletim oranı için Shannon Modeli kullanılmıştır. Bu oran aşağıda gösterilmiştir.

$$W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{g_{i,n} h_{i,n} P_i + g_{j,n} h_{j,n} P_j}{N_0 \cdot W} \right) \text{ bps} \quad (2.1)$$

İşbirlikli iletimi sağlamak için düğümlerin kendilerinden önce iletim yapmış olan düğümlerin iletimlerinden faydalanabildiği kabul edilmiştir. Bu çalışmada düğümlerin faydalanabilecekleri iletim sayısını 2 olarak kısıtladık. Yani her düğüm sadece kendisinden önce iletim yapmış olan 2 düğümün sinyallerini alıp bunları birleştirerek aldığı sinyal gücünü arttırabilir. Şekil 2.2.'de işbirlikli iletimin bir örneği gösterilmiştir. Burada katı çizgiler asıl iletimleri, noktalı çizgiler ise diğer iletimlerden alınan sinyal gücünü temsil etmektedir.



Şekil 2.2. İşbirlikli İletim Örneği

P iletim gücü, N_0 gürültü güç spektral güç yoğunluğu (Watt/Hz) ve W bant genişliğidir. i düğümünün iletimlerinden faydalandığı düğümler kümesi O_i ile gösterilmektedir. Buna göre i düğümünde toplanan SNR aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\gamma_i = \frac{P}{N_0 W} \times \sum_{n=1}^{|O_i|} g_{n,i} h_{n,i} \quad (2.2)$$

İletim hızı hedefi olarak R_0 bps belirlenmiştir. Kanalın Shannon kapasite limiti bu değeri geçtiği takdirde iletim başarılı olacaktır. Shannon Kapasite Fonksiyonu γ SNR cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$R_0 = W \log_2(1 + \gamma) \text{bps} \quad (2.3)$$

Başarılı iletim için düğümlerde toplanan Sinyal-Gürültü Oranının belirli bir eşik değerinin (e_0) üzerinde olması gerekmektedir.

$$e_0 = \left(2^{\frac{R_0}{W}} - 1\right) \frac{N_0 W}{P} \quad (2.4)$$

Buna göre i düğümünün iletilen sinyali başarılı bir şekilde almış olma ihtimali $\left(\Pr\left(\sum_{n=1}^{|O_i|} g_{n,i} h_{n,i} > e_0\right)\right)$ aşağıdaki gibi yazılabilir [31]:

$$P_s^i(O_i) = \left(\prod_{n \in O_i} \frac{1}{g_{n,i}}\right) \sum_{j \in O_i} \frac{g_{j,i} e^{\left(\frac{-e_0}{g_{j,i}}\right)}}{\prod_{k \in O_i, k \neq j} \left(\frac{1}{g_{k,i}} - \frac{1}{g_{j,i}}\right)} \quad (2.5)$$

Kaynak düğüm için O_i kümesi boş kümedir ve bu düğümün başarılı alım ihtimali 1 olarak alınmıştır. Ağ için toplam kesinti ihtimali

$$P_o(O) = 1 - \prod_{i \in O} P_s^i(O_i) \quad (2.6)$$

olarak bulunur.

Sinyali alıcıya ulaştırmak için yapılan yol atamasında yol üzerinde bulunacak düğüm sayısını kısıtlamak gerekir. Çünkü yolda bulunan düğüm sayısı arttıkça

- 1- Enerji giderleri
- 2- İletimde gecikme
- 3- Girişim

artar. Bu sebeple yol ataması yapılırken algoritmalarda maksimum verici sayısını belirlemek için T_{\max} parametresi kullanılmıştır.

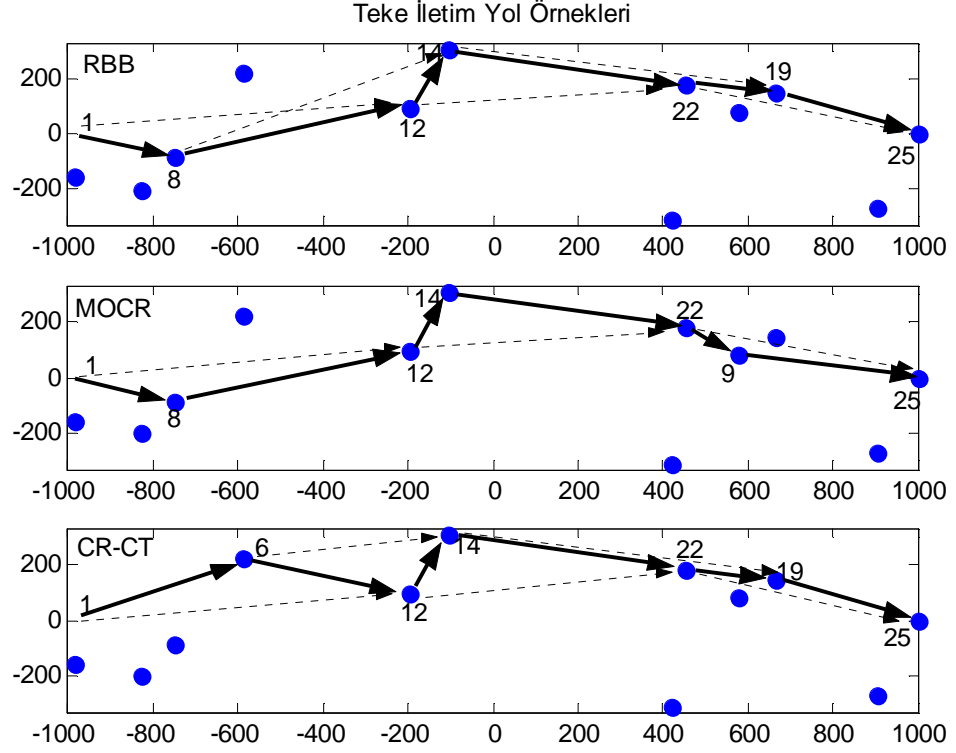
3. ASGARİ KESİNTİLİ TEKE İLETİM

Kablosuz ağların doğası gereği yol atama problemi, iletim sırası belirleme problemine dönüşmüştür. Teke iletimde yol, kaynak düğüm olan “s” düğümünden başlayarak varış düğümü olan “d” düğümüne kadar iletim yapan düğümler olarak tanımlanır. Bu kısımda anlatılacak algoritmalarda temel amaç ağın toplam kesinti ihtimalini (2.6 denklemine göre) en az yapan işbirlikli yolu bulmaktır. Bunun için ilk önce dal ve sınır tekniği kullanılarak en iyi çözüm bulunmuştur. Daha sonra ideal sonuca ulaşamayan algoritmalar önerilmiş ve başarımları en iyi çözümlerle kıyaslanmıştır. Önerilen algoritmalar bazıları sadece merkezi olarak uygulanabilmektedir. Ayrıca dağıtık olarak çalışabilen ağda kullanılan enerjiyi en aza indirmeyi amaçlayan MPCR algoritmasını [28] çalışmamıza uyarlayarak MOCR ve IMOCR algoritmaları önerilmiştir. Önerilen algoritmaların kısa açıklamaları Çizelge 3.1.’de verilmiştir.

Algoritma Adı	Kısa Adı	Merkezi/Dağıtık	En İyi	Açıklama
Dal ve Sınır Yöntemi ile Yol Atama	RBB	Merkezi	Evet	Olası iletim sıralarından oluşan arama ağacı kullanılarak en iyi çözüm bulur.
İşbirlikli Yol Atama ile İşbirlikli İletim	CR-CT	Merkezi	Hayır	İşbirlikli olarak bulunan yol üzerinde işbirlikli iletim yapar.
İşbirliksiz Yol Atama ile İşbirlikli İletim	NCR-CT	Dağıtık	Hayır	İşbirliksiz iletim yapılacağı kabul edilerek bulunan yol üzerinde işbirlikli iletim yapar.
En Az Kesinti İhtimalli İşbirlikli Yol Atama	MOCR	Dağıtık	Hayır	Doğrudan ve işbirlikli iletim bloklarını kullanarak en iyi sonuca ulaşmaya çalışır.
Geliştirilmiş En Az Kesinti İhtimalli İşbirlikli Yol Atama	IMOCR	Dağıtık	Hayır	MOCR algoritmasıyla bulunan yoldaki doğrudan iletim bloklarında da işbirlikli iletim yapılmasını sağlar.

