

**TELSİZ AĞLARDA ENERJİ VERİMLİLİKLİ
YENİ İLETİM PROTOKOLLERİ**

DOKTORA TEZİ

İbrahim AYDIN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Yüksek Lisans ve Doktora Programı

OCAK 2017

**TELSİZ AĞLARDA ENERJİ VERİMLİLİKLİ
YENİ İLETİM PROTOKOLLERİ**

DOKTORA TEZİ

**İbrahim AYDIN
(504102302)**

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Telekomünikasyon Mühendisliği Yüksek Lisans ve Doktora Programı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ

OCAK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504102302 numaralı Doktora Öğrencisi İbrahim AYDIN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TELSİZ AĞLARDA ENERJİ VERİMLİLİKLİ YENİ İLETİM PROTO-KOLLERİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim ALTUNBAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erdal PANAYIRCI
Kadir Has Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Ertuğrul ÇELEBİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **17 Kasım 2016**

Savunma Tarihi : **17 Ocak 2017**

Eşime ve aileme,

ÖNSÖZ

Uzun ve yoğun çalışmaların sonucunda doktora çalışmalarımı tamamladım ve bu çalışmalarımı doktora tezi olarak hazırladım. Bu tezin hazırlanmasına sahip olduğu bilgi ve tecrübesiyle katkı sağlayan ve yönlendirmeleriyle tezin yazılmasını mümkün kılan değerli hocam Prof. Dr. Ümit Aygözü'ye öncelikle teşekkürlerimi sunarım. Doktora araştırmalarım sırasında tanışma ve çalışma fırsatı bulduğum, bir yıllık süre boyunca Kanada'nın Carleton Üniversitesi, Sistem ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde çalışmaları sürdürebilmek için olanak sağlayan ve tecrübesiyle bana araştırma vizyonu kazandıran değerli hocam Prof. Dr. Halim Yanıkömeroğlu'ya da teşekkürlerimi sunuyorum. Bu uzun süreçte maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen eşime ve aileme de teşekkürü bir borç biliyorum. Son olarak hem yurt içi hem yurt dışında bulunduğum sürede çalışmalarına destek olan TÜBİTAK'a da teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım kapsamında bir uluslararası dergi makalesi ve iki de uluslararası konferans bildirisi yayınlanmıştır. Bununla birlikte yayınlanma süreci devam etmekte olan bir uluslararası dergi makalesi de bulunmaktadır. Son olarak Kanada'da yaptığımız ve tezin bir bölümünü oluşturan "UT-farkındalıklı hücre kapatma algoritması" başlıklı çalışma ile ilgili olarak, Huawei Teknoloji Şirketi aracılığıyla ve yine hakları aynı şirkete ait olmak üzere Amerikan Patent Ofisi'ne patent başvurusu yapılmıştır.

Ocak 2017

İbrahim AYDIN
(Araştırma Görevlisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatürde Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	3
1.2 Tezin Konuya Katkıları.....	8
2. TEMEL KAVRAMLAR.....	13
2.1 Sönümlemeli Kanallar	13
2.1.1 Geniş ölçekli sönümleme	14
2.1.2 Küçük ölçekli sönümleme	15
2.1.3 Doppler kayması ve uyumluluk zamanı	18
2.1.4 Küçük ölçekli sönümleme çeşitleri	19
2.1.5 Düz sönümlemeli kanalların modellenmesi	20
2.2 Çeşitleme	22
2.3 Alamouti uzay-zaman blok kodu.....	22
2.4 İşbirlikli Çeşitleme	24
2.4.1 Kuvvetlendir ve aktar (AF).....	24
2.4.2 Çöz ve aktar (DF)	26
2.4.3 Seçimli aktarım (SDF).....	26
2.4.4 Artımlı aktarım	27
2.4.5 Çok atlamalı ağlar.....	27
2.4.6 İşbirlikli çeşitleme ve dağıtılmış Alamouti kodu	29
2.5 Ardışık iletim (SR)	29
2.6 Enerji verimliliği	31
3. RASTGELE DAĞITILMIŞ GENİŞ ÖLÇEKLİ AĞLAR İÇİN ENERJİ VERİMLİLİKLİ RÖLE SEÇME YÖNTEMİ	35
3.1 Giriş	35
3.2 Sistem Modeli ve Problem Tanımı	36
3.2.1 Başlangıç aşaması - röle kümesinin belirlenmesi.....	39
3.2.2 Röle seçimi aşaması	44
3.2.3 Veri iletimi aşaması	46
3.2.4 Çok-kaynaklı sistemlerin incelenmesi.....	49
3.3 Başarım Değerlendirmesi	50

4. İKİ ATLAMALI VE İKİ RÖLELİ AĞLAR İÇİN ENERJİ VERİMLİLİKLİ İLETİM YÖNTEMİ.....	61
4.1 Giriş	61
4.2 Sistem Modeli.....	62
4.3 Enerji Verimliliği ve Etkin Veri Hızı Analizi	63
4.3.1 Servis dışı kalma olasılığı.....	64
4.3.2 Enerji verimliliği	64
4.3.3 Etkin veri hızı	65
4.4 Başarım Değerlendirmesi	66
5. UT-FARKINDALIKLI HÜCRE-KAPATMA (CSO) ALGORİTMASI	81
5.1 Sistem Modeli ve Problem Tanımı	83
5.2 Güç Kontrol Algoritması	87
5.3 Sezgisel Hücre Kapatma Algoritması	91
5.4 Başarım Değerlendirmesi	95
6. SONUÇ	103
KAYNAKLAR.....	107
ÖZGEÇMİŞ	115

KISALTMALAR

AF	: Kuvvetlendir ve Aktar
AWGN	: Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü
BS	: Baz İstasyonu
cdf	: Olasılık Dağılım İşlevi
CoV	: Heterojenlik Düzeyi Çeşitlilik Sabiti
CRC	: Döngüsel Artıklık Denetimi
CSI	: Kanal Durum Bilgisi
CSO	: Hücre Kapatma
CTS	: Gönderime Uygun Paketi
DF	: Çöz ve Aktar
DL	: Aşağı Yönlü Bağlantı
DSTBC	: Dağıtılmış Uzay-Zaman Blok Kodu
EE	: Enerji Verimliliği
ERA	: Etkin Röle Alanı
LOS	: Doğrudan görüş hattı
MIMO	: Çok Girişli Çok Çıkışlı
ML	: En büyük olabilirlikli
PC	: Güç Kontrolü
pdf	: Olasılık Yoğunluk İşlevi
RB	: Kaynak Bloğu
RTS	: Gönderim İsteği Paketi
SDF	: Seçimli Aktarım
SNR	: İşaret Gürültü Oranı
SR	: Ardışık İletim
UL	: Yukarı Yönlü Bağlantı
UT	: Kullanıcı Uçbirimi

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Sistem değişkenleri.	51
Çizelge 4.1: Sistem değişkenleri.	67
Çizelge 5.1: Değişkenlerin tanımları.	84
Çizelge 5.2: Sistem değişkenleri.	95

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Baz istasyonunun kapsama alanı gösterimi.....	15
Şekil 2.2 : Yol kaybı, gölgeleme ve çok yollu sönümlenmenin toplam etkisinin uzaklığa bağlı gösterimi.....	16
Şekil 2.3 : Doppler kayması.....	18
Şekil 2.4 : Küçük ölçekli sönümlenme çeşitleri.....	19
Şekil 2.5 : Alamouti kodlama için alıcı yapısı.....	23
Şekil 2.6 : Üç düğümlü işbirlikli çeşitleme modeli.....	25
Şekil 2.7 : Çok atlamalı ağ yapıları: (a) çok atlamalı model, (b),(c) çok atlamalı çeşitlemeli model.	28
Şekil 2.8 : Art Arda Bağlanmış Alamouti kodunun blok diyagramı.	28
Şekil 2.9 : Ardışık iletim yöntemi için incelenen ağ modeli ve iletim protokolü.	30
Şekil 2.10 : Enerji tüketimi ile işaret iletim süresi arasındaki ilişki.	33
Şekil 3.1 : Ele alınan geniş ölçekli ağ modeli.....	37
Şekil 3.2 : Önerilen enerji-verimlilikli röle seçme yöntemine ait akış diyagramı.	38
Şekil 3.3 : ERA'daki ortalama röle sayısına bağlı olarak minimum L_{avg}	43
Şekil 3.4 : Enerji verimliliğinin ERA'nın içindeki ortalama röle sayısına bağlı değişimi ($r = 1$).....	52
Şekil 3.5 : Servis dışı kalma olasılığının ERA'nın içindeki ortalama röle sayısına bağlı değişimi ($r = 1$).....	53
Şekil 3.6 : E_{TD} , E_{CD} ve E_S 'nin ERA'nın içindeki ortalama röle sayısına bağlı değişimi ($r = 1$ ve $d_{SD} = 800$ m).	54
Şekil 3.7 : Karşılaştırılan üç yöntemin enerji verimliliklerinin d_{SD} 'ye bağlı olarak değişimi.....	55
Şekil 3.8 : Karşılaştırılan üç yöntemin etkin veri hızlarının d_{SD} 'ye bağlı olarak değişimi.....	56
Şekil 3.9 : Karşılaştırılan üç yöntemin enerji verimliliklerinin veri hızına bağlı olarak değişimi ($d_{SD} = 800$ m).....	57
Şekil 3.10 : Karşılaştırılan üç yöntemin etkin veri hızlarının veri hızına bağlı olarak değişimi ($d_{SD} = 800$ m).....	58
Şekil 4.1 : Ele alınan iki atlamalı iki röleli ağ modeli.	62
Şekil 4.2 : Röleler arası bağlantının EE'ye etkisi ($d_1 = d_{SD}/2$, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).....	67
Şekil 4.3 : Röleler arası bağlantının r_e ye etkisi ($d_1 = d_{SD}/2$, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).....	68
Şekil 4.4 : Sabit P_t varsayımı altında olabilecek bütün hız uyarlamaları için EE- r_e başarımlarının alabileceği değerlerin gösterimi ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = d_{SD}/2$, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).....	69

Şekil 4.5	: EE'nin d_{SD} ye bağlı başarımı ($d_1 = d_{SD}/2$, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).....	70
Şekil 4.6	: r_e nin d_{SD} ye bağlı başarımı ($d_1 = d_{SD}/2$, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).....	71
Şekil 4.7	: EE'nin d_1 e bağlı başarımı ($d_{SD} = 500$ m, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).....	72
Şekil 4.8	: r_e nin d_1 e bağlı başarımı ($d_{SD} = 500$ m, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).....	73
Şekil 4.9	: EE'nin P_t ye bağlı başarımı ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = d_{SD}/2$ ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).	75
Şekil 4.10	: r_e nin P_t ye bağlı başarımı ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = d_{SD}/2$ ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).	76
Şekil 4.11	: P_t nin 1 mW (en sol) ile 100 mW (en sağ) arasındaki değişimlerine bağlı olarak EE- r_e başarımlarının gösterimi ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = d_{SD}/2$, ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).	77
Şekil 4.12	: P_t nin 1 mW (en sol) ile 100 mW (en sağ) arasındaki değişimlerine bağlı olarak EE- r_e başarımlarının gösterimi ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = d_{SD}/4$, ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).	78
Şekil 4.13	: P_t nin 1 mW (en sol) ile 100 mW (en sağ) arasındaki değişimlerine bağlı olarak EE- r_e başarımlarının gösterimi ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = 3d_{SD}/4$, ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).	79
Şekil 5.1	: Hücre kapatma yöntemi uygulanan düşük trafik yoğunluklu heterojen bir ağ. (a) hücre kapatma uygulanmadan önceki ağın durumu (b) uygulandıktan sonraki ağın durumu.	82
Şekil 5.2	: Delaunay üçgenleme ile Voronoi hücrelemenin gösterimi (daireler UT'leri, kesikli çizgi Voronoi hücre duvarlarını ve düz çizgi Delaunay üçgen kenarlarını göstermektedir).	86
Şekil 5.3	: Güç kontrol (PC) algoritmasının akış diyagramı.....	90
Şekil 5.4	: Önerilen sezgisel UT-farkındalıklı CSO algoritmanın akış diyagramı.	93
Şekil 5.5	: Kapatılan piko BS sayısına bağlı olarak UT'lerin toplam iletim güçlerinin (P_S) karşılaştırması (CoV = 1).	96
Şekil 5.6	: UT-farkındalıklı CSO algoritması için farklı heterojenlik düzeylerinde kapatılan piko BS sayısına bağlı P_S ($N = 100$).	98
Şekil 5.7	: UT-farkındalıklı CSO algoritmasının hücre-zumlama algoritmasında göre karşılaştırmalı UL güç kazancının CoV ile ilişkisinin farklı N değerleri için değişimi ($M = 30$).	99
Şekil 5.8	: UT-farkındalıklı CSO algoritmasının hücre-zumlama algoritmasına göre karşılaştırmalı UL güç kazancının M ile ilişkisinin farklı N değerleri için değişimi (CoV = 1).	100
Şekil 5.9	: UT-farkındalıklı CSO algoritmasının hücre-zumlama algoritmasına göre karşılaştırmalı UL güç kazancının M ile ilişkisinin farklı N değerleri için değişimi (CoV = 2.5).	101
Şekil 5.10	: Farklı M ve N değerleri için UT-farkındalıklı CSO algoritmasının kapatabileceği maksimum BS sayısı.....	102

TELSİZ AĞLARDA ENERJİ VERİMLİLİKLİ YENİ İLETİM PROTOKOLLERİ

ÖZET

Enerji verimliliği (EE: Energy-Efficiency) mühendisliğin her alanında önem taşıyan bir kavramdır ve bütün iletişim ağlarının planlanmasında referans alınması gereken bir parametredir. Bunun birçok nedeni vardır: Birincisi, küresel ısınmadan dolayı çevreye ilişkin farkındalık artmaktadır; ikincisi, veri trafiğindeki artışa paralel olarak enerji bedelleri de üstel olarak artmaktadır ve son olarak, yeni teknolojiye dayalı aygıtlarda pil ömrü kritik bir öneme sahiptir. EE bağlamında tez kapsamında yapılan çalışmalarda telsiz röle ağları için iki yöntem ve hücresel ağlar için de bir algoritma önerilmektedir.