Çizelge 3.1: Asgari Kesintili Teke İletim Algoritmaları

Şekil 3.1.'de kablosuz ağda üç farklı yol örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Teke İletim Yol Örnekleri

3.1 Merkezi Yol Atama Algoritmaları

Merkezi algoritmalarda, çalışma sırasında genel veri kaynaklarına çoklu erişim mümkündür. Verilere hangi istemcilerin erişip hangilerinin erişemeyeceğini belirleyen bir kontrol mekanizması bulunur. Merkezi yol atamalarında da aynı mantık bulunmaktadır. Ağ durumu, düğümlerin birbirlerine olan mesafeleri, iletim sırası vb. bilgiler bütün düğümler tarafından bilinir ve bir sonraki iletimi kimin yapacağına karar verilirken bu bilgilerden faydalanılır.

3.1.1 En İyi Çözüm: Dal ve Sınır Yöntemi

Dal ve Sınır (BB) kombinasyonel/tümleşik (combinatorial) problemlerin çözümü için kullanılan genel bir en iyileme yöntemidir. Sezgisel olarak çalışmaz, yani kanıtlanabilir hesaplamalar yaparak sonuca ulaşır. BB metoduyla öncelikli olarak bütün karar olasılıklarını içeren bir arama ağacı oluşturulur. BB metodunun 3 temel işlemi vardır: dallanma, sınırlama ve budama. Dallanma; olası iletim sıralarını kullanarak özyinelemeli (recursive) olarak arama ağacının oluşturulduğu izlektir. İkinci işlem olan sınırlama ise arama ağacında bulunan her dal için kesinti ihtimalinin alt ve üst sınırlarını hesaplar. Dal ve Sınır yöntemiyle en iyilemeyi sağlayan asıl işlem ise şöyle açıklanabilir: SET_x ile belirtilen herhangi bir dalın alt kesinti sınırı, SET_y ile belirtilen başka herhangi bir dalın üst kesinti sınırından büyük ise SET_x arama ağacından elenir. Yapılan bu işleme budama (pruning) adı verilir. Bu işlemlerin tekrarlanarak yapılmasıyla arama ağacı daraltılır ve en sonunda genel çözüme ulaşılır.

BB metodu ağaçtaki tüm olasılıkları inceleyip en iyi olmayan alt-ağaçları elemek için verimli bir yoldur. Ancak çok fazla olasılık bulunduğundan gerçek zamanlı kablosuz uygulamalarda kullanılamayacak kadar karmaşıktır. Bu sebeple pratik olarak kullanılabilecek algoritmalar için kıyaslama noktası (benchmark) olarak kullanılacaktır.

Çalışmamızda BB metodunu uygulayacağımız problem ağdaki kesinti ihtimalini en aza indirecek iletim sırasını bulmaktır. Çözüm için oluşturulan arama ağacı olası iletim sıralarını içerir. Örneğin ağdaki 1. düğüm kaynak, N. düğüm hedef olarak belirlenmiş olsun. Ağaç yapısı oluşturulurken (β ile gösterilmiştir) kaynak düğüm kök olarak seçilir ve dallanma izleği ile N hedef düğümüne doğru ilerlenir. Örneğin $\{1, 3, 5, N\}$ ağaç üzerinde belirlenmiş bir yol olsun. Bu yol N-4 farklı şekilde dallanabilir. $\{1, 3, 5, 2, N\}$, $\{1, 3, 5, 4, N\}$ $\{1, 3, 5, 6, N\}$ bu dallara örnek olarak gösterilebilir. Oluşturulan arama ağacının derinliği en fazla maksimum iletilen sayısı (T_{max}) kadar olabilir. Oluşturulan arama ağacının sınırlarını hesaplamak için kesinti

ihtimali hesapları yapılmıştır. Verilen bir iletim sırası O için alt kesinti sınırı (LB) ve üst kesinti sınırı (UB),

$$LB_O = \begin{cases} 1 - \prod_{i \in O} P_s^i(O_i) & \text{eğer } |O| = T_{max} \\ 1 - \prod_{i \in O} P_s^i(O_i) & \text{diğer} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$UB_O = 1 - \prod_{i \in O} P_s^i(O_i) \quad (3.2)$$

denklemlerine göre bulunur. Burada $|O|$, O kümesinin eleman sayısını göstermektedir. Eğer $|O| < T_{max}$ ise alt kesinti sınırı hedef düğüm olan N düğümünün yoldan çıkartılmasıyla (Gerçekte ağdaki uçtan- uca kesinti ihtimali her zaman için bu sınırdan daha büyüktür.) hesaplanır. Eğer $|O| = T_{max}$ ise yol tamamlanır ve alt kesinti sınırı yerine, tam kesinti ihtimali hesaplanır. Üst kesinti sınırını hesaplamak içinse yola başka düğüm eklenmediği varsayılarak, sadece O kümesine dahil olan düğümlerin iletim yaptığı kabul edilir. Yolda T_{max} adet iletim yapılmışsa alt ve üst kesinti sınırları eşit olur. $\{1, 5, 2, N\}$ dalını ele alalım. 1. düğüm kaynak, N . düğüm hedef olsun. Eğer $|O| = 3 < T_{max}$ ise bu dalın alt kesinti sınırı $\{1, 5, 2\}$ yolunun uçtan-uca kesinti ihtimaline eşit olur. Bu dal boyunca çocuklarına doğru ilerledikçe dalın uçtan-uca kesinti ihtimali büyür. Kablosuz ağın $\{1, 5, 2, N\}$ den oluştuğunu kabul ederek uçtan-uca kesinti ihtimali hesaplanırsa üst kesinti sınırı elde edilmiş olur. Üst kesinti sınırı ise kökten uçlara doğru gidildikçe küçülür. Dallanma, sınırlama, budama işlemlerinin tekrarlanarak yapılması sonucunda geriye sadece bir dal (en iyi olan) kalır ve arama sona erer. Uygulanan izleğe dal ve sınır yöntemiyle yol atama denilmiş ve Algoritma 1’de gösterilmiştir.

Algoritma 1: Dal ve Sınır Yöntemiyle Yol Atama (RBB)

1. $\beta = \{1, N\}$
2. $LB_{\{1,N\}}$ ve $UB_{\{1,N\}}$ hesapla
3. **while true do**

4. $b^* = \operatorname{argmax}_{b \in \beta} \{LB_b\}$ sağlayan dalı bul
5. **if** $LB_{b^*} = UB_{b^*}$ **then**
6. $bestbranch = b^*$ ve $minoutage = P_o(b^*)$
7. Arama bitti, **return**
8. **else**
9. **for** $\forall n \notin b^*$ **do**
10. n düğümünü b^* 'ye ekleyerek yeni bir dal oluştur
 $n: b = \{b^*, n\}$
11. (3.1), (3.2) denklemlerini kullanarak LB_b , UB_b hesapla
12. **if** $\nexists b' \in \beta$ ve $LB_b > UB_{b'}$ **then**
13. Dalı β kümesine ekle $\beta = \beta \cup b$
14. **if** $\exists b' \in \beta$ ve $UB_b > LB_{b'}$ **then**
15. Dalı buda $b' : \beta = \frac{\beta}{b'}$
16. **end if**
17. **end if**
18. **end for**
19. **end if**
20. **end while**

Algoritma 1'de; ilk olarak yol sadece kaynak ve hedef düğümleri içeren $\beta = \{1, N\}$ kümesi olarak atanmıştır. Yeni düğümleri ekleri yola ekleme işlemi yaparken karşılaştırmada kullanılacak olan alt kesinti sınırı $LB_{\{1, N\}}$ ve üst kesinti sınırı $UB_{\{1, N\}}$ değerleri hesaplanmıştır. Oluşturulan arama ağacında alt kesinti sınırı en büyük olan dal bulunur (4. satır). Eğer bu dalın alt kesinti sınırı ile üst kesinti sınırı eşit ise bu dal aradığımız yoldur ve arama sona erer; değilse dala dâhil olmayan bir n düğümü eklenerek yeni bir dal oluşturulur. Oluşturulan dalın alt kesinti sınırı, üst kesinti sınırından büyükse dal β kümesine eklenir; küçükse dal budama işlemi görür. Bu işlemler en iyi dal bulunana kadar tekrar edilir (3-15. satırlar).

3.1.2 İşbirlikli Yol Atama ile İşbirlikli İletim (CR-CT)

Merkezi olarak çalışan, en iyi olmayan bir algoritma olan İşbirlikli İletim ile İşbirlikli Yol Atama Algoritması $O = \{1, N\}$ iletim sırasıyla işleme başlar. Her adımda (2.6.) denklemine göre genel kesinti ihtimali hesaplanarak, bu ihtimali en az yapan düğüm yola eklenir. Yapılabilecek iletim sayısı T_{max} ile kısıtlanmıştır. Yolda iletim yapan i adet düğüm bulunduğu anda, yola eklenecek olan $(i + 1)$. düğüm için i adet alternatif konum bulunmaktadır. Örneğin $\{1, 5, 2, N\}$ bir yol olsun. Bu yola 4. bir düğümün eklenmesiyle (x düğümü diyelim) $\{1, x, 5, 2, N\}$, $\{1, 5, x, 2, N\}$, $\{1, 5, 2, x, N\}$ olmak üzere 3 farklı yeni yol oluşabilir. Her aday düğüm ve pozisyon için kesinti ihtimali hesaplaması yapılır. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda algoritma tamamlanana kadar $\sum_{i=1}^{T_{max}} (N - i - 1) * i$ defa kesinti ihtimali hesaplanır. Sonuç olarak algoritmanın karmaşıklığı $O(N T_{max}^2)$ olarak bulunur. Başlangıçta 1. ve N. düğümlerin diğer düğümlerden haberdar olması gerektiğinden bu algoritmayı geniş bir ağda dağıtık olarak uygulamak mümkün değildir. Algoritmanın sözde kodu Algoritma 2’de gösterilmiştir.