Tezde yer alan ilk öneri telsiz röle ağlarında enerji verimlilikli röle seçme ile ilgilidir. Geniş ölçekli telsiz röle ağlarında röle seçimi önemli bir problemdir. Çünkü röle seçimine katılma olasılığı olan röle sayısı fazla olduğunda, merkezi yöntemler için kanal gücü veya konum gibi bilgileri toplamak, dağıtılmış yöntemler için ise çoklu-erişimi verimli bir şekilde yönetmek uygulanabilirlik açısından birçok güçlüğü barındırmaktadır. Özellikle merkezi yöntemlerde, rölelere ilişkin anlık kanal durum bilgisini toplamak için çok sayıda kontrol paket iletimine gereksinim duyulmaktadır. EE temelinde bakıldığında fazla sayıda kontrol paketinin iletimi enerji tüketimini artırmaktadır. Ayrıca röle seçimine katılabilmesi için röleler etkin tutulduğunda, uyku moduna kıyasla çok daha fazla güç tüketilmektedir. Bu yüzden, röle seçimi için bir röle alt kümesinin tanımlanması rastlantısal dağıtılmış geniş ölçekli ağlarda EE için önemli bir tekniktir. Bu çalışmada, rölelerin rastlantısal dağıtılmış olduğu bir telsiz ağ modeli için konuma dayalı enerji verimlilikli bir röle seçme yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemle göre etkin röle alanı tanımlanmakta ve yalnızca bu alan içerisinde kalan rölelerin etkin durumda bulunup röle seçimine katıldığı, alan dışında kalan rölelerin ise uyku moduna geçtiği varsayılmaktadır. Röle yoğunluğuna ve hedefin uzaklığına bağlı olarak EE açısından optimum etkin röle alanı araştırılmaktadır. Veri iletimi, kontrol paket iletimi ve devrede harcanan güç gibi bütün güç tüketim kaynakları hesaba katılmakta ve bu sayede ayrıntılı ve gerçekçi bir güç tüketim modeli üzerinde çalışılmaktadır.

Tezde yer alan ikinci öneri ise iki atlamalı iki röleli ağlarda enerji verimlilikli iletim ile ilgilidir. Çöz-ve-aktar tekniğiyle çalışan iki rölenin, kendi aralarında iletişim kurabildiği varsayılmaktadır. Bir noktadan başka bir noktaya iletimde paketin hangi hızda iletildiği EE açısından büyük bir önem taşımaktadır. Özellikle aygıtların devrelerinde harcanan ve iletim gücünden bağımsız olarak tanımlanan sabit güç tüketiminin hesaba katılması, optimum iletim hızının saptanmasını daha da önemli hale getirmektedir. Bu çalışmada kaynak-röle, röleler arası ve röle-hedef arasındaki iletim için veri hızları ayrı ayrı tanımlanmakta ve EE'yi maksimum yapan veri hızları bulunmaktadır. Önerilen yöntemde, kaynaktan gelen veri paketini rölelerden birisi hatalı olarak çözerse diğer röle, röleler arası bağlantının yardımıyla paketi hatalı çözen röleye iletmektedir. Bu yolla iki röle dağıtılmış uzay-zaman blok kodlamanın özel

bir biçimi olan dağıtılmış Alamouti kodlama ile paketi hedefe iletme olanağını elde etmektedir. Dağıtılmış Alamouti kodlama ile iletildiğinde çeşitleme kazancı elde edilmiş olmakta bu da servis dışı kalma olasılığını düşürmektedir. Servis dışı kalma olasılığını düşüren yöntemlerin EE açısından kazanç sağlayacağı öngörülmektedir, çünkü bu sayede yüksek hızlarda veri iletilebilmektedir. Elde edilen benzetim sonuçları önerilen yöntemin literatürde bu ağlar için önerilmiş olan ardışık iletim (SR: Successive Relaying) yöntemiyle karşılaştırıldığında hem EE açısından hem de etkin veri hızı (throughput) açısından çok daha iyi bir başarıma sahip olduğu ortaya çıkmaktadır.

Tezde son olarak ise hücresel ağlarda EE'yi artırmaya dönük bir hücre-kapatma algoritması önerilmektedir. Hücresel ağlarda toplam tüketilen enerjinin büyük bir kısmı gezgin aygıtlar (UT: User Terminal) yerine baz istasyonlarında (BS: Base Station) harcanmaktadır. Bununla birlikte, iletişim teknolojileri 5G'ye doğru gelişirken, kilometrekare başına düşen BS sayısı da artış eğilimindedir. Bundan dolayı bazı BS'lerin trafik yoğunluğu gün içerisinde veya gece bazı zaman dilimlerinde oldukça düşük seviyelere inebilmektedir. Literatürdeki birçok çalışmada aşağı yönlü (DL: Downlink) iletim göz önünde bulundurulmakta ve düşük trafik yoğunluğuna sahip BS'ler için uyku moduna geçme veya hücreyi tamamen kapatma önerilmektedir. Ama bilebildiğimiz kadarı ile önerilen BS kapatma yöntemleri yukarı yönlü (UL: Uplink) iletimi hesaba katmamış ve gezgin aygıtların pil ömrü açısından etkisini incelememiştir. Gezgin aygıtların harcadığı enerji, toplam tüketilen enerjiyi önemli ölçüde değiştirmemesine rağmen, sabit bir güç kaynağına bağlı olmayan gezgin aygıtların pil ömrü açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada ise bütün ağın EE'nin yanında UT'lerin harcadığı enerjiyi de göz önünde bulunduran optimum hücre kapatma (CSO: Cell Switch Off) algoritması geliştirilmiş ve "UT-farkındalıklı CSO algoritması" adı verilmiştir.

ENERGY-EFFICIENT NOVEL TRANSMISSION PROTOCOLS FOR WIRELESS NETWORKS

SUMMARY

Energy-efficiency (EE) has become an important research topic in wireless networks in recent years. There are many reasons of this interest in EE, but the most important one is that energy expenditures of service providers are constantly increasing as a consequence of the growth of traffic volume and the number of subscribers in cellular networks. This is the supply side of the communication which is related with downlink transmission. Besides, EE is also very important for mobile users, which is demand side, because battery life issue is one of the most important problems about new technology mobile devices and the development of battery technology is unable to keep up with increasing energy consumption due to high demand of wireless traffic. In addition to cellular networks, there are other type of networks, i.e. wireless sensor networks, where EE is critically important because the nodes are powered with batteries which are difficult to replace or need to be endured for long-term periods. Lastly, environmental awareness and health concerns also stimulate the research on this area.

This thesis proposes three different methods, two of them are for wireless relay networks and the other is for cellular networks. The first proposal of the thesis is about relay selection in large-scale wireless networks. The key question to be answered about relay selection in a large-scale randomly distributed wireless network is that how to select a relay energy-efficiently under a throughput (i.e., effective data rate) constraint with a reasonable complexity. It is not practical to collect instantaneous channel state information (CSI) of all relays for relay selection due to excessive control packet transmission and useless energy consumption because to hold a relay in active mode to participate relay selection process needs significantly more power consumption than to hold in sleep mode. In this thesis, a new energy-efficient relay selection technique is proposed for large-scale randomly distributed wireless networks for which an active relay region is introduced where only the relays in the region are taken into consideration for relay selection. Defining active relay region is critically important for energy-efficient transmission in large-scale wireless networks because only the inside relays participate in relay selection process and the outside relays can stay in sleep mode which is a low-power consumption mode. It is well known that the circuit power consumption of a transceiver is very dependent on its mode. Circuit power consumptions for transmitting and receiving modes, roughly speaking, are the same, one order of magnitude less for idle mode and three order of magnitude less for sleep mode. Therefore, the proposed relay selection technique limits the number of active relays which significantly improves EE. The overall transmission in the proposed technique is realized in three phases as initializing, relay selection and data transmission phases. There are two main objectives in initializing phase: first, to determine a relay subset where only the relays of this subset will participate in

relay selection and second, to put these relays in an order by allocating specific time slots to prevent collision of control packets in the other phases. It is assumed that all relays have low mobility and hence a static period can be defined during which all relays are assumed static. Therefore, the defined relay subset and allocated time slots are valid during the whole static period which means that the initializing phase is performed once in a static period. In the relay selection phase, a single-relay is selected for each data packet transmission only based on the CSI of source-relay channels of the relay subset which is determined in the initializing phase. The last phase is data transmission via the selected relay. The proposed relay selection technique increases EE at an acceptable complexity level without jeopardizing the effective data rate. The optimum size of the active relay region is investigated for EE in which relays perform decode-and-forward (DF) technique. A detailed and realistic power consumption model is studied by taking all possible sources of power consumption into consideration, i.e., data transmission, signaling packet transmission and circuit power consumption during all phases of the communication. Finally, it is shown that the proposed relay selection technique is well-suited to large-scale randomly distributed wireless networks where it is more energy efficient and provides substantially better performance in terms of effective data rate than certain methods given in the literature.

The second proposal of the thesis is about energy-efficient relaying in two-hop wireless relay networks. An energy-efficient decode-and-forward (DF) relaying technique is proposed for two-hop diamond networks where the source-destination communication is established by the help of two relays which have an inter-relay link. The communication is performed in three stages. The first stage is source-relay communication where S sends the data packet to the relays. The second stage is inter-relay communication where the relays inform the other relay through inter-relay link whether they decoded the packet correctly. There are three possibilities: (a) If both of the relays decode the data packet correctly, relay-destination communication starts. (b) If one of the relays cannot decode the packet correctly, the other relay sends the packet to this relay at a high data rate through the inter-relay link and then relay-destination communication starts. (c) If both relays decode incorrectly, relay-destination communication does not start and the packet is lost. The last stage is relay-destination communication: When both relays decode the data packet correctly they send the packet to the destination by the help of distributed Alamouti code. If only one of the relays decodes the packet correctly, it just sends the packet to the destination. The inter-relay link gives the opportunity of correcting the data packet between relays if only one of them decodes correctly the packet that is received from the source. Hence, both relays are able to send the data packet to the destination with distributed Alamouti coding which provides multipath diversity. In addition, optimum data rate adaptation is introduced for each link separately to maximize EE for the considered network. By exploiting diversity and optimum rate adaptation, it is possible to transmit at higher rates with reasonable outage probability which has critical effects on EE and effective data rate. It is showed that the proposed technique is substantially more energy-efficient and has a better effective data rate than the successive relaying technique given in the literature, moreover, more robust to the changes in system conditions, i.e. relay location, transmission power level.

The last proposal of the thesis is related with cellular networks where a cell switch-off (CSO) algorithm is proposed. Base-stations (BSs) are main energy consumers in a wireless cellular network. The number of BSs tends to increase in the foreseeable

future; moreover, this increase is expected to become even steeper with the advent of the small cell concept. It is worth noting that the traffic load in space and time is getting increasingly heterogeneous in cellular networks. As a result, parts of network will likely be lightly loaded at certain times and in such situations it only makes sense to switch-off as many BSs as possible without putting at risk the key performance indicators. Although there is an increasing volume of literature on the CSO concept, to the best of our knowledge, there is no study which considers the user terminal (UT) power consumption as a key performance indicator, while the uplink (UL) power consumption is one of the most important performance criteria in a mobile network. In many cases, switching-off BSs for downlink (DL) EE may result in an UL energy inefficiency, due to the fact that the UTs served by the switched-off BSs will need to be connected to further away BSs. In this thesis, a heuristic CSO algorithm for heterogeneous networks is proposed to achieve EE in the whole cellular network while taking into account the power consumption of UTs. The proposed heuristic algorithm, which is called as UT-aware CSO algorithm, tries to switch-off BSs one by one. First, it sorts the BSs according to predefined sorting criterion, where how much the sum power of UTs increases when a BS is switched-off is used as sorting criterion, and switches-off BSs starting from the first one in the ranking. By this way, both sides of the communication (DL and UL) are considered at the same time and the CSO is performed which minimally affects the UTs' transmission powers. Lastly, heterogeneity is considered at both sides: in the BSs (supply) and in the spatial traffic distribution (demand). In addition, DL/UL power control algorithms and a simple interference model are also introduced.

1. GİRİŞ

Son yıllarda telsiz iletişiminde yüksek hızda veri iletimine duyulan gereksinim günden güne artmaktadır. Akıllı telefonların yaygınlaşması, görüntülü konuşma gibi yüksek veri hızı gerektiren uygulamaların ve video kullanımının artması gibi nedenlerle hem toplam iletilen veri miktarı artmakta hem de yüksek hızda veri iletimine gereksinim duyulmaktadır. Dolayısıyla hem gezgin operatörler açısından hem de kullanıcı açısından enerji tüketiminde kayda değer bir artış olmaktadır [1]. Örneğin Telecom Italia operatör şirketi İtalya'daki enerji tüketiminde ikinci sıradadır [2]. Başka bir raporda bütün dünyada harcanan enerjinin yüzde 3'ünün telsiz iletişim ve internet altyapısı için harcandığı belirtilmektedir [3]. Gelecek yıllar içerisinde bu oranın çok daha fazla artacağı öngörülebilir, çünkü 3G ve 4G henüz Hindistan ve Çin gibi kalabalık ülkeler de dahil birçok ülkede yaygınlaşmamıştır. Bu yüzden enerji verimliliği son yıllarda daha büyük önem kazanmış ve araştırmalar bu konu üzerinde yoğunlaşmaya başlamıştır

Hücresele ağlarda baz istasyonları temel enerji tüketicisi durumundadır. Tipik bir BS 0.5 kW ile 2 kW arasında güç tüketmekte [4] olup hücresele ağlardaki toplam enerjinin ortalama %50 ile %80 arasındaki kısmı BS'lerde tüketilmektedir [5]. Bir BS'de güç tüketimi iki kısımda ele alınabilir: (a) iletim gücü, (b) soğutma sistemi, anten gibi iletimden bağımsız aygıtlarda harcanan güç. İletim gücü trafik yoğunluğuna bağlı olarak değişirken, ikinci kısım sabit olup trafik yoğunluğundan bağımsızdır. Bununla birlikte, bu ikinci kısım BS'deki güç tüketiminin büyük bir kısmından sorumludur ve trafik olmadığı durumda BS'deki güç tüketimi, maksimum trafik yoğunluğundaki güç tüketiminin %60-80'ine eşittir [6].

Hücresele ağlardaki trafik davranışına ilişkin bir önemli nokta ise trafik yoğunluğunun bütün BS'lere dengeli bir biçimde dağılmıyor olmasıdır. Örneğin [7]'de incelenen gerçek bir hücresele ağda BS'lerin %10'unun toplam trafiğin %50-60'ını taşıdığı ifade edilmektedir. Yani, BS'lerin büyük bir kısmı hafif trafik yoğunluğuna sahip olup, enerji verimliliğini artırmak için yönetilebilmektedir. Buna ek olarak,

hücresel ağlarda BS'ler günün yoğun saatlerinde talep edilen maksimum kapasiteyi karşılayabilecek biçimde yerleştirilmektedirler. Günün önemli bir bölümünde trafik yoğunluğu kapasitenin altındadır ve bu da önemli ölçüde gereksiz enerji tüketimine neden olmaktadır. Buraya kadar söz edilen nedenlerle, düşük trafik yoğunluğuna sahip BS'lerin kapatılmasının sezgisel olarak önemli kazanımlar elde edilecek bir yöntem olarak ortaya çıkacağı düşünülmektedir. Literatürde, hücresel ağlardaki enerji verimliliğini artırmaya yönelik hücre kapatma (CSO: Cell Switch-Off) öneren birçok bağımsız çalışma bulunmaktadır.

Enerji verimliliği (EE) konusunu yalnızca toplam enerji tüketimi ve gezgin operatörler açısından ele almak doğru değildir. EE, sabit bir güç kaynağından beslenmeyen, cep telefonları, telsiz algılayıcı ağılarındaki (WSN: Wireless Sensor Network) algılayıcılar gibi sınırlı bir güç kaynağından beslenen aygıtların pil ömürleri açısından da büyük öneme sahiptir. Pil teknolojilerindeki gelişme, veri hızındaki artışa ve dolayısıyla veri iletimi nedeni ile harcanan enerjideki artışa oranla oldukça yavaştır. Örneğin gezgin aygıtlarda da kullanılan işlemcilerin tükettiği enerji 2 yıllık bir periyot için %150 artmasına rağmen pil teknolojisinde aynı periyottaki gelişmeler sayesinde pil ömrü ancak %10 artmıştır [8]. Bununla beraber cep telefonlarında harcanan enerjinin büyük bir kısmı iletişim araçlarında harcanmaktadır. Cep telefonları için bluetooth, wifi ve hücresel iletişim için harcanan ortalama enerji toplam harcanan enerjinin %50'sine karşılık gelmektedir [8]. Sonuç olarak kullandığımız akıllı telefonlarda da en büyük şikayet pil ömrünün kısalığı nedeniyledir [9]. Tüm bu nedenlerden dolayı telsiz iletişimde EE konusu son yıllarda daha fazla araştırmacının ilgi alanına girmiştir. Uluslararası bazı araştırma projeleri (GreenRadio, EARTH, OPERA-Net, eWIN) sırf bu konuya adanmıştır [9].

Diğer taraftan iki uç arasındaki iletişimin belli bir sayıda röle aracılığıyla sağlandığı röle ağları enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahip olarak görülmektedir [9]. Röle ağlarında EE açısından kaynak-hedef arasındaki atlama sayısı, iletme katılan röle sayısı, rölelerin çalışma stratejisi (kuvvetlendir ve aktar (AF: Amplify-and-Forward) veya çöz ve aktar (DF: Decode-and-Forward)), rölelerin hangi durumda iletme katılacağı, güç paylaşımı gibi oldukça geniş bir alanda araştırmalar yürütülmektedir. Bununla birlikte röle ağları ile ilgili diğer önemli bir konu en iyi röle veya rölelerin

nasıl seçileceği konusudur. Literatürde enerji verimli röle seçme yöntemleri ile ilgili de birçok çalışma bulunmaktadır.

1.1 Literatürde Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Tezde, EE'yi artırmaya yönelik üç farklı yöntem önerilmektedir: (a) röle ağlarında enerji verimli röle seçme yöntemi, (b) röle ağlarında enerji verimli iletim yöntemi, (c) hücresel ağlarda hücre-kapatma yöntemi. Ele alınan yöntemlerle ilgili literatür de bu sıra ile verilecektir. Röle ağlarında öncelikli konu rölelerin nasıl seçileceği konusudur. [10] enerji verimli bir röle seçme yöntemi önermekte ve bu yönteme göre kaynaktan aldıkları işareti doğru olarak çözen rölelerin kümesinden belirli bir sayıda röle seçilmekte ve seçilen röleler işbirlikli hüzmeye oluşturularak işareti hedefe iletmektedir. Diğer bir enerji verimli çoklu röle seçme yöntemi [11]'de önerilmektedir. Bu makalede, veri iletiminden önce iletime katılacak olan röle altkütlesi, röle-hedef arasındaki kanal güçlerine bağlı olarak belirlenmektedir. Kanal bilgisinin toplanması, röle seçimi ve işbirlikli hüzmeye için gerekli kontrol paket iletiminden dolayı harcanan güç göz önünde bulundurulurken devrelerde harcanan güç hesaba katılmamaktadır.

Tek röle seçimi genellikle çoklu röle seçmeye göre daha basit protokollere sahip olmakla birlikte, [12]'de belirtildiği üzere tek röle seçme yöntemleri bütün rölelerin kullanıldığı yöntemlerle aynı çeşitleme derecesine sahip olmaktadır. [9] çok basit bir protokole sahip zamanlayıcı temelli dağıtılmış tek röle seçme yöntemi önermekte ve [13] bu tekniği kullanarak enerji verimli tek röle seçme yöntemi önermektedir. Zamanlayıcı temelli röle seçme yönteminin önemli bir avantajı, dağıtılmış yapısı sayesinde daha az kontrol paketi iletimine gereksinim duymasıdır. Ancak diğer bir zamanlayıcı temelli röle seçme yöntemi önerilen [14]'te bu tarz röle seçme yöntemleri üzerinde önlemleri bir varsayımı tartışmaktadır. [11–13]'te zamanlayıcısı sonlanan rölelerin 1 bit veya 1 simge gönderdikleri varsayılmaktadır. Ancak gerçek ağlarda iki uç arasındaki iletişim ancak paketler aracılığıyla yapılmaktadır ve bu durumda paketlerin çakışma olasılığı artmaktadır veya çakışma olasılığının fazla artmaması için bekleme süreleri uzamaktadır. Sonuçta, gerçek sistemlerde zamanlayıcı temelli röle seçme için çakışma olasılığını makul bir seviyede tutmak için belirli bir bekleme süresi gerekmektedir ve bu da EE açısından bir dezavantaj oluşturmaktadır. [15]'te EE'yi iyileştirme amacı ile iletimin ya doğrudan ya da işbirlikli olarak seçilen röle

aracılığıyla yapıldığı fırsatçı bir tek-röle seçme yöntemi önerilmektedir. [16]'da rölenin DF tekniği ile çalıştığı üç-düğümlü (kaynak, röle ve hedef düğümleri) ağlar için belirli bir servis kalitesini sağlayan EE açısından optimum güç paylaşımı ve optimum röle konumu incelenmektedir. Bu makalede, aynı zamanda üç-düğümlü ağlar için yapılan analizler temel alınarak çok-düğümlü (multi-node) ağlar için de enerji verimlilikli röle seçme ve basit bir rotalama (routing) protokolü de önerilmektedir. Rölelerin AF tekniği ile çalıştığı, çift yönlü asimetrik trafik modeli için tek-röle seçimi ve güç paylaşımı yöntemi [17]'de önerilmektedir. Burada kanal bilgisini ve güç paylaşım bilgisini elde etmenin enerji maliyetinin hesaba katıldığı ama devrelerde harcanan enerjinin hesaba katılmadığı durum için röle sayısının EE'ye etkisi de incelenmektedir. EE'nin ve etkin veri hızının başarımlı ölçütü olarak ele alındığı ve farklı röle seçme yöntemlerinin bu ölçütler açısından ele alındığı kapsamlı bir çalışma [18]'de yapılmaktadır.