Algoritma 2: İşbirlikli Yol Atama ile İşbirlikli İletim (CR-CT)

1. $O = [1, N]$, $finish = 0$, $P_s = e^{-\frac{e_0}{g_{1,N}}}$, $P_{s,max} = P_s$
2. **while** $finish = 0$ yada $|O| < T_{max}$ **do**
3. $i^* = 0$
4. **for all** $i \in O^c$ **do**
5. **for** $j = 0$ to $(|O| - 1)$ **do**
6. $O' = [O [1 : j], i, O [j + 1 : |O|]]$
7. **if** $P_s (O') > P_{s,max}$ **then**
8. $i^* = i$
9. $j = j^*$
10. $P_{s,max} = P_s (O')$
11. **end if**
12. **end for**

13. **end for**
14. **if $i^* = 0$ then**
15. Yolda kesinti ihtimalinde azalma yoktur, $finish = 1$
16. **else**
17. $O = [O [1 : j^*], i^*, O [j^* + 1 : |O|]]$
18. **end if**
19. **end while**

3.2 Dağıtık Yol Atama Algoritmaları

Dağıtık olarak çalışan algoritmalarda bütün sistem karar mekanizmasına dahildir. Dağıtık algoritmalar, eş zamanlı olarak algoritmanın yaptığı işe dair kısıtlı verilerle çalışan bağımsız işlemciler tarafından gerçekleştirilir. Bu algoritmaların geliştirilmesinde ve uygulanmasındaki en büyük problem bağımsız parçaların yönetilerek istenilen sonuca ulaşılmasıdır. Kablosuz ağlarda yol atama problemi için kullanılan dağıtık algoritmalarda ağda bulunan düğümler bağımsız işlemcileri oluşturur. Düğümler ağın genel durumu hakkında bilgi sahibi olmazlar fakat kendileri ve çevreleri hakkında kısıtlı bilgiye sahiptirler. Kısıtlı bilgileriyle yerel kararlar alırlar ve sonuçta bu kararların tamamından genel sonuca ulaşırlar. Bizim bu çalışmada amacımız kablosuz ağlarda kullanılmaya hazır detaylı dağıtık algoritmalar geliştirmek değildir. Ancak önereceğimiz algoritmada bir düğüm sadece komşularının bilgilerine ihtiyaç duymaktadır ve bu algoritmadan yola çıkarak dağıtık bir protokol tasarlanabilir.

3.2.1 İşbiriksiz Yol Atama ile İşbirlikli İletim (NCR-CT)

Dağıtık algoritmaların ilk örneği olan İşbirlikli İletim ile İşbiriksiz Yol Atama algoritmasının basit bir çalışma prensibi vardır. Algoritma 3'te sözlü kodu verilmiş olan izlekte öncelikli olarak masraf ölçütüne göre en iyi işbiriksiz yolu bulur. Burada her bağlantının masrafı o bağlantıdaki kesinti ihtimalidir. Daha sonra bulunan yol üzerinde işbirlikli iletim yapılır, yani her düğüm kendisinden bir ve iki önceki

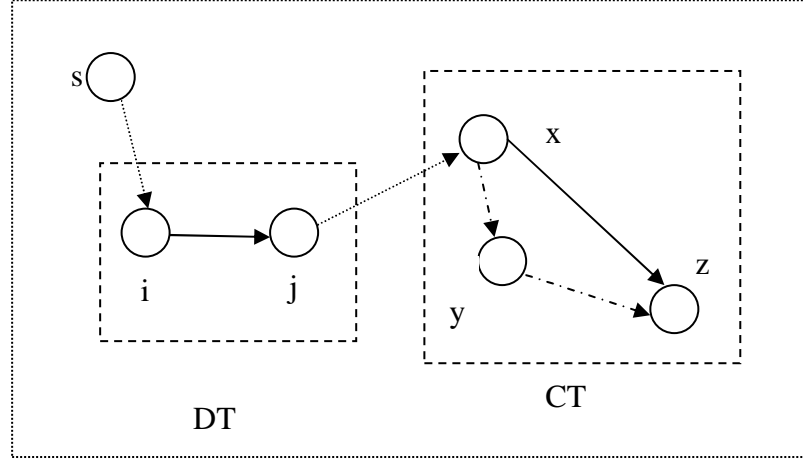
düğümün sinyallerini toplar. Burada yol uzunluğuyla ilgili bir kısıt yoktur fakat sekme sayısının oluşturduğu masrafı bağlantı masrafına dahil ederek yol uzunluğunu kısıtlamaya çalıştık. Algoritma her düğüm çifti için bağlantı masrafını $C_{i,j} = \frac{e^0}{g_{i,j}} + C_h, \forall i, j$ denkleminde hesaplar. Burada $\frac{e^0}{g_{i,j}}$ i ve j düğümleri arasında oluşturulan bağlantının yaklaşık kesinti ihtimalidir (yüksek SNR yaklaşımı). C_h sabiti ise sekme sayısı masrafı olarak eklenir. C_h bağlantı kesinti ihtimaline benzer mertebede seçilmelidir. Bellman-Ford algoritması en az masraflı yolu bulmak için uygulanabilir. $C_h = 0$ seçildiğinde yol en az kesinti ihtimali işbiriksiz yola dönüşür. İşbiriksiz yol, yol üzerinde bulunan düğümler kendilerinden önce yapılmış 2 iletimin sinyallerini kullanmalarına izin vererek işbirlikli yola dönüşür. Bu algoritmanın karmaşıklığı $O(N^2)$ 'dir.

Algoritma 3: İşbirlikli İletim ile İşbiriksiz Yol Atama (NCR-CT)

1. Masraf matrisi olan $C_{i,j} = \frac{e^0}{g_{i,j}} + C_h, \forall i, j$ kullanılarak dağıtık Bellman-Ford algoritması uygulanır ve iletim sırası O bulunur.
2. Yola dahil olan her düğüm kendisinden önce iletim yapmış olan iki vericinin sinyallerini kullanır.

3.2.2 En Az Kesinti İhtimali İşbirlikli Yol Atama (MOCR)

[26] çalışmasında önerilen enerjiyi asgariye indirmeyi başarımlı ölçütü olarak kabul eden En Az Enerjili İşbirlikli Yol atama (MPCR) algoritmasını kendi çalışmamıza kesinti ihtimalini başarımlı ölçütü olarak En Az Kesinti İhtimali İşbirlikli Yol Atama Algoritmasına uyarladık. Bu algorithmada da öncekilerde olduğu gibi bir düğümün sadece kendisinden önce iletim yapmış iki düğümün sinyallerinden faydalanabileceğini kabul ettik. Bu algorithmada iki çeşit iletim yöntemi kullanılmaktadır: 1. Doğrudan iletim 2. İşbirlikli iletim.



Şekil 3.2. Doğrudan İletim (DT) ve İşbirlikli İletim (CT) Blokları

Şekil 3.2.'de Doğrudan iletim (i, j) düğümleri arasındaki bağlantı ile gösterilmiştir. Burada i kaynak düğüm, j ise hedef düğümdür ve noktadan- noktaya iletim gerçekleşmiştir. İşbirlikli iletim ise x hedef düğümünün, z kaynak düğümüne ulaşmak için y yardımcı düğümünü kullanması ile gerçekleşir. (x, z), (x, y) ve (y, z) çiftleri arasındaki bağlantılarla gösterilmiştir. Optimal yol doğrudan iletim ve işbirlikli iletim bloklarının uç uca eklenmesi ile oluşabilir. İşbirlikli iletimin yol masrafı fazladan bir bağlantı oluşturulduğundan doğrudan iletimin masrafından daha büyüktür. Masraf matrisi aşağıdaki denkleme göre oluşturulabilir.

$$C_{i,j} = \max \left\{ 1 - P_s^j(\{i\}) + C_h, \max_k \{ 1 - P_s^j(\{i,k\}) + 2C_h \} \right\} \forall i,j \quad (3.3)$$

P_s^j denklem (2.5)'e göre hesaplanır. Başlangıç olarak i düğümü komşularını kontrol eder ve her j komşusuna ulaşmak için en iyi yardımcı düğümü, $k^* = \operatorname{argmax}_k \{ 1 - P_s^j(\{i,k\}) + 2C_h \}$, bulur ve işbirlikli bağlantı oluşturur. Eğer doğrudan iletimin başarı olasılığı, $P_s^j(\{i\})$, işbirlikli iletimden yüksekse doğrudan iletim bağlantısı oluşturulur. Bu işlemler için düğümler sadece yerel bilgileri kullanırlar ve algoritmanın dağıtık çalışmasını sağlarlar. Dağıtık Bellman-Ford algoritması

kullanılarak 1. düğümünden N. düğüme giden en iyi yol bulunur. Algoritmanın sözde kodu aşağıda Algoritma 4'te verilmiştir.