[10,12,13,15–17] gibi çalışmaların zayıf noktası bu makalelerde önerilen yöntemlerde geniş-ölçekli dağıtılmış telsiz ağlarda enerji tüketimi ve karmaşıklık açısından uygulanabilmelerinin zor olmasıdır. Çünkü geniş-ölçekli ağlarda seçime katılan röle sayısı oldukça fazla olabilmektedir ve bu da enerji tüketimini artırırken aynı zamanda uzun işlem sürelerine gereksinim duymaktadır. Enerji tüketiminin büyük oranda artmasının nedeni rölelerin devrelerinde harcanan gücün rölenin hangi modda olduğu (alıcı, verici, bekleme ve uyku modu) ile yakından ilgili olmasıdır. Alıcı ve verici modunda harcanan güç, bekleme moduna göre 10 kat mertebesinde ve uyku moduna göre 1000 kat mertebesinde daha fazladır [19]. Bundan dolayı röle seçimine katılacak olan etkin röle sayısını azaltmak ve rölelerin büyük bir kısmını uyku moduna geçirmek telsiz ağlarda EE açısından kritik bir öneme sahiptir. Literatürde telsiz ağlarda EE'yi artırmak ve kontrol paket iletim sayısını azaltmak için kullanılan yaygın bir yaklaşım seçime katılacak olan röle sayısını sınırlandırarak bir röle altkümesinin belirlenmesidir. Örneğin [19–23]'te önerilen yöntemlerde, ağdaki aygıtların kümelere ayrıldığı varsayımı altında, küme başının iletime katılacak olan röleler belirli bir yarıçap içerisindeki rölelerden seçilmektedir. Sonrasında seçilen rölelerle birlikte hedefe, zaman veya frekans bölgesinde dik iletim [19, 23], dağıtılmış uzay zaman blok kodu [20, 21] veya hüzmeye iletim (beamforming) [22] tekniklerinden birisinin yardımıyla iletmektedir. Ancak bu yaklaşımda röle sayısında sınırlama kaynağın iletim gücünü azaltarak yapılmaktadır ve böylece yalnızca kaynağa yakın röleler arasından

seçim yapılabilir. Bu durum röle seçimi için önemli bir kısıt getirmektedir. Bu kısıtı ortadan kaldırmak için önerilen yöntem röle altkümesinin belirlenmesinde rölelerin konum bilgisinin kullanılmasıdır. Örneğin, [24]’te çok atlamalı röle ağı için rölelerin konum bilgisinden yararlanarak her atlamada enerji verimlilikli röle seçme yöntemi önerilmektedir. Bu makalede her atlama için belirli bir iletim uzaklığı ile iletim açısı belirlenmekte ve bu uzaklık ile açının içinde kalan rölelerden konumuna ve kanal koşullarına bağı olarak bir sonraki röle seçilmektedir. [25]’te ise röle seçimi için belirli bir servis dışı kalma olasılığı kısıtını sağlayan rölelerden oluşan bir elverişli röle alanı tanımlanarak röle altkümesi belirlenmektedir. Bu yolla belirlenen röle altkümesinin dışındaki röleler uyku moduna geçirilerek etkin röle sayısı azaltılmış olmakta ve Aloha çoklu-erişim tekniğı ile röle altkümesinin içerisinde bir röle rastlantısal olarak seçilmektedir. Rastlantısal seçimde anlık kanal bilgisine gereksinim duyulmadığı için ek işaret iletim yükü (signalling overhead) azaltılmakta ve bu sayede enerji tüketimi de azaltılmış olmaktadır.

Buraya kadar incelenen literatür iletime katılacak rölelerin enerji verimlilikli olarak nasıl belirleneceğı ile ilgilidir. Bunun dışında iletime katılacak rölelerin belirli olduğu, röle seçimine gereksinim duyulmayan ağlarda veya röle seçiminden sonra seçilen röleler üzerinden yapılan iletimlerde bağlantı uyarlama (link adaptation), yani güç ve iletim hızının uyarlanması ile EE’nin iyileştirilmesi de önemli bir çalışma alanıdır. Enerji verimlilikli iletim ile ilgili ilk çalışmalardan birisi [26]’dır ve bu makalede farklı modülasyon teknikleri EE açısından incelenmektedir. Vericinin anlık kanal bilgisine sahip olduğu durum için EE’yi maksimum yapan güç ve hız optimizasyonu [27] ve [28]’de incelenmektedir. [27]’de frekans seçici kanallar göz önünde bulundurulurken [28]’de düz sönümlemeli kanallar ele alınmakta ve kesirsel programlama (fractional programming) yöntemiyle önemli bazı sonuçlar elde edilmektedir. Ortalama etkin veri hızı kısıtı altında maksimum EE ve EE-etkin veri hızı ödünleşim (trade-off) analizleri [29]’da yapılmaktadır. Enerji verimliliğı ile diğer bazı parametreler arasındaki ödünleşim geniş kapsamlı olarak [2]’de ele alınmaktadır. Çok girişli çok çıkışlı (MIMO: Multi Input Multi Output) sistemlerde EE analizleri [30]’da yapılmaktadır ve kaynak-hedef arası uzaklık belirli bir eşik değerin üzerinde iken önemli bir oranda enerji tasarrufunun sağlanabildiğı gösterilmektedir. Rayleigh sönümlemeli kanallarda MIMO sistemler için enerji verimlilikli güç paylaşımı [31]’de

çalışılmaktadır. AF tekniğiyle çalışan çok sayıda rölenin olduğu iki atlamalı ağlar için enerji verimlilik-spektral verimlilik ödünleşim analizleri [32]'de yapılmaktadır. Çok atlamalı ağlarda enerji tüketim kısıtı altında toplam harcanan enerji ile uçtan uca veri iletim hızı arasındaki ödünleşim [33]'te incelenmektedir.

Hücresel ağlarda EE'ni artırmak için önerilen önemli bir yöntem hücre-kapatma (CSO) yöntemidir. Hücre kapatmaya ilişkin temel olarak iki farklı yaklaşım vardır: (a) Belirgin (deterministic) yaklaşım, anlık trafik bilgisine bağlı olarak BS kapatma yöntemlerinin geliştirilmesi; (b) İstatistiksel yaklaşım, trafiğin istatistiksel davranışı temel alınarak BS kapatma algoritmalarının oluşturulması. Bunun yanında BS kapatma algoritmaları kapatma prosedürünün yönetilmesi açısından da merkezi ve dağıtılmış olmak üzere ikiye ayrılır. Merkezi algoritmalarda, bütün hücrelere ilişkin bilgi belirli bir merkez tarafından toplanır ve kapatma prosedürü bu bilgiye bağlı olarak yönetilir. Merkezi yöntemler, dağıtılmış yöntemlere kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir ama hücre bilgilerinin toplanması yüksek oranda durum bilgisinin iletilmesini gerekli kılmaktadır. Dağıtılmış algoritmalar ise daha az bilgi değişimine ihtiyaç duymaktadır ama bu durum performans kayıplarına neden olmaktadır. Bu bilgiler ışığında literatürdeki BS kapatma ile ilgili çalışmalar aşağıda listelenmektedir.

Anlık kanal bilgisinden yararlanılarak önerilen algoritmalar [34–41]'de verilmektedir. [34]'te hücre-zumlama (cell-zooming) adı verilen bir CSO algoritması önerilmektedir. Buna göre hücreler trafik yoğunluğuna bağlı olarak en az yoğun olandan en çok yoğun olana sıralanmaktadır ve en az yoğun olandan başlanarak kapatılmaktadır. Bir BS kapatıldığında o hücredeki UT'lere komşu BS'ler tarafından servis verilmektedir. [35] hücre-zumlama algoritmasının sonlandırma kistasını değiştirerek kapatılabilen BS sayısını artırmaktadır. Diğer basit bir merkezi hücre kapatma yöntemi [37]'de önerilmektedir ve buna göre trafik yoğunluğu belirli bir eşik değerin üzerinde olan BS'ler birer birer rastlantısal bir sırada kapatılmaktadır. [42]'de matematiksel bir model olan küme örtme problemi (set-cover problem) kullanılarak kapatılacak olan BS'ler belirlenmektedir. Bu makalede BS'lerin kapatılması için kullanılan sıralama ölçütü olarak BS'lerin trafik yükü ve BS'lere bağlı olan UT sayısı gibi farklı ölçütler kullanılarak başarımlı analizi yapılmaktadır. Trafik yükünün hücre kapatma için ölçüt olarak kullanılmasının yerine BS'lerin bağlantı kurduğu UT'lere ve komşu hücrelerdeki UT'lere olan uzaklıklarının ölçüt olarak kullanıldığı bir CSO algoritması

da [39]'da önerilmektedir. [38]'de kapatılan BS'nin komşularına aktarılan yük miktarı başarımlı ölçütü olarak değerlendirilmekte ve hücre kapatma sürecinin ağı en az etkileyecek şekilde yürütülmesi amaçlanmaktadır. [36] ve [40]'ta, UT-BS eşleştirme süreci, trafik yoğunluğunu belirli BS'lerde yoğunlaştıracak biçimde yönetilmektedir ve bu yolla diğer BS'lerin trafik yoğunluğu azaltılarak kapatılabilmelerine olanak sağlamaktadır. [41]'de önerilen dağılmış CSO algoritmasında komşu BS'ler kendi aralarında trafik yük bilgilerini yinelemeli (iterative) olarak alıp vererek kapatılacak olan BS'leri belirlemektedirler.

[7]'de toplam ağ yükünün zamanda periyodik olarak tanımlanabildiği ama tekil BS'ler için böyle bir tanımlamanın mümkün olmadığı belirtilmektedir. Bundan dolayı toplam trafik yoğunluğunun istatistiksel davranışını temel alarak önerilen CSO algoritmaları da vardır [43–46]. [43] ve [44]'te, günlük trafik davranışına bağlı olarak optimum hücre kapatma yöntemi için basit bir analitik model geliştirilmektedir. [45]'te mikro ve makro BS'lerin yer aldığı heterojen ağlar için bir CSO algoritması önerilmektedir ve mikro BS'ler kapatılabilirken makro BS'lerin iletim gücü artırılarak kapatılan mikro BS'lerin alanları kapsama alanı içine alınmaktadır. [46]'da tamamen ortalama trafik yükü ve uzamsal trafik dağılımı gibi istatistiksel bilgi kullanılarak çok-amaç fonksiyonlu optimizasyon ile BS kapatma yöntemi önerilmektedir. Bu makalede çok-amaç fonksiyonlu optimizasyon tekniği olarak NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) kullanılarak optimal hücre kapatma konfigürasyonları bulunmaktadır.

Buraya kadar ele alınan hücre kapatma ile ilgili literatürde temel amaç ağda tüketilen toplam gücü azaltmaktır ve hücre kapatmanın UT tarafındaki etkisi incelenmektedir. Diğer bazı çalışmalarda [36, 47, 48] hücre kapatma konusu içerisinde UL tarafı da ele alınmaktadır. [36]'da homojen ağlar için dağıtılmış CSO algoritması önerilmektedir ve temel olarak [34]'te önerildiği gibi UT-BS eşleştirmeleri trafik yükünü belirli BS'lerde yoğunlaştıracak şekilde yapılmaktadır. [34]'ten farklı olarak belirli bir eşik değerin üzerinde trafik yükü olan BS'ler kapatılmamaktadır ve bu sayede UT'lerin güç tüketimini fazla artırmamak için kapatılan BS sayısı sınırlandırılmaktadır. Ancak bu makalede UT'lerin güç tüketimini azaltmak için bir CSO algoritması geliştirilmemektedir, yalnızca kapatılan BS sayısı azaltılmaktadır. [48]'de ise heterojen ağlarda DL kapsama alanı ve UL ortalama güç tüketimi kısıtları altında mikro BS'ler

tanımlanarak ve açık kalacak olan makro BS'lerin iletim güçleri uyarlanarak belirli makro BS'lerin kapatılması önerilmektedir. Bu makalede rastgele geometri araçları (stochastic geometry tools) kullanılarak, yani BS'lerin konumları ve açık/kapalı olmaları olasılıksal olarak tanımlanarak, ortalama olarak kaç tane makro BS'nin kapatılması gerektiği bulunmaktadır. Ancak, burada herhangi bir ağ için hangi BS'lerin kapatılacağı belirlenmemektedir, yalnızca ortalama olarak kaç tane BS'nin kapatılacağı belirlenmektedir. Homojen ağlarda belirli bazı BS dizilimleri için enerji tüketimi ve etkin veri hızı ödünleşimi [47]'de incelenmektedir. DL/UL güç kontrolünün düşünüldüğü bu çalışmada hangi BS'lerin kapatılacağına dinamik olarak karar verilmemekte, belirlenmiş bazı BS dizilimleri incelenmektedir.

1.2 Tezin Konuya Katkıları

Bu tezde önerilen 3 yöntemin literatüre sağladığı katkılar şöyle açıklanabilir: Önerilen ilk yöntem olan enerji verimlilikli röle seçme yöntemi rölelerin gezgin olduğu ve rastlantısal dağıldığı geniş ölçekli ağlar için oldukça uyumlu bir yöntemdir. Burada rölelerin saptanması, rölelere zaman aralıklarının atanması, röle seçimi ve veri iletimi aşamaları olmak üzere bütün aşamalarda, devrelerde harcanan enerji, kontrol paketlerinin iletimi için harcanan enerji ve veri iletimi için harcanan enerji gibi bütün enerji tüketim kaynakları hesaba katılmakta ve bu sayede ayrıntılı ve gerçekçi bir güç tüketim modeli ele alınmaktadır. Enerji verimlilikli röle seçme ile ilgili literatürdeki birçok çalışmada [10, 13, 21, 23] devrelerde harcanan enerji hesaba katılmazken, diğer bazı çalışmalarda da [13, 15, 19–21, 23] kontrol paketlerinin iletimi için harcanan enerji düşünülmemiştir. Çalışmaların büyük bir çoğunluğunda [10, 15, 19–21, 23] ise dağıtılmış geniş ölçekli ağlar için çok önemli olan rölelerin saptanma aşaması incelenmemiştir. Tezde önerilen ilk yöntemde yalnızca içerisindeki rölelerin etkin olduğu ve röle seçimine katıldığı bir etkin röle alanı (ERA) tanımlanmaktadır. Bu ERA'nın merkezinin konumu tamamen kaynak-hedef arası uzaklığa bağlı olarak belirlenmekte ve optimum yarıçapı da sistem parametrelerine bağlı olarak bulunmaktadır. Bu sayede röle seçimine konu olan röle sayısı kısıtlanmakta ve rölelerle ilgili kanal bilgisinin elde edilmesi, kaynak atamaları için gerekli kontrol paket iletimi gibi röle sayısına bağlı enerji tüketiminde tasarruf sağlanmaktadır. Aynı zamanda devrede harcanan enerji de göz önünde bulundurulduğunda, ERA'nın

dışındaki rölelerin düşük güç tüketimi için uyku moduna geçmeleri sağlanmaktadır. Sonuç olarak bu yaklaşım sayesinde, servis dışı kalma olasılığında enerji verimliliğinin lehine olarak bir miktar taviz verilmekte buna karşılık etkin röle sayısı ve buna bağlı olarak toplam enerji tüketiminde önemli ölçüde azalma sağlanmaktadır. Literatürde bildiğimiz kadarıyla EE'yi artırmak için kaynak-hedef arasında bir alanın tanımlandığı ve bu alan içerisinde merkezi bir yöntemle röle seçimi yapıldığı bir çalışma yoktur. Bu yönüyle oldukça gerçekçi bir güç tüketim modeli göz önünde bulundurularak, yeni bir enerji verimlilikli röle seçme yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntemde, kaynak-hedef arası uzaklığa bağlı olarak EE'yi maksimum yapan optimum ERA büyüklüğü, dolayısıyla optimum ortalama etkin röle sayısı bulunmaktadır. Bununla beraber EE'nin veri hızına bağlı değişimi gözlemlenmekte ve EE'yi maksimum yapan veri hızı, kaynak-hedef arası uzaklığa bağlı olarak bulunmaktadır. EE analizlerinin yanında etkin veri hızı analizleri de yapılmakta ve EE'yi maksimum yapan sistem değişkenleri için etkin veri hızı gözlemlenmektedir. Önerilen yöntem literatürdeki belirli yöntemlere göre önemli ölçüde daha iyi EE başarımına ve daha yüksek etkin veri hızına sahip olduğu bilgisayar benzetimleri ile ortaya konmaktadır.

Tezde ikinci olarak, iki atlamalı ve iki röleli ağlar için enerji verimliliğini artıracak bir iletim yöntemi önerilmektedir. DF tekniğiyle çalışan iki rölenin kendi aralarında iletişim kurabildiği varsayılmaktadır. Kaynak veri paketini her iki röleye de göndermekte ve rölelerden her ikisi de doğru çözerse dağıtılmış Alamouti kodlama ile hedefe göndermektedirler. Eğer rölelerden birisi hatalı çözer ise doğru çözen röle hatalı çözen röleye yüksek bir hızda paketi tekrar göndermektedir. Bu sayede hedefe tek bir rölenin paketi iletilmesinden her iki röleden birden gönderilerek çok-yollu çeşitleme kazancı sağlanmaktadır. Bu çalışmada kaynak-röle, röleler arası ve röle-hedef arasındaki iletim için veri hızı ayrı ayrı tanımlanmakta ve enerji verimliliğini maksimum yapan veri hızları bulunmaktadır. Bildiğimiz kadarıyla literatürde iki atlamalı iki röleli ağlar için her aşamada veri hızlarının ayrı ayrı tanımlanarak EE'yi maksimum yapacak şekilde uyarlandığı bir yöntem önerilmemiştir. Bu yüzden burada önerilen enerji verimlilikli iletim yöntemi iki atlamalı ve iki röleli ağlar için ilk olma özelliğini taşımaktadır. Bunun yanında, rölelerin konumunun EE ve etkin veri hızı üzerindeki etkisi incelenmekte ve bu parametreleri maksimum yapan röle konumları bulunmaktadır. Elde edilen benzetim sonuçları önerilen yöntemin

literatürde bu ağlar için önerilmiş olan ardışık iletim (successive relaying (SR)) yöntemiyle karşılaştırıldığında hem enerji verimliliği açısından hem de etkin veri hızı açısından çok daha iyi bir başarıma sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Son olarak, önerilen yöntemin EE ve etkin veri hızı başarımlarının rölenin konumundaki değişikliklerden SR yöntemine kıyasla daha az etkilendiği ve röleler optimum konumlarından uzaklaştığında önerilen yöntemin SR yöntemine göre EE ve etkin veri hızı kazançlarının artmakta olduğu bilgisayar benzetimleri ile gösterilmektedir.

Bu tezde önerilen son yöntem ise hücresel ağlarda EE'yi artırmaya yöneliktir. Hücresel ağlarda toplam tüketilen enerjinin büyük bir kısmı BS'lerde harcanmaktadır ve bundan dolayı, düşük trafik yoğunluğuna sahip BS'lerin kapatılmasının sistemin enerji verimliliği açısından önemli kazanımlar sağlayacağı düşünülmektedir. Literatürdeki birçok çalışmada düşük trafik yoğunluğuna sahip BS'ler için hücre kapatma (Cell Switch Off - CSO) önerilmekte ve kapatma kıstası olarak aşağı yönlü olan (downlink, DL) iletim göz önünde bulundurulmaktadır. Ama bildiğimiz kadarı ile hücre kapatma ile ilgili literatürde UT'lerin ortalama güç tüketimini başarımlar ölçütü olarak ele alan bir çalışma yoktur. Halbuki BS kapatma yaklaşımı yukarı yönlü (uplink, UL) iletimi, dolayısıyla UT'lerin pil ömrünü doğrudan etkilemektedir. Çünkü bir BS'nin kapatılması durumunda onun kapsama alanındaki bütün UT'ler daha düşük bir kanal gücüne sahip başka bir BS'ye bağlanma durumunda kalacaktır. Böyle bir durumdaki UT ancak daha yüksek bir iletim gücüyle eski servis kalitesini elde edebilmektedir. Bundan dolayı, hücre kapatma yöntemleri ağda harcanan toplam enerjiyi azaltmasına rağmen sabit bir güç kaynağına bağlı olmayan UT'lerin pil ömrünü de azaltmaktadır. Bu çalışmada ise amaç bütün ağın enerji verimliliğinin yanında UT'lerin harcadığı enerjiyi de göz önünde bulunduran optimum hücre kapatma algoritması geliştirmektir. Heterojen ağlar göz önünde bulundurulmaktadır ve heterojenlik hem BS'lerde hem de trafik yükünün dağılımında olmak üzere iki taraflı olarak ele alınmaktadır. Heterojenlik seviyesindeki değişime göre önerilen algoritmanın hücre kapatma kapasitesi ve toplam UT güç tüketim analizleri yapılmaktadır. Heterojenlik arttıkça hücre kapatma kapasitesinin arttığı ve toplam UT güç tüketiminin azaldığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmanın literatüre sağladığı temel katkı anlık trafik bilgisine bağlı olarak iletişimin DL ve UL taraflarını beraberce ele alan ilk CSO algoritması olmasıdır. Ayrıca, DL/UL güç kontrol algoritmaları ile basit bir girişim modeli de önerilmektedir. Son

olarak önerilen algoritma literatürdeki hücre zumlama [34] ve rastlantısal CSO [37] algoritmaları ile karşılaştırılmakta ve aynı sayıda BS kapatıldığında toplam UT güç tüketiminde önemli ölçüde tasarruf sağlanabildiği gösterilmektedir.

2. TEMEL KAVRAMLAR

Bu bölümde, telsiz iletişim kanalları ve iletim teknikleri incelenmekte, sonraki bölümlerde kullanılan enerji verimliliği, ardışık iletim, sönümlemeli kanallar gibi genel kavramlar kısaca anlatılmaktadır.

2.1 Sönümlemeli Kanallar

Telsiz ağlarda, iletilen bir işaret hedefe varıncaya kadar aldığı yol boyunca zamana, konuma ve frekansa bağlı bazı değişimlere uğramaktadır ve bu duruma genel olarak sönümleme adı verilmektedir. İletilen işaret yayıldığı yolda bazı engellerle karşılaştığında engelin özelliklerine göre yansımaya, kırınım ve saçılıma uğramaktadır. Bunlar kısaca şu şekilde tanımlanmaktadır [49]:

- Yansıma (reflection): Elektromanyetik dalga, dalga boyundan çok daha büyük boyutlara sahip pürüzsüz yüzeyli bir nesneyle karşılaştığında yansımaktadır. Bu nesnelere dağlar, büyük binalar ve yeryüzü örnektir.
- Kırınım (diffraction): Elektromanyetik dalga, dalga boyundan büyük boyutlara sahip nesnelerin köşelerinde kırınımına uğramaktadır. Kırınım, kaynak ile hedef arasında işaret geçirmeyen bir nesne nedeni ile doğrudan görüş hattı (LOS: Line of Sight) olmadığı durumlarda da işaretin hedefe ulaşmasını sağlaması nedeni ile gölgeleme olarak da adlandırılmaktadır.
- Saçılma (scattering): Elektromanyetik dalga, boyutları dalga boyuyla aynı mertebede büyüklüğe sahip nesnelerde, veya girintili çıkıntılı yüzeylerde saçılmaya uğramaktadır. Saçılma sokak lamba direkleri, sokak tabelaları ve ağaç yaprakları gibi nesnelerde oluşmaktadır.

Sönümleme temel olarak iki alt başlık altında ele alınmaktadır: geniş ölçekli ve küçük ölçekli sönümleme.

2.1.1 Geniş ölçekli sönümleme

Geniş ölçekli sönümleme, işaretin uzak mesafelere yayılması ve büyük nesnelerin kenarlarında kırınımına uğraması sonucu ortaya çıkmaktadır. Geniş ölçekli sönümleme de iki kısımda incelenmektedir: yol kaybı ve gölgeleme. Kuramsal ve deneysel modeller göstermektedir ki, ortalama alınan güç verici-alıcı arasındaki uzaklığın logaritması ile orantılı olarak düşmektedir [50]. Ortalama geniş ölçekli yol kaybı, verici-alıcı arasındaki uzaklığa bağlı olarak

$$\overline{PL}(d) \propto \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (2.1)$$

ve logaritmik olarak

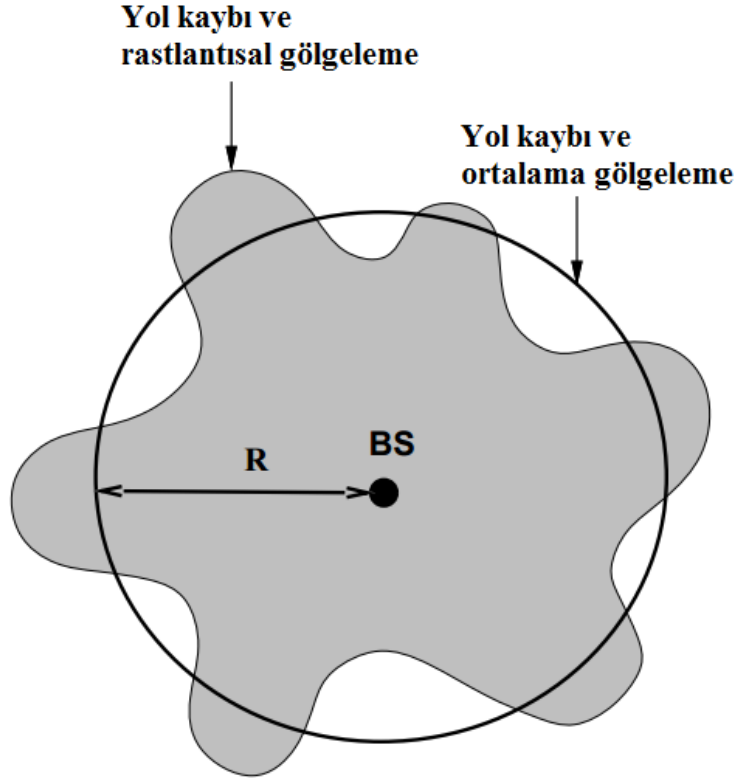
$$\overline{PL}(d)[dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.2)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Burada n yol kaybı sabitini göstermekte ve uzaklıkla birlikte işaret gücünün düşüş hızını belirlemektedir. n boş uzay için 2, nesnelerin olduğu ortamlarda ise genellikle 2-6 arasında değerler almaktadır. d_0 vericiye yakın bir referans uzaklığı, d ise verici-alıcı arasındaki uzaklığı göstermektedir.