Algoritma 4: En Az Kesinti İhtimalli İşbirlikli Yol Atama (MOCR)

1. **for** $n = 1$ to N
2. **for** $\forall n \neq x$ **do**
3. (2.5) denklemiyle $1 - P_s^x(\{n\}) + C_h$ bağıntısını doğrudan iletim masrafı olarak hesapla
4. **for** $\forall n \neq y$ ve $y \neq x$ **do**
5. (2.6) denklemiyle $1 - P_s^x(\{n, y\}) + 2C_h$ bağıntısını işbirlikli iletim masrafı olarak hesapla
6. **end for**
7. **end for**
8. **end for**
9. (n, x) bağlantısının masrafı olarak $\max\{1 - P_s^x(\{n\}) + C_h, \max_y\{1 - P_s^x(\{n, y\}) + 2C_h\}\}$ bul
10. **if** işbirlikli iletim masrafı < doğrudan iletim masrafı **then**
11. y^* yardımcı düğümünü iletme katkıda bulunması için görevlendir
12. Hesaplanan iletim masraflarını kullanarak dağıtık Bellman-Ford en kısa yol algoritmasını uygula.

3.2.3 Geliştirilmiş En Az Kesinti İhtimalli İşbirlikli Yol Atama (IMOCR)

Önerilen son algoritma En Az Kesinti İhtimalli İşbirlikli Yol Atama algoritmasından türetilmiştir. Bu algoritmalar arasındaki fark Geliştirilmiş En Az Kesinti İhtimalli İşbirlikli Yol Atama algoritmasıyla bulunan yolda doğrudan iletim bloklarının bulunmamasıdır. İlk olarak En Az Kesinti İhtimalli İşbirlikli Yol Atama algoritması çalıştırılır. Daha sonra bulunan yol üzerindeki doğrudan iletim blokları tespit edilir ve bu bloktaki alıcıların kendilerinden önceki iki iletimden de faydalanmaları sağlanır. Örneğin Şekil 3.2.'deki gibi bir yol bulunduktan sonra j s 'den, x i 'den ve y

j 'den gelen sinyalleri de dikkate almaya başlar. Bu sayede kesinti ihtimali azaltılmış olur.

Algoritma 5: Geliştirilmiş En Az Kesinti İhtimali İşbirlikli Yol Atama (IMOOCR)

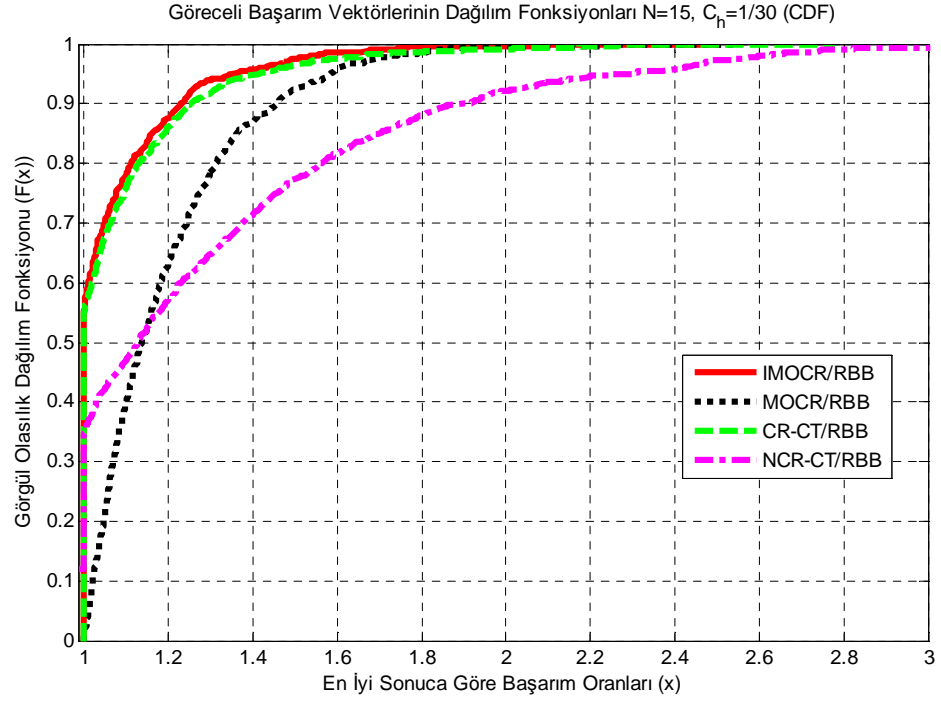
1. En Az Kesinti İhtimali İşbirlikli Yol Atama algoritmasını uygula
2. Doğrudan iletim ile sadece bir düğümden sinyal alan düğümleri tespit et ve bu düğümlerin yolda bulunan kendisinden önce iletim yapmış iki düğümün sinyallerinden faydalanmasını sağla.

3.3 Sayısal Değerlendirmeler

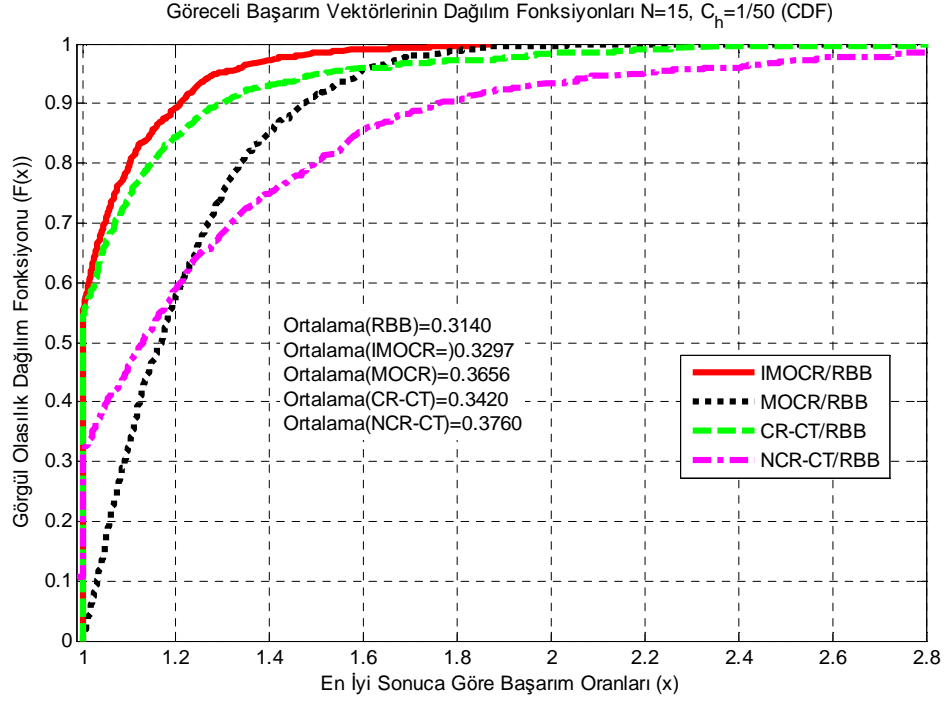
Yarıçapı 1000 metre olan dairesel bir alanda rastgele dağıtılmış düğümleri göz önünde bulundurduk. İstisna olarak kaynak ve hedef (1 ve N) düğümlerinin konumlarını dairenin karşı uçlarında ((-1000,0) ve (1000,0) koordinatları) olacak şekilde seçtik. Her düğümün 10 mW sabit iletim gücü olduğunu kabul ettik. Gürültü güç yoğunluğunu 154 dB W/Hz ve yol kaybı modelini $31.5 + 35 \log_{10} d$ dB aldık. Burada d düğümler arasındaki mesafenin metre cinsinden değeridir. Veri hızı kısıtı 1 Mbps ve bant genişliği 1 Mhz alınarak, alınan hedef SNR değeri 1'e eşitlendi. Teke iletim algoritmalarında yol üzerindeki bütün iletimlerin başarılı olması başarı kistası olarak kabul edildi. Kesinti ihtimali ise başarı ölçütü kabul edildi.