(2.2)'deki eşitlik belirli bir uzaklıkta ortalama yol kaybını göstermektedir ama deneysel çalışmalar belirli bir konumdaki alıcı için yol kaybının, $PL(d)[dB]$, ortalaması $\overline{PL}(d)[dB]$ olacak şekilde rastlantısal olduğunu ve log-normal dağılıma uyduğunu göstermektedir. Diğer bir deyişle

$$PL(d)[dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2.3)$$

biçiminde yazılmaktadır ve burada X_σ , standart sapması σ , ortalaması 0 olan Gauss dağılımlı rastlantısal değişkendir. Ancak önemli nokta hem X_σ 'nın hem de σ 'nın birimi dB'dir. X_σ 'nın eklenmesiyle yol kaybı rastlantısal bir değişken olmaktadır ve bu duruma log-normal gölgeleme adı verilmektedir. Baz istasyonlarının (BS) kapsama alanlarının tanımlanmasında da gölgelemenin önemli bir etkisi vardır. Bir BS'nin kapsama alanı alınan işaretin gücü belirli bir eşik değerin üzerinde olduğu alan olarak tanımlanmaktadır. Gölgelemenin kapsama alanı üzerindeki etkisi Şekil 2.1'de daha net olarak gösterilmektedir [51]. Gölgelemenin etkisi Gauss dağılımlı bir değişken ile ifade edildiği için bir gezgin aygıtın yüzde yüz kapsama alanı içerisinde olduğunu yalnızca konumuna bakarak söylemek de mümkün değildir.



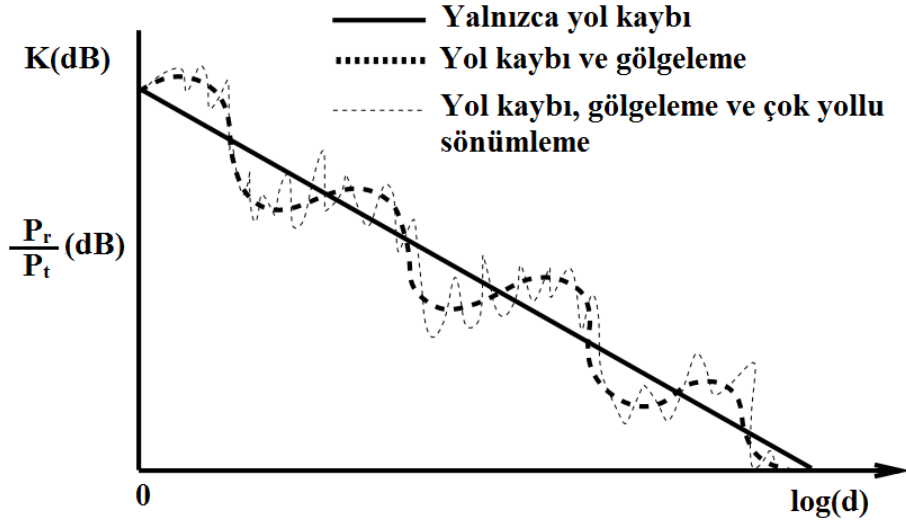
Şekil 2.1 : Baz istasyonunun kapsama alanı gösterimi.

2.1.2 Küçük ölçekli sönümleme

Küçük ölçekli sönümleme, veya kısaca sönümleme, geniş ölçekli sönümlemenin etkilerinin ihmal edilebileceği kadar kısa zaman dilimlerinde veya uzaklıktaki küçük değişikliklerde, bir radyo işaretinin büyüklük ve fazında hızlı dalgalanmaları ifade etmede kullanılmaktadır. Şehirlerde, gezgin antenlerin uzunluklarının çevredeki büyük binalardan kısa kalması nedeniyle baz istasyonu ile gezgin aygıtlar arasında LOS genellikle olmadığı için sönümleme oluşmaktadır. LOS olsa dahi çevredeki büyük binalardan ve yerden yansıyan radyo dalgaları alıcıda çok yollu sönümlemeye neden olmaktadır. İletilen işaretin, farklı yollardan alıcıya ulaşan farklı büyüklük ve faza sahip kopyalarının alıcıda birleşerek tek bir işaret oluşturmasına çok yollu sönümleme adı verilmektedir. Şekil 2.2’de yol kaybı, gölgeleme ve çok yollu sönümlemenin toplam etkileri içerecek şekilde alınan işaret gücünün iletilen işaret gücüne oranı P_r/P_t ile uzaklığın ilişkisi gösterilmektedir [51].

Küçük ölçekli sönümlemeyi etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilir [50]:

- Çok yollu yayılım: Çevrede işaretin yansımaya veya saçılmasına neden olan nesnelerin bulunması, işaretlerin büyüklüğünü, fazını ve varış zamanını sürekli



Şekil 2.2 : Yol kaybı, gölgeleme ve çok yollu sönümlenmenin toplam etkisinin uzaklığa bağlı gösterimi.

olarak değiştiren bir ortam oluşturmaktadır. Bu çok yollu sönümlenme alınan işaretin enerjisinde anlık dalgalanmalara ve bozulmalara neden olmaktadır. Aynı zamanda, çok yollu yayılımın işaretin alıcıya ulaşması için gerekli süreyi artırmasından dolayı simgeler-arası girişime de neden olmaktadır.

- Alıcının veya vericinin hareketli olması: Alıcının ve vericinin birbirlerine göre bağlı hıza sahip olmaları, işaretin çok yollu bileşenlerinin Doppler kayması nedeni ile farklı frekanslara sahip olmalarına neden olmaktadır (Doppler kayması bir sonraki başlıkta ayrıntılı anlatılacaktır).
- Çevredeki nesnelerin hareketli olması: İşaretin çok yollu bileşenleri, çevredeki nesnelerin hareketli olması durumunda da Doppler kaymasına maruz kalmaktadırlar. Çevredeki nesneler alıcı ve vericiden daha hızlı hareket ediyorsa, bu etki baskın hale gelebilmektedir, yoksa çevredeki nesnelerin hareketleri yok sayılarak yalnızca alıcı ve vericinin hızları hesaba katılmaktadır.
- İşaretin iletim bant genişliği: Eğer iletilen işaretin bant genişliği çok yollu kanalın bant genişliğinden büyükse, alınan işaret bozulmaktadır. İşaretin bozulmadan iletelebileceği bant genişliğine "uyum bant genişliği (coherence bandwidth)" adı verilmektedir.

İletilen işaret

$$\begin{aligned} s(t) &= \Re \left\{ u(t) \exp^{j2\pi f_c t} \right\} \\ &= \Re \{ u(t) \} \cos(j2\pi f_c t) - \Im \{ u(t) \} \sin(j2\pi f_c t) \\ &= x(t) \cos(j2\pi f_c t) - y(t) \sin(j2\pi f_c t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

biçiminde tanımlanmaktadır [51]. Burada $u(t) = x(t) + jy(t)$ karmaşık temel bant işaret olup $s(t)$ nin karmaşık zarfı olarak adlandırılmaktadır. Çok yollu sönümleme için alıcıda çok yollu bileşenler matematiksel olarak

$$r(t) = \Re \left\{ \sum_{n=0}^{N(t)} a_n(t) u(t - \tau_n(t)) \exp^{j2\pi f_c (t - \tau_n(t)) + \phi_{D_n(t)}} \right\} \quad (2.5)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Burada $N(t)$ çok yollu bileşenlerin sayısını, $n = 0$ LOS bileşenini, $\tau_n(t)$ ilgili bileşen için gecikme süresini, $\phi_{D_n(t)}$ bileşenin Doppler faz kaymasını ve $a_n(t)$ bileşenin büyüklüğünü göstermektedir. Çok yollu bileşenlerin LOS bileşenine göre ($n = 0$) zamanda bölgesindeki yayılma miktarına "gecikme yayılımı (delay spread)" adı verilmekte ve maksimum gecikme yayılımı $T_m = \max_n \tau_n - \tau_0$ biçiminde tanımlanmaktadır. Maksimum gecikme yayılımı işaretin bant genişliğinden çok küçükse dar bant sönümleme adı verilmektedir. Çok yollu kanalları tanımlamak için ortaya konmuş bazı tanımlamalar vardır ve bunlardan önemli bir tanesi gecikme yayılımının karekök ortalamasıdır (rms delay spread). Ortalama gecikme

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_n a_n^2 \tau_n}{\sum_n a_n^2} \quad (2.6)$$

biçiminde tanımlanmak üzere gecikme yayılımının karekök ortalaması

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - \bar{\tau}^2} \quad (2.7)$$

biçiminde tanımlanmaktadır. Burada $\overline{\tau^2} = \frac{\sum_n a_n^2 \tau_n^2}{\sum_n a_n^2}$ eşitliği ile verilmektedir.

Çok yollu kanallar için uyum bant genişliği B_c , kanalın “düz” varsayıldığı, yani bu kanaldan iletilen çok yollu bileşenlerin aynı kazanca ve doğrusal faza sahip olduğu, frekans aralığına verilen addır ve gecikme yayılımının karekök ortalaması ile ilişkili olarak tanımlanmaktadır. Uyum bant genişliği içerisindeki bileşenlerin birbiriyle ilişki seviyelerine göre, yüksek ilişki düzeyi için

$$B_c \approx \frac{1}{50\sigma_\tau} \quad (2.8)$$

veya daha düşük bir ilişki düzeyi için

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (2.9)$$

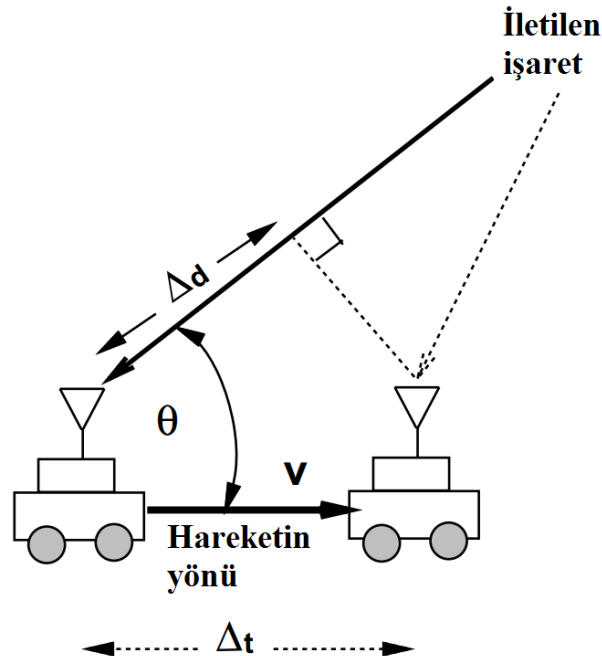
biçiminde tanımlanmaktadır [50].

2.1.3 Doppler kayması ve uyumluluk zamanı

Birbirine göre bağıl hızı olan iki aygıttan birisinin diğerine gönderdiği işaretin dalga boyunun (aynı zamanda frekansının) alıcıda gerçek dalga boyundan (frekanstan) farklı olarak algılanmasına Doppler etkisi (Doppler effect) veya Doppler kayması (Doppler shift) adı verilmektedir [50]. Doppler kaymasının nedeni şudur: Şekil 2.3'te gösterildiği gibi ([51]) alıcı veya vericinin hareket ediyor olmasından dolayı kısa bir zaman diliminde (Δt) iletilen işaretin alıcıya ulaşmak için alması gereken yol $\Delta d = v \Delta t \cos \theta$ miktarınca değişmektedir. Burada v alıcı veya vericinin hızı, θ hareket yönünün alıcı-verici doğrultusuyla yaptığı açıdır. İşaretin aldığı yoldaki değişimden dolayı fazı da $\Delta \phi = 2\pi v \Delta t \cos \theta / \lambda$ biçiminde değişmektedir. λ işaretin dalga boyudur ve c ışık hızını, f_c işaretin frekansını göstermek üzere $\lambda = c/f_c$ biçiminde tanımlanmaktadır. Böylece Doppler etkisinden dolayı frekanstaki değişim

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = v \cos \theta / \lambda \quad (2.10)$$

biçiminde elde edilmektedir [51].



Şekil 2.3 : Doppler kayması.