Şekil 3.3. ve Şekil 3.4.'te 15 düğümlü bir ağ ele alınmıştır. Sekme sayısı masrafı sırasıyla 1/ 30 ve 1/ 50'dir. İncelenen algoritmalar IMOOCR, MOOCR, RBB, CR-CT ve NCR-CT dir. Her algoritma için rastgele 1000 ağ oluşturulmuş ve her bir ağda genel kesinti ihtimali hesaplamaları yapılmıştır. Sonuçta her bir algoritma için boyutu 1000 olan genel kesinti olasılık vektörü elde edilmiştir. Daha sonra göreceli başarı vektörünü bulabilmek için en iyi olmayan algoritmaların kesinti ihtimali vektörlerini en iyi sonucu veren RBB algoritmasının kesinti olasılık vektörüne böldük. Her algoritmanın göreceli başarı vektörlerinin görgül olasılık dağılım (Empirical cumulative distribution) fonksiyonlarının grafiklerini elde ettik. Adil bir karşılaştırma yapabilmek için öncelikli olarak IMOOCR algoritmasını 1000 rastgele ağ

için çalıştırarak sekme sayılarını kaydettik. Daha sonra RBB ve CR-CT algoritmalarında T_{max} değerini kaydedilen sekme sayılarına eşitleyerek çalıştırdık. Böylece sekme sayılarında eşitlik sağlanarak daha sağlıklı bir başarımla değerlendirilmesi mümkün oldu.



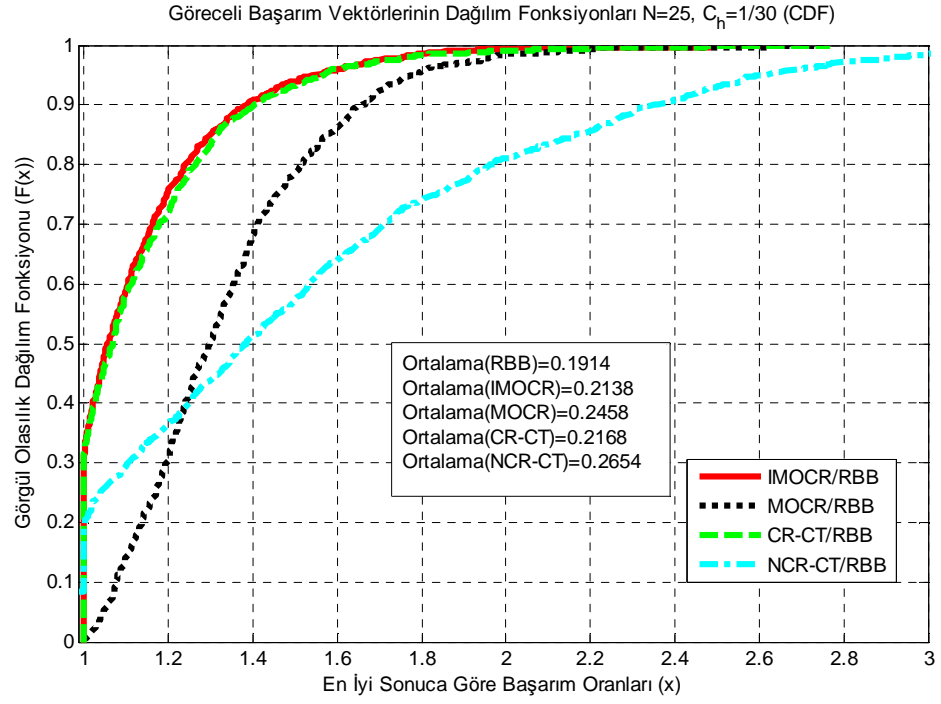
Şekil 3.3. 15 Kullanıcılı sistem için kesinti ihtimali dağılım fonksiyonu. $C_h = 1/30$ olarak alındı. Dağılım IMOCR algoritması CR-CT'den de iyi bir başarımla göstermiştir ve kesinti değerleri en iyiye yakın çıkmıştır.



Şekil 3.4. 15 Kullanıcılı sistem için kesinti ihtimali dağılım fonksiyonu. $C_h=1/50$ olarak alındı. Dağılım MOCR algoritması ise merkezi çalışan CR-CT kadar iyi bir başarım gösterememiştir.

Şekil 3.3. ve Şekil 3.4.'te RBB algoritması en iyi çözümdür fakat IMOCR ve CR-CT algoritmalarının da neredeyse RBB kadar iyi sonuç verdiği görülmektedir. Yapılan denemelerin %55'inde IMOCR ve CR-CT algoritmaları en iyi sonucu elde etmiştir. Optimal olmayan algoritmaların içinde en iyi başarıma sahip olan algoritma IMOCR algoritmasıdır, en iyi olanla sadece %5'lik ortalama farkları bulunmaktadır. IMOCR algoritmasının dağıtık olarak gerçekleştirilebilir olması, CR-CT algoritmasından daha iyi başarıma sahip olması ve basitliği gerçek zamanlı uygulamalar için daha iyi bir aday olduğunu göstermektedir. Ayrıca şekillerden de görülebileceği üzere IMOCR algoritması MOCR algoritmasına göre kayda değer bir başarım artışı sağlamıştır.

Şekil 3.5. 25 düğümlü bir ağı kesinti ihtimallerinin olasılık dağılım fonksiyonlarını göstermektedir. Düğüm sayısı arttıkça, düğümler arasındaki mesafenin azalması sebebiyle, ortalama (mean) kesinti ihtimalinin azaldığı görülür. Kesinti ihtimallerinde %40 civarında azalma meydana geldiğini gözlemledik.



Şekil 3.5. 25 Kullanıcılı sistem için kesinti ihtimali dağılım fonksiyonu $C_h=1/30$ olarak alındı.

Bu konudaki çalışmalarımız bir bildiri haline getirilmiş ve IEEE 73rd Vehicular Technology Conference'a sunulmuştur.

4. ASGARI KESİNTİLİ YAYIN

Kablosuz yayında hedef, ağda bulunan bütün düğümlerin iletilen mesajı doğru olarak almasıdır. Bu bölümde anlatılacak olan algoritmalarda dairesel bir alana rastgele yerleşmiş düğümlerden merkezde bulunan düğüm kaynak düğüm olarak alınmış ve ağdaki genel kesinti ihtimalini en aza indirecek iletim sırasını (kaynak düğümünden sonra yapılacak $T_{max} - 1$ iletimin) bulmak amaçlanmıştır. Çizelge 4.1’de önerilen algoritmalarla ilgili kısa açıklamalar verilmiştir.

Algoritma Adı	Kısa Adı	En İyi	Açıklama
Dal ve Sınır Yöntemi ile Yayın	BBB	Evet	Olası iletim sıralarından oluşan arama ağacı kullanılarak en iyi çözüm bulur.
Algoritma 7	AlgX	Hayır	En küçük genel kesinti ihtimalini sağlayan düğümü iletim kümesine ekler.
Algoritma 8	AlgY	Hayır	En yüksek başarı ihtimaline sahip düğüm iletim kümesine ekler.

Çizelge 4.1. Asgari Kesintili Yayın Algoritmaları

4.1. En İyi İletim Sırası: Dal ve Sınır Yöntemi

İletilen mesajın ağda bulunan tüm düğümler tarafından alınması istendiğinden $\frac{(N-1)!}{(N-T_{max})!}$ olası iletim sırası mevcuttur. Bütün olasılıkları tek tek karşılaştırarak kesinti ihtimalini en aza indiren sırayı bulmak oldukça zaman harcayan bir işlemdir. Bunun yerinde Asgari Kesintili Teke iletim bölümünde anlatılmış olan Dal ve Sınır Yöntemi kullanılmıştır. Yayın için BB metodu uygulanırken sınırlama işlemleri için kullanılan formüller tek yöne iletimde kullanılanlardan farklılık gösterirler. Verilen bir iletim sırası O için alt kesinti sınırı (LB) ve üst kesinti sınırı (UB),

$$LB_O = \begin{cases} 1 - \prod_{i=1}^N P_S^i(O_i) & \text{if } |O| = T_{max} \\ 1 - \prod_{i \in O} P_S^i(O_i) & \text{else} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$UB_O = 1 - \prod_{i=1}^N P_S^i(O_i) \quad (4.2)$$

denklemlerine göre bulunur. Burada $|O|$, O kümesinin eleman sayısını göstermektedir. Eğer $|O| < T_{max}$ ise alt kesinti sınırı ağda sadece O kümesinde bulunan düğümlerin olduğu varsayılarak hesaplanır. Üst kesinti sınırını hesaplanırken sadece O kümesine dahil olan düğümlerin iletim yaptığı ve başka iletim yapılmadığı kabul edilir. Kökten herhangi bir yaprağa doğru ilerlendikçe alt kesinti sınırı artar, üst kesinti sınırı ise azalır. Ağacın kökü 1. düğüm olsun, ağaç $\{1, 2\}$, $\{1, 3\}$, ..., $\{1, N\}$ şeklinde dallanabilir. $\{1, 2\}$ dalı bir kademe daha dallandığında oluşan yeni dallar $\{1, 2, 3\}$, $\{1, 2, 4\}$, ..., $\{1, 2, N\}$ olabilir. Oluşan dallardan $\{1, 2\}$ ve $\{1, 2, 3\}$ ele alındığında $LB_{\{1,2\}} < LB_{\{1,2,3\}}$ ve $UB_{\{1,2\}} > UB_{\{1,2,3\}}$ olduğu görülür. Eğer $|O| = T_{max}$ olduğunda alt ve üst kesinti sınırları eşit olur. Algoritmanın sözde kodu Algoritma 1: Dal ve Sınır Yöntemiyle Yol Atama da gösterilmiştir. 11. Satırda yapılan hesaplamalarda yayın için (4.1) ve (4.2) no'lu denklemler kullanılmıştır.