Uyumluluk zamanı T_c (coherence time), kanalın zaman bölgesinde kanal dürtü yanıtının (channel impulse response) büyük oranda değişmediği, başka bir deyişle

iletileen aynı iki işaretin kuvvetli büyüklük ilişkisine sahip olduğu zaman dilimi olarak tanımlanmaktadır. Uyumluluk zaman ile Doppler kayması ters orantılı olarak

$$T_c \approx \frac{1}{f_m} \quad (2.11)$$

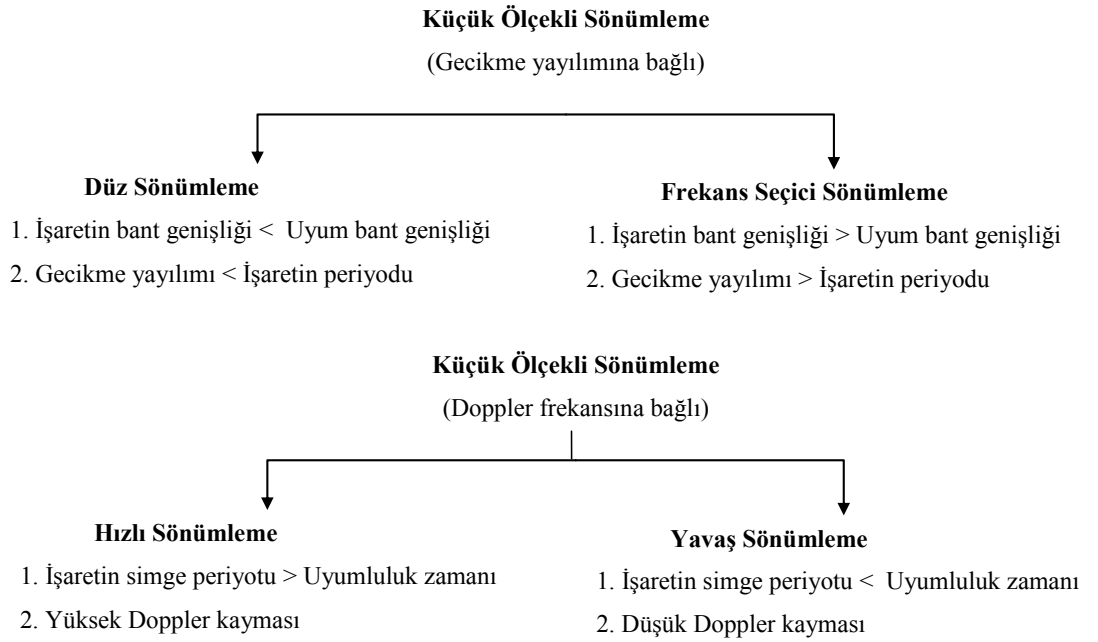
biçiminde tanımlanmaktadır. Burada f_m maksimum Doppler kaymasıdır ve $f_m = v/\lambda$ eşitliği ile verilmektedir. Uyumluluk zaman yaklaşık olarak

$$T_c \approx \frac{9}{16\pi f_m} \quad (2.12)$$

biçiminde de tanımlanmaktadır [50].

2.1.4 Küçük ölçekli sönümleme çeşitleri

Sönümlemeli kanalları iletilen işaretin bant genişliği, simge periyodu gibi özelliklerine ve kanalın gecikme yayılımının karekök ortalaması, Doppler kayması gibi özelliklerine bağlı olarak Şekil 2.4'te özetlendiği gibi sınıflandırılmaktadır [50].



Şekil 2.4 : Küçük ölçekli sönümleme çeşitleri.

Sönümleme çeşitleri şunlardır:

- Düz sönümleme: Eğer iletim yapılan kanal, iletilen işaretin bant genişliğinden daha büyük bir bant genişliği boyunca sabit kazanç ve doğrusal faz yanıtına sahipse

alınan işaret düz sönümlemeye uğramaktadır. Bunun için işaretin bant genişliği kanalın uyum bant genişliğinden çok küçük, başka bir deyişle işaretin periyodunun kanalın gecikme yayılımından çok büyük olması gerekmektedir.

- **Frekans seçici sönümleme:** Düz sönümlemenin aksine, iletim yapılan kanal, iletilen işaretin bant genişliği boyunca sabit kazanç ve doğrusal faz yanıtına sahip değilse alınan işaret frekans seçici sönümlemeye uğramaktadır. Frekans seçici sönümlemede simgeler arası girişim meydana gelmekte ve alınan işaret bozulmaktadır.
- **Hızlı sönümleme:** Hızlı sönümlemede, kanalın dürtü yanıtı işaretin simge süresi içerisinde hızlı bir şekilde değişmektedir, yani kanalın uyumluluk zamanı iletilen işaretin simge süresinden kısadır. Hızlı sönümleme işaretin frekans bölgesinde bozulmasına neden olmaktadır.
- **Yavaş sönümleme:** Yavaş sönümlemede, kanalın dürtü yanıtı iletilen işaretin hızına kıyasla çok daha yavaş değişmektedir. Bu durumda art arda iletilen birçok işaret için kanalın sabit olduğu varsayılmaktadır.

2.1.5 Düz sönümlemeli kanalların modellenmesi

Düz sönümlemeli kanallarda gecikme yayılımının, işaretin simge periyotundan çok küçük olması (2.5) denkleminde bazı varsayımları yapmamıza olanak sağlamaktadır. Gecikme yayılımı görece çok küçük olduğu için $u(t - \tau_n) \approx u(t)$, $\forall n$ varsayılabilir. Böylece düz sönümlemeli kanalda alınan işaret

$$r(t) = \mathbb{R} \left\{ u(t) e^{j2\pi f_c t} \left(\sum_{n=0}^{N(t)} a_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t) + \phi_{D_n(t)}} \right) \right\} \quad (2.13)$$

biçiminde yazılabilmektedir. Böylece alınan işaret yalnızca bir değişkenle çarpılmış olarak elde edilmektedir ve alınan işaretin karmaşık temel bant eşdeğeri

$$z(t) = u(t) \left(\sum_{n=0}^{N(t)} a_n(t) e^{-\Phi_n(t)} \right) \quad (2.14)$$

biçiminde elde edilmektedir. Burada n inci çok yollu bileşenin faz kayması $\Phi_n(t) = j2\pi f_c \tau_n(t) - \phi_{D_n(t)}$ eşitliği ile gösterilmektedir. Buradan

$$z(t) = h(t)u(t) \quad (2.15)$$

biçiminde de yazılabilmektedir. Burada da sönümleme katsayısı $h(t) = \sum_{n=0}^{N(t)} a_n(t) \exp^{-\Phi_n(t)}$ biçiminde gösterilmektedir.

Eğer çok yollu bileşenlerin sayısı fazla ve içlerinde LOS bileşeni gibi baskın bir bileşen yoksa merkezi limit teoremi (central limit theorem) yardımıyla sönümleme katsayısının yaklaşık olarak karmaşık Gauss dağılımlı olduğu söylenebilmektedir. Bu durumda sönümleme katsayısının büyüklüğü $|h(t)|$ Rayleigh dağılımına uymaktadır ve fazı da $\angle h(t) - \pi$ ile $+\pi$ arasında düzgün dağılımlıdır. Rayleigh dağılımının olasılık yoğunluk işlevi

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & 0 \leq r \leq \infty \\ 0 & r < 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada $r = |h(t)|$ ve σ^2 sönümlemeli kanalın ortalama gücüdür. Kanalın Rayleigh dağılımlı varsayılması literatürde sıkça başvurulmuş bir yoldur, çünkü matematiksel analizi diğer modellere göre daha basittir. $|h(t)|^2$ anlık kanal gücünü göstermek üzere $|h(t)|$ Rayleigh dağılımlı ise kanal gücü üstel dağılımlıdır.

Eğer çok yollu bileşenlerden birisi baskın ise, örneğin LOS bileşeni varsa, küçük ölçekli sönümlemenin zarfı Ricean dağılımıyla modellenmektedir [50]. Ricean dağılımın olasılık yoğunluk işlevi

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) & A \geq 0, r < \infty \\ 0 & r \leq 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

biçiminde verilmektedir. Burada A baskın bileşenin maksimum büyüklüğünü ve $I_0()$ birinci çeşit ve sıfırıncı mertebeden değiştirilmiş Bessel işlevini göstermektedir. Ricean dağılımı genellikle K değişkenine bağlı tanımlanmaktadır ve bu değişkene Ricean çarpanı adı verilmektedir. Ricean çarpanı

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (2.18)$$

eşitliği ile verilmektedir. $A \rightarrow 0$, $K \rightarrow \infty$ durumunda baskın bileşen kaybolduğu için Rayleigh dağılımına yakınsamaktadır ve $K \rightarrow 0$ ise çok yollu sönümleme etkisi kaybolacağı için kanal toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN: Additive White Gaussian Noise) kanalına dönüşmektedir.

2.2 Çeşitleme

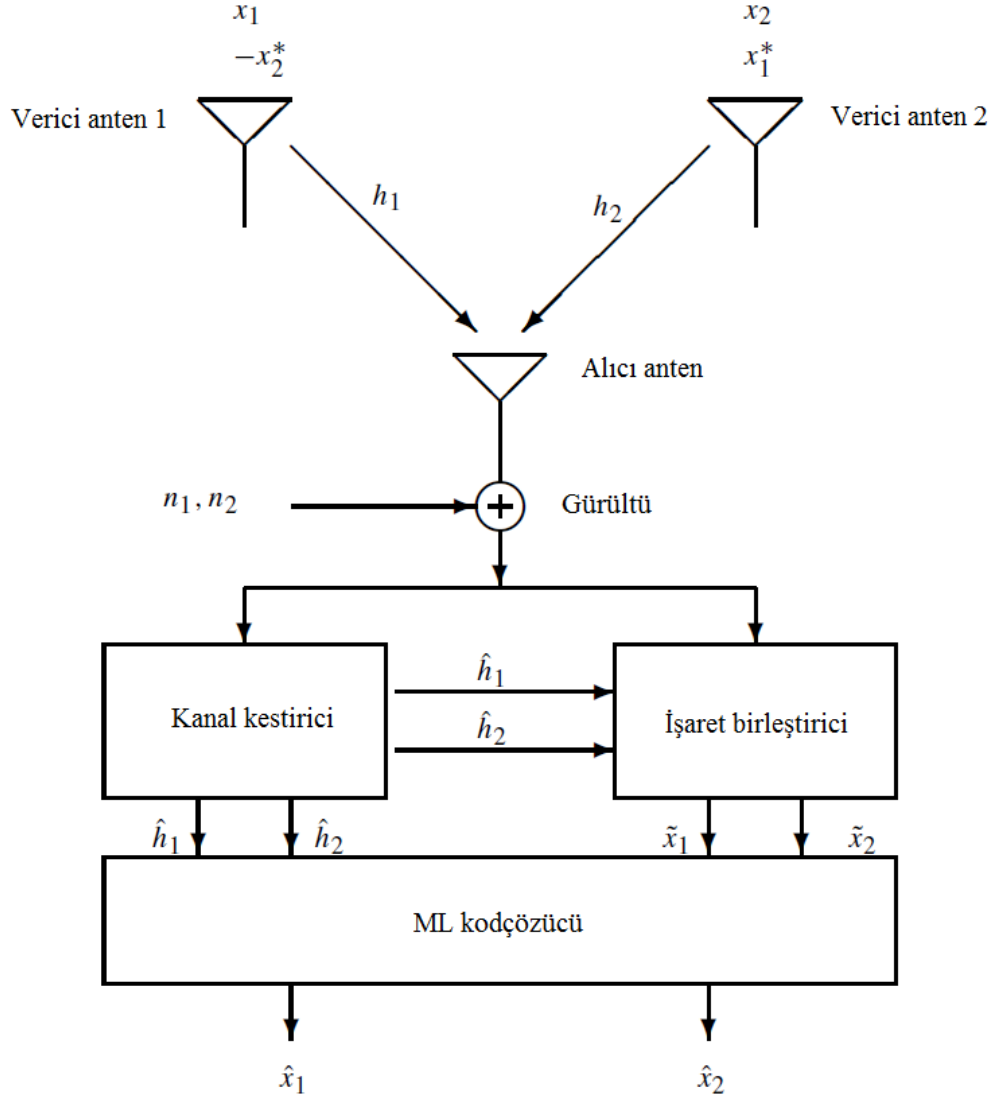
Sönümlmeli kanallarda, kanalın kuvvetli bir sönümlmeye uğrama olasılığı ve dolayısıyla alıcıda hatalı çözme olasılığı yüksektir. İşaretin bağımsız kopyalarının zaman, frekans ve uzayda ya da bunların herhangi ikisi veya üçünde çoğullanarak iletilmesine ve bu sayede kuvvetli sönümlmeye uğrama olasılığının azaltılmasına çeşitleme adı verilmektedir [50]. Zaman çeşitlemesi, işaretin kopyalarının aynı kanal üzerinden farklı zamanlarda iletilmesi ile elde edilmektedir. Burada her bir iletimin bir önceki iletime göre en az kanalın uyumluluk süresi kadar geciktirilmesi gerekmektedir, böylece iletilen kopyaların birbirinden ilişkisiz olması sağlanmaktadır. Frekans çeşitlemesi, işaretin kopyalarının birbirinden en az uyum bant genişliği kadar ayrılmış kanallar üzerinden iletilmesi ile elde edilmektedir. Son olarak uzay çeşitlemesi, alıcı ve/veya vericinin çok antenle donatılması ve işaretin bağımsız kopyalarının farklı antenler tarafından gönderilip alınması ile elde edilmektedir. Vericinin çok anten yardımıyla iletim yapmasına verici çeşitlemesi, alıcının işareti çok anten yardımıyla almasına alıcı çeşitlemesi adı verilmektedir.