4.2. En İyi Olmayan Algoritmalar

Dal ve Sınır yöntemi en iyi iletim sırasını bulmak için verimli bir yol olsa da kablosuz uygulamalarda kullanılamayacak kadar uzun zaman almaktadır. Bu nedenle en iyi olmayan fakat verimliliği BB ile kıyaslanabilecek algoritmalar önerilmiştir.

Önerilen birinci algoritma adım adım çalışmaktadır. Her basamakta algoritma henüz iletim yapmamış olan her düğüm için iletim sırasına eklenirse kesinti ihtimali ne olur diye bakar. En küçük genel kesinti ihtimalini sağlayan düğüm iletim kümesi O 'ya

eklenir. BB terminolojisiyle Algoritma 7 en küçük üst kesinti ihtimalli düğümü bularak iletim kümesine ekler. Algoritma 7'nin sözde kodu aşağıda verilmiştir.

Algoritma 7

1. $O = \{1\}$ olsun
2. **for** $i = 2$ to T_{max} **do**
3. **for** $\forall n \notin O$ **do**
4. $O' = \{O, n\}$
5. (2.6) denklemine göre $P_o(O'(n))$ hesapla
6. **end for**
7. $n^* = \operatorname{argmin}_{n \in O^c} \{P_o(O'(n))\}$ sağlayan n^* düğümünü bul
8. $O = \{O, n^*\}$
9. **end for**

İkinci en iyi olmayan algoritma daha basit bir mantığa sahiptir. İletim kümesi başlangıçta sadece kaynak düğümü içerir. Daha sonra diğer bütün düğümlerin başarı ihtimali hesaplanır ve en yüksek başarı ihtimaline sahip düğüm iletim kümesine eklenir. Bu işlem iletim kümesinde $T_{max} - 1$ düğüm olana kadar tekrar edilir. İletim yapan son düğümü belirlemek için, iletim yapmamış olan $N - T_{max} + 1$ tane düğümün her biri ile genel kesinti ihtimali hesaplaması yapılır. En küçük genel kesinti ihtimalini sağlayan düğüm bulunur ve iletim kümesine eklenir. BB terminolojisiyle Algoritma 8 her basamakta en iyi alt kesinti ihtimalli sınırlı düğümü bularak iletim kümesine ekler. Algoritma 8'in sözde kodu aşağıda verilmiştir.

Algoritma 8

1. $O = \{1\}$ olsun
2. **for** $t = 2$ to $T_{max} - 1$ **do**
3. $\forall n \notin O$ için (2.5) denklemine göre $P_s(O'(n))$ hesapla
4. $n^* = \operatorname{argmin}_{n \notin O} \{P_s(O'(n))\}$ sağlayan n^* düğümünü bul
5. $O' = \{O, n^*\}$
6. **end for**

7. $O' = \{O, n\}$ olsun ve $\forall n \notin O$ için (2.6) denklemine göre $P_o(O'(n))$ hesapla
8. $n^* = \operatorname{argmin}_{n \notin O} \{P_s(O'(n))\}$ sağlayan n^* düğümünü bul
9. $O = \{O, n^*\}$

Önerilen algoritmaların hepsinde düğüm başarı ihtimalini hesaplamak için denklem (2.5) kullanılmaktadır. Algoritmaların çalışma süresi ise kabaca denklem (2.5)'in hesaplanma sayısı ile orantılıdır. Algoritma 7'de, i . adımda $N - i$ olası düğüm iletim sırasına eklenebilir ve bu düğümlerin her biri için (2.6) denklemine göre genel kesinti ihtimali hesaplanır. O iletim kümesinde bulunan düğümler için tekrar tekrar başarı ihtimalinin hesaplanmasına gerek yoktur. Sonuçta Algoritma 7 için

$$X = \sum_{k=N-T_{max}+1}^{N-1} k^2 \quad (4.3)$$

defa denklem (2.5) çağırılır. Algoritma 8'de denklem (2.5)'in çağırılma sayısı (Y) aşağıdaki formül ile bulunabilir.

$$Y = (N - T_{max} + 1)(N - T_{max}) + \sum_{k=1}^{T_{max}-1} N - k \quad (4.4)$$

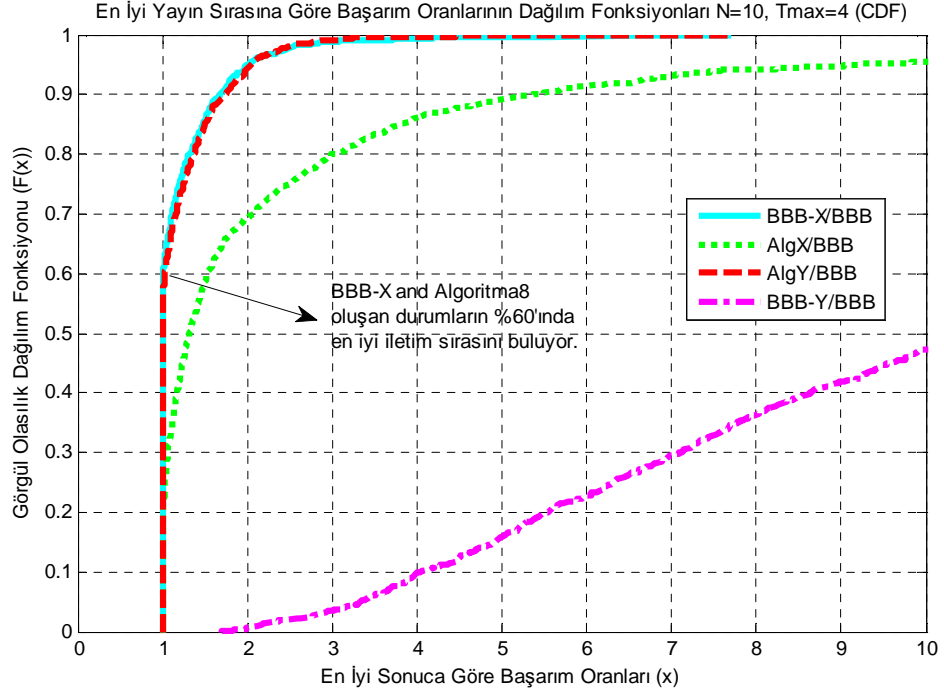
4.3. Sayısal Değerlendirmeler

Yarıçapı 1000 metre olan dairesel bir alanda rastgele yerleştirilmiş düğümleri göz önünde bulundurduk. İstisna olarak kaynak düğüm (1) dairesel alanın merkezinde seçtik ve ağdaki diğer düğümleri (2 - N) hedef olarak belirledik. Her düğümün 10 mW sabit iletim gücü olduğunu kabul ettik. Gürültü güç yoğunluğunu 154 dB W/Hz ve yol kaybı modelini $31.5 + 35 \log_{10} d$ Db aldık. Burada d düğümler arasındaki mesafenin metre cinsinden değeridir. Veri hızı gereksinimi 1 Mbps ve bant genişliği 1 Mhz alınarak, SNR gereksinimi 1 'e eşitlendi. Burada olarak alıcılardan en az birinin başarılı bir şekilde alamaması ihtimali başarı ölçütü olarak alınmıştır.

Şekil 4.1.'de 10 düğümlü bir sistem ele alınmıştır. İletim yapan düğüm sayısı en fazla $T_{max} = 4$ olacak şekilde kısıtlanmıştır. Dal ve Sınır Yöntemiyle Yayın Algoritması (BBB), Algoritma 7 (AlgX) ve Algoritma 8 (AlgY) ele alınmıştır. Karşılaştırma yapmak için BBB-X ve BBB-Y olarak iki yöntem daha tanımladık. BBB-X'te başarı ihtimali hesaplama sayısı daha önce denklem (4.3)'te verilmiş olan X sayısını aştığında dal-sınır yöntemi durdurulur ve o ana kadar bulunmuş en iyi çözüm elde edilir. BBB-Y'de ise hesaplama sayısı denklem (4.4)'te verilmiş olan Y'yi aştığında işlem durdurulur. Bu sayede hesaplama karmaşıklığı açısından adil bir karşılaştırma yapmak amaçlanmıştır.

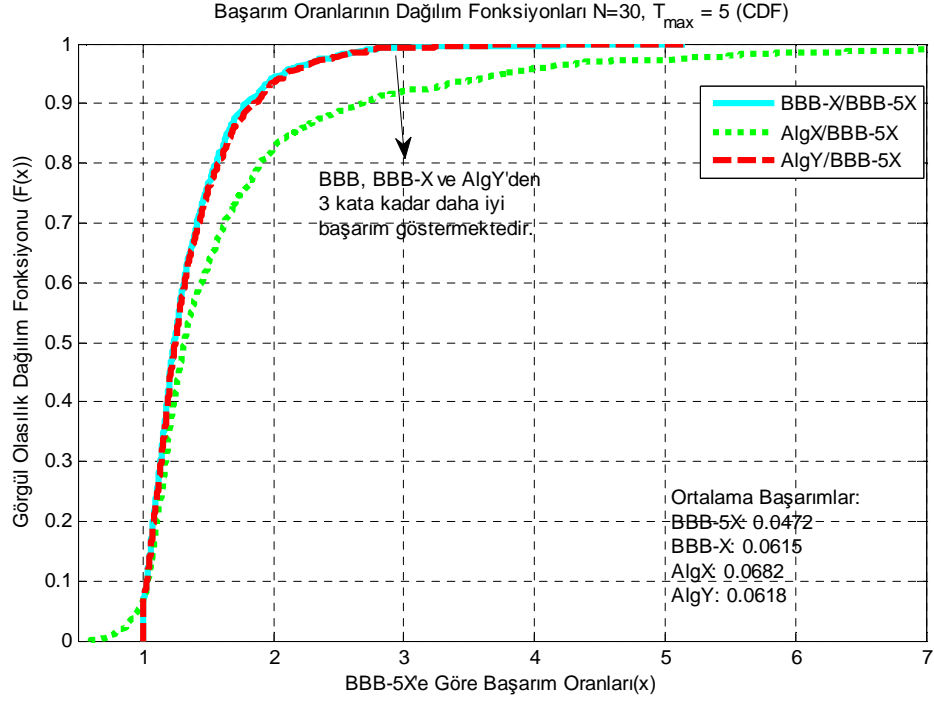
Her bir yöntem için 1000 rastgele ağ oluşturulmuştur. Her bir yöntem ve her bir ağ için genel kesinti ihtimali hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucu her yöntem için uzunluğu 1000 olan kesinti ihtimali vektörü elde edilmiştir. En iyi olmayan algoritmalarından elde edilen kesinti ihtimali vektörleri, en iyi çözüm olan BBB vektörüne bölünmüş ve dağılım fonksiyonu çizdirilmiştir. Elde edilen grafik en iyi çözüme göreceli olarak başarımların dağılımını verir.

Şekil 4.1.'de BBB algoritmasının BBB-X 'den en fazla 3 kat ortalama da ise yüzde 3-4 daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Algoritma 8, Algoritma 7 'den çok daha basit olmasına rağmen, BBB-X ile neredeyse birebir başarımlar göstermiştir. Algoritma 8 oluşan durumların %60'ında en iyi sonucu bulmuştur. Diğer yandan BBB-Y'nin başarımlar oranı oldukça düşüktür. Buradan Y hesaplama miktarının, dal ve sınır yöntemi ile uygun bir iletim sırası bulmak için çok küçük ve yetersiz kaldığı görülmüştür.



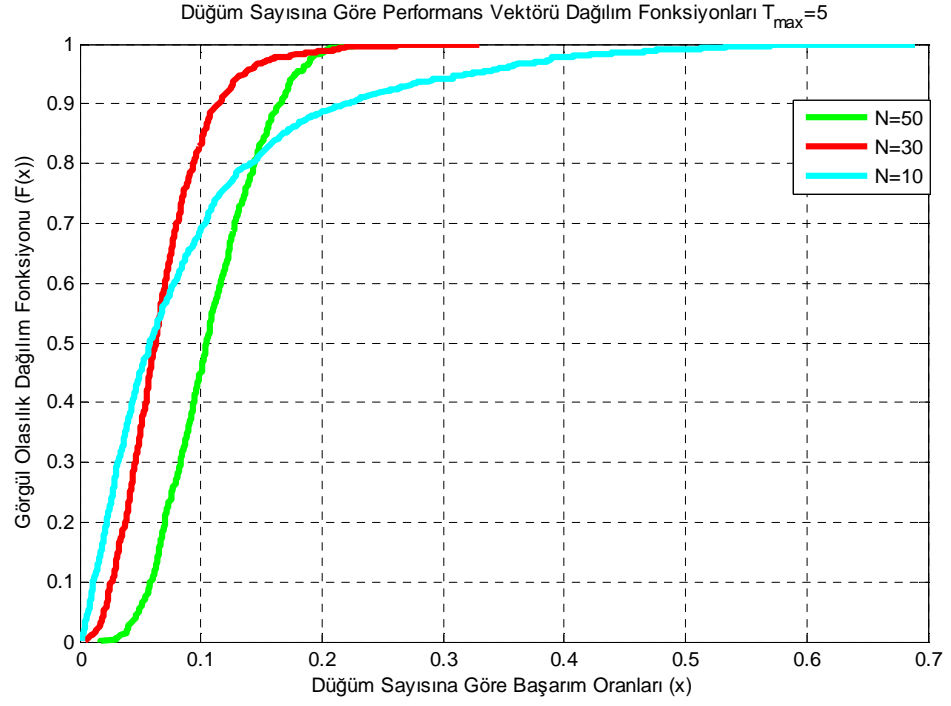
Şekil 4.1. $N = 10, T_{max} = 4$ için göreceli kesinti ihtimal oranlarının dağılımı

Şekil 4.2.'de 30 düğümden oluşan daha büyük bir ağ incelenmiştir. $T_{max} = 5$ olarak belirlenmiştir. BBB ile en iyi sonucu bulmak için yapılan hesaplamalar çok uzun zaman aldığı için işlem sayısı (2.5) denkleminin çağırılma sayısı) en iyi yöntemde 5X ile kısıtlanmış ve BBB-5X ile gösterilmiştir. Elde edilen çizimden BBB-5X algoritmasının diğer algoritmalara göre en fazla 3 kat ortalama ise %5-6 daha başarılı olduğu görülmüştür. Algoritma 8, BBB-5X'e çok yakın bir sonuç elde etmiş ve Algoritma 7'ye göre daha iyi bir başarımla göstermiştir. Ayrıca Algoritma 7'nin %10 olasılıkla BBB-5X'ten daha iyi sonuç verebildiği gözlemlenmiştir. Buna rağmen BBB-5X'ten 7 kat daha kötü başarımla sergilemiş ve ortalamalara bakıldığında en kötü başarımla sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2. $N = 30$, $T_{max} = 5$ için kesinti ihtimal oranlarının görgül olasılık dağılım fonksiyonları (CDF)

Ağda bulunan düğüm sayısı arttıkça önerilen algoritmaların başarımları artmaktadır. Bu durum Şekil 4.3.'te görülmektedir. Başarımların artmasının sebebi düğümler arasındaki mesafenin kısılması ve oluşabilecek yolların çeşitliliğindeki artıştır. Ayrıca düğümler arasındaki mesafe kısaldıkça düğümlerin kapsama alanındaki düğüm sayısı artar ve uzaysal çeşitlilikten sağlanan verimde de artış meydana gelir.



Şekil 4.3. $T_{max} = 5$ için kesinti ihtimal oranlarının görgül olasılık dağılım fonksiyonları (CDF)

Bu konudaki çalışmalarımız bir makale haline getirilmiş ve IEEE Communications Letters dergisinde Temmuz 2010'da yayınlanmıştır [29].

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında tasarsız kablosuz ağlarda, kesinti ihtimalini en aza indirerek düğümler arasında güvenilir iletişimin sağlanması üzerine çalıştık. Birinci bölümde kablosuz ağ teknolojileri, kablosuz ağlarda yol atama ve yol atama algoritmaları, kablosuz ağlarda işbirlikli iletim, kesinti ihtimali ve literatürdeki çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde üzerinde çalıştığımız sistem modeli; ağ topolojisi, bant genişliği, kanal durumu, yapılan varsayımlar ve hesaplamalarda kullanılan formüller tanıtılmıştır.

En Az kesinti ihtimalli işbirlikli teke iletim yol ataması problemine en iyi çözüm bulmak için yaptığımız çalışmalar üçüncü bölümde yer almıştır. Önerilen algoritmalar çalıştırılarak yapılan benzetimler sonucunda elde edilen sayısal veriler tatmin edici ölçüdedirler. Dağıtık çalışan algoritmaların en iyi çözüme çok yaklaştığı ve karmaşık olan merkezi algoritmayı geçtiği görülmüştür.

Dördüncü bölümde ise işbirlikli en az kesintili yayın algoritmaları anlatılmıştır. Optimal çözüm bulunmuş ve en iyi olmayan algoritmalarla karşılaştırılarak başarımlar değerlendirilmiştir. Buradan en iyi olmayan fakat uygulaması kolay olan algoritmaların da neredeyse en iyi çözüm kadar iyi başarımlara sahip olduğu görülmüştür.

Gelecekteki çalışmalarda daha karmaşık modeller üzerinde çalışılabilir. Örneğin teke iletimde aynı anda birden fazla kaynak ve alıcı çifti varsa girişim problemi ortaya çıkar. Bu, gerçeğe daha yakın bir durumdur karmaşık bir problemdir. Ayrıca tek bir kaynak bile olsa, yol üzerindeki bazı (birbirine uzak) düğümlerin aynı anda iletim yapması mümkündür. Bu sayede iletim süresi önemli ölçüde azalacaktır, ancak yol atama yapılırken ve başarımlar analiz edilirken girişim dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Stallings, W., *Wireless Communications & Networks*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2005.
- [2] Tanenbaum, A.S., *Computer Networks*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2003.
- [3] Cormen, T. H., Leirson, C.E., Rivest, R.L., Stein, C., *Introduction to Algorithms*, The Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2001
- [4] Wieselthier, J.E. , Nguyen, G.D. , Ephremides, A., *Algorithms for Energy-Efficient Multicasting in Static Ad Hoc Wireless Networks*, Kluwer Academic Publishers, *Mobile Networks and Applications*, 6 , pp.251- 263, 2001
- [5] A. Michail, A. Ephremides, *Energy-efficient routing for connection-oriented traffic in wireless ad-hoc networks*, *Mobile Networks and Applications (MONET)*, 8 (5), 517-533, 2003
- [6] Wieselthier, J.E. , Nguyen, G.D. , Ephremides, A., *Energy-Efficient Broadcast and Multicast Tree in Wireless Networks*, Kluwer Academic Publishers, *Mobile Networks and Applications*, 7, 481-492, 2002
- [7] A. E. F. Clementi, P. Crescenzi, P. Penna and P. V. G. Rossi, *On the Complexity of Computing Minimum Energy Consumption Broadcast Subgraphs*, *Proc. 18th Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science*, volume 2010 of LNCS, pp. 121-131, 2001.
- [8] Maric, I., Yates, R.D., *Cooperative Multihop Broadcast for Wireless Networks*, *Selected Areas in Communications IEEE Journal* , 22, 6, 2004
- [9] Maric, I. , Yates, R.D., *Cooperative Multicast for Maximum Network Lifetime*, *Selected Areas in Communications IEEE Journal*, 23, 1, 127-135, 2005
- [10] Hong, Y., Scaglione, A., *Energy-Efficient Broadcasting with Cooperative Transmissions in Wireless Sensor Networks*, *Wireless Communications IEEE Transactions*, 5, 10, 2006

- [11] Khandani, A.E., Abounadi, J., Modiano, E., Lizhong Zheng, Cooperative Routing in Static Wireless Networks, *Wireless Communications, IEEE Transactions*, 55, 11, 2185-2192, 2007
- [12] Deghan, M., Ghaderi, M., Goeckel, D.L., Cooperative Diversity Routing in Wireless Networks, *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, 2010 Proceedings of the 8th International Symposium, 31-39, Fransa, Avignon, Temmuz 2010
- [13] Scaglione, A., Hong, Y., Opportunistic Large Arrays: Cooperative Transmission In Wireless Multihop Ad Hoc Networks to Reach Far Distances, *Signal Processing, IEEE Transactions*, 51, 8, 2003
- [14] Ge, W., Zhang, J., Xue, G., Joint Clustering and Optimal Cooperative Routing in Wireless Sensor Networks, *IEEE International Conference 2008 (ICC '08)*, 2216-2220, Pekin, Çin, Mayıs 2008
- [15] Kirti, S., Scaglione, A., Cooperative Broadcast in Dense Networks with Multiple Sources, *Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 2009. SPAWC '09. IEEE 10th Workshop, 514-518, Perugia, İtalya, Temmuz 2009
- [16] Laneman, J.N., Tse, D.N.C., Wornell G.W., Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior, *Information Theory, IEEE Transactions*, 50, 12, 3062 - 3080, 2004
- [17] Khandani, A.E., Abounadi, J., Modiano, E., Lizhong Zheng, Reliability and Route Diversity in Wireless Networks, *Wireless Communications, IEEE Transactions*, 7, 12, 2008
- [18] Khandani, A.E., 2004, Cooperative Routing in Wireless Networks, Yüksek Lisans Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science, ABD.
- [19] Banerjee, S., Misra, A., Minimum Energy Paths for Reliable Communication in Multi-hop Wireless Networks, (*MobiHoc 2002*), 146 – 156, Lausanne, İsviçre, Haziran 2002.
- [20] Banerjee, S., Yeo, J., Agrawala, A., Energy-Efficient Broadcast and Multicast Trees for Reliable Wireless Communication, *Wireless Communications and*

- Networking 2003 (WCNC 2003.IEEE), 1, 660-667, New Orleans, Louisiana, ABD, Mart 2003
- [21] Sheng, Z., Ding, Z., Leung, K.K., Distributed and Power Efficient Routing in Wireless Cooperative Networks, Communications, . IEEE International Conference 2009 (ICC '09) , 1 - 5, Dresden, Almanya, Haziran 2009
- [22] Madan, R. , Mehta, N.B. , Molsich, A.F. , Zhang, Z., Energy-Efficient Decentralized Routing with Localized Cooperation Suitable for Fast Fading, Forty-Fifth Annual Allerton Conference, Illinois, ABD, Eylül 2007
- [23] Maham, B., Hjørungnes, A., Minimum Power Allocation for Cooperative Routing in Multihop Wireless Networks, In Proc. IEEE Sarnoff Symposium (SARNOFF 2009), 1 - 5, Princeton, NJ, ABD, IEEE, Mart -Nisan 2009.
- [24] Savazzi, S., Spagnolini, U., Energy Aware Power Allocation Strategies for Multihop-Cooperative Transmission Schemes, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 25,2, Şubat 2007
- [25] Sheng, Z., Ding, Z., Leung, K.K., On the Design of a Quality-of-Service Driven Routing Protocol for Wireless Cooperative Networks, Vehicular Technology Conference 2008 (VTC Spring 2008) , 624-628, Marina Bay, Singapur, Mayıs 2008
- [26] Sheng, Z., Ding, Z., Leung, K.K., Interference Subtraction with Supplementary Cooperation in Wireless Cooperative Networks, Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference, 1-5, Dresden, Almanya, Haziran 2009
- [27] Khisti, A., Erez, U., Modiano, E., Wornell, G.W., Fundamental Limits and Scaling Behaviour of Cooperative Multicasting in Wireless Networks, Information Theory, IEEE Transactions, 52, 6, 2006
- [28] Ibrahim,A.S., Han,Z., Liu ,K.J.R., Distributed Energy-Efficient Cooperative Routing in Wireless Networks, Wireless Communications, IEEE Transactions, 7, 10, 3930 - 3941, 2008
- [29] Girici, T., Kurt, G.D., Minimum Outage Broadcast in Wireless Networks with Fading Channels, IEEE Communication Letters, 14, 7, 2010
- [30] Branch and Bound Methods, Notes for EE392o" erişim adresi: <http://www.stanford.edu/class/ee392o/bb.pdf>, erişim tarihi: 25 Eki. 10.

- [31] "Sum of independent exponential random variables with different parameters"
erişim adresi: <http://www.math.bme.hu/balzas/sumexp.html>, erişim tarihi: 25
Eki. 10.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KURT, Gülizar Duygu
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 12.12.1985 Eskişehir
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (555) 837 39 78
e-mail : gduygukurt@gmail.com.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Bilgisayar Mühendisliği	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-2010	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

Girici, T., Kurt, G.D., Minimum Outage Broadcast in Wireless Networks with Fading Channels, IEEE Communication Letters, 14, 7, 2010