2.3 Alamouti uzay-zaman blok kodu

Alamouti kodu iki antenli vericiler için vericide çeşitlemenin sağlandığı bir tekniktir ve tarihsel olarak önerilen ilk uzay-zaman blok kodudur [52]. Alamouti kodunun en önemli özelliği alıcıda basit en büyük olabilirlikli (ML: Maximum Likelihood) kestirim ile tam çeşitleme kazancı sağlamasıdır. Vericide iki, alıcıda bir antenin bulunduğu Alamouti kodunun vericide bir, alıcıda iki antenin bulunduğu en büyük oran birleştirmesi (MRC: maximal ratio combining) ile aynı çeşitleme kazancına sahip olduğu [53]'te gösterilmektedir. Alamouti kodunun çalışma biçimi Şekil 2.5'te verilmektedir [52]. Alamouti kodlamada kaynak iletmek istediği işaretleri ikişer ikişer olarak iki anten üzerinden

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

biçiminde göndermektedir. (2.19)'a kod matrisi adı verilmektedir ve burada matrisin sütunları zaman aralıklarını, satırları antenleri göstermektedir. Yani, ilk sütundaki x_1 ve x_2 birinci zaman aralığında, sırasıyla, kaynağın birinci ve ikinci anteninden gönderilen işaretlerdir. İkinci sütundaki $-x_2^*$ ve x_1^* ise ikinci zaman aralığında, sırasıyla, kaynağın



Şekil 2.5 : Alamouti kodlama için alıcı yapısı.

birinci ve ikinci anteninden gönderilen işaretlerdir. Alıcıda alınan işaretler

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{E_0}{2}} \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

biçiminde verilir. Burada r_1 ve r_2 alıcının, sırasıyla, birinci ve ikinci zaman aralıklarında aldığı işaretler, h_1 ve h_2 kaynağın birinci ve ikinci anteni ile alıcı arasındaki bağlantı için kanal sönmleme katsayısı, n_1 ve n_2 , karmaşık toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN), E_0 vericinin iki anteninde harcanan toplam güçtür. Alıcıdaki işaret birleştirme denklemleri

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= h_1^* r_1 + h_2 r_2^* \\ \tilde{x}_2 &= h_2^* r_1 - h_1 r_2^* \end{aligned} \quad (2.21)$$

biçiminde yazılmaktadır. (2.20), (2.21)'de yerine koyulduğunda

$$\begin{aligned}\tilde{x}_1 &= \sqrt{\frac{E_0}{2}}(|h_1|^2 + |h_2|^2)x_1 + h_1^*n_1 + h_2n_2^* \\ \tilde{x}_2 &= \sqrt{\frac{E_0}{2}}(|h_1|^2 + |h_2|^2)x_2 + h_2^*n_1 - h_1n_2^*\end{aligned}\quad (2.22)$$

sonucuna ulaşılmaktadır. ML kestirim kuralı

$$\hat{x}_i = \underset{x_i \in S}{\operatorname{argmin}} |\tilde{x}_i - x_i| \quad (2.23)$$

biçiminde yazılmaktadır. Burada $\hat{x}_i$, x_i işaretinin alıcıda kestirimi ($i = 1, 2$), S kanal işaretlerinin kümesidir.

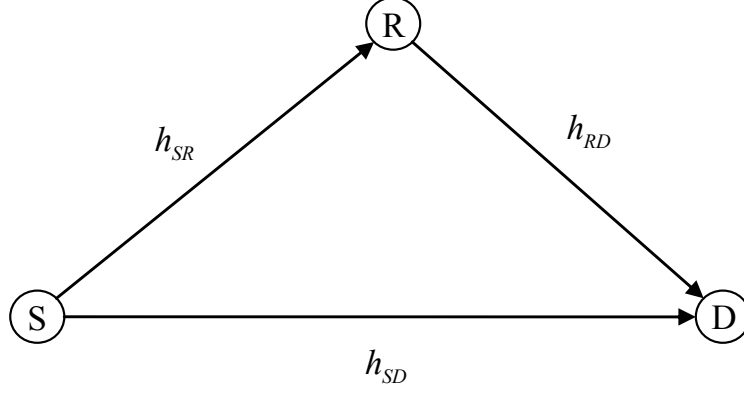
Uzay-zaman blok kodlarında verici tarafında çeşitleme sağlanmaktadır ve verici çeşitlemesinin sağladığı bazı avantajlar vardır. Örnek olarak bir baz istasyonunda iki anten kullanıldığında tek antenli kullanıcıların tamamı ile aşağı yönlü (downlink) iletişimin çeşitleme kazancı iki olmaktadır. Oysa ki baz istasyonunda tek anten kullanıldığında aynı çeşitleme kazancının sağlanabilmesi için bütün kullanıcılarda iki antenin kullanılması gerekmektedir. Bütün alıcılarda iki antenin kullanılması maliyet açısından bir dezavantajdır çünkü bir baz istasyonuna binlerce kullanıcı düşmektedir.

2.4 İşbirlikli Çeşitleme

İşbirlikli iletişim bağımsız kullanıcıların diğer kullanıcılar ile işbirliği yaparak hedef ile iletişim kurduğu sistemdir. İşbirlikli çeşitlemenin söz konusu olduğu temel ağ modeli Şekil 2.6'da gösterilen 3 düğümlü (kaynak (S), röle (R) ve hedef (D)) yapısıdır. Burada h_{SR} , h_{RD} ve h_{SD} , sırasıyla, kaynak-röle, röle-hedef ve kaynak-hedef arasındaki kanallara ilişkin sönmüleme katsayılarını göstermektedir. İşbirlikli çeşitlemeli yapılar kapsamlı olarak [5]'te incelenmektedir ve işbirlikli çeşitleme, rölenin çalıştığı protokollere bağlı olarak 3 ana grupta incelenmektedir. Bunlar sabit aktarım (fixed relaying), seçimli aktarım (selection relaying) ve artımlı aktarımdır (incremental relaying). Sabit aktarım çöz ve aktar (DF) ve kuvvetlendir ve aktar (AF) olmak üzere iki alt başlıkta ele alınmaktadır.

2.4.1 Kuvvetlendir ve aktar (AF)

Bu protokolde röle kaynaktan aldığı işareti çözmemekte ve yalnızca kuvvetlendirerek hedefe göndermektedir. Rölede kod çözme olmadığı için rölenin karmaşık işlemleri



Şekil 2.6 : Üç düğümlü işbirlikli çeşitleme modeli.

yapmasına gereksinim duyulmamaktadır. Bir işaretin iletimi iki zaman aralığında olmaktadır: Birinci zaman aralığında kaynak işareti hedefe ve röleye göndermektedir, ikinci zaman aralığında ise röle birinci zaman aralığında aldığı işareti kuvvetlendirerek hedefe iletmektedir. Birinci zaman aralığında rölenin ve hedefin aldığı işaretler, sırasıyla,

$$\begin{aligned} r_R &= h_{SR}x + n_1 \\ r_D^1 &= h_{SD}x + n_2 \end{aligned} \quad (2.24)$$

biçiminde yazılmaktadır. Burada n_1 ve n_2 , sırasıyla, ortalama gücü N_{SR} ve N_{SD} olan AWGN örneğidir. Röle, aldığı işareti belirli bir sabit (G) ile çarparak hedefe göndermektedir. Bundan dolayı ikinci zaman aralığında hedefin aldığı işaret

$$r_D^2 = h_{RD}G(h_{SD}x + n_1) + n_3 \quad (2.25)$$

biçiminde ifade edilmektedir. n_3 , ortalama gücü N_{RD} olan AWGN örneğidir. Eğer röle, kaynak-röle arasındaki kanal bilgisine sahipse

$$G^2 = \frac{E_R}{E_S|h_{SR}|^2 + N_{SR}} \quad (2.26)$$

biçiminde yazılmaktadır [54]. Burada E_S ve E_R , sırasıyla, kaynağın ve rölenin bir işareti iletmek için harcadıkları ortalama güçlerdir. Bu durumda hedefte kaynak ve röleden alınan işaretlerin toplam işaret-gürültü oranı (SNR: Signal to Noise Ratio)

$$\gamma_{eq} = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD} + 1} \quad (2.27)$$

biçiminde elde edilmektedir [54]. Burada $\gamma_{SR} = \frac{E_S|h_{SR}|^2}{N_{SR}}$ ve $\gamma_{RD} = \frac{E_R|h_{RD}|^2}{N_{RD}}$ eşitlikleri ile tanımlanmaktadır. Böyle bir ağ yapısı için kaynak ile hedef arasındaki maksimum ortalama karşılıklı bilgi [55]

$$I_{AF} = \frac{1}{2} \log \left(1 + \gamma_{SD} + \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD} + 1} \right) \quad (2.28)$$

biçiminde verilmektedir. Burada da $\gamma_{SD} = \frac{E_S|h_{SD}|^2}{N_{SD}}$ eşitliği ile verilmektedir.

2.4.2 Çöz ve aktar (DF)

Bu protokolda röle birinci zaman aralığında kaynaktan aldığı işareti çözmekte ve çözdüğü işareti ikinci zaman aralığında hedefe göndermektedir. Birinci zaman aralığında rölenin ve hedefin aldığı işaretler kuvvetlendir ve aktar tekniği ile aynıdır ve (2.24)'teki eşitlikler ile verilmektedir. Röle birinci zamanda aldığı işareti çözerek ikinci zaman aralığında kendi çözdüğü işareti hedefe iletmektedir. Bu durumda ikinci zaman aralığında hedefin aldığı işaret

$$r_D^2 = h_{RD}\hat{x} + n_3 \quad (2.29)$$

biçiminde yazılmaktadır. Burada $\hat{x}$ rölenin çözdüğü işareti göstermektedir. Böyle bir ağ yapısı için kaynak ile hedef arasındaki maksimum ortalama karşılıklı bilgi [55]

$$I_{DF} = \frac{1}{2} \min [\log(1 + \gamma_{SR}), \log(1 + \gamma_{SD} + \gamma_{RD})] \quad (2.30)$$

biçiminde elde edilmektedir.

2.4.3 Seçimli aktarım (SDF)

Bu protokolda röle DF tekniği ile çalışmakta ve rölede alınan işaretin SNR'ı belirli bir eşik değerinin üzerinde ise röle kaynaktan aldığı işareti çözerek ikinci zaman aralığında hedefe iletmekte, eşik değerinin üzerinde değil ise hedefe iletmemekte ve sessiz kalmaktadır. İkinci zaman aralığında röle sessiz kalmış ise kaynak ilk zaman aralığında ilettiği işareti hedefe yeniden göndermektedir. Bu durumda kaynak ile hedef arasındaki maksimum ortalama karşılıklı bilgi [55]

$$I_{SDF} = \begin{cases} \frac{1}{2} \log(1 + 2\gamma_{SD}), & \gamma_{SR} < \gamma_{thr}, \\ \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{SD} + \gamma_{RD}), & \gamma_{SR} \geq \gamma_{thr} \end{cases} \quad (2.31)$$

biçiminde elde edilmektedir. Burada γ_{thr} ile gösterilen eşik SNR değeridir.

Bu aktarım tekniğine benzer bir teknik [56]'da incelenmektedir ve bu teknikte de röle kaynak-röle arası kanalın anlık SNR'ı eşik SNR'ın üzerinde ise çözerek hedefe iletmekte değil ise sessiz kalmaktadır. Yalnız bu teknikte, [55]'teki teknikten farklı olarak ikinci zaman aralığında kaynak işareti yeniden göndermemektedir. Bu durum rölenin çözüp çözmediğini geri besleme ile kaynağa bildirme gereksinimini ortadan

kaldırmaktadır. Kaynak işaretleri yeniden göndermediği için bu tekniğin başarımı, [55]'teki SDF tekniğine göre daha düşük olmakla birlikte tam çeşitleme derecesine sahip olduğu [56]'da gösterilmektedir.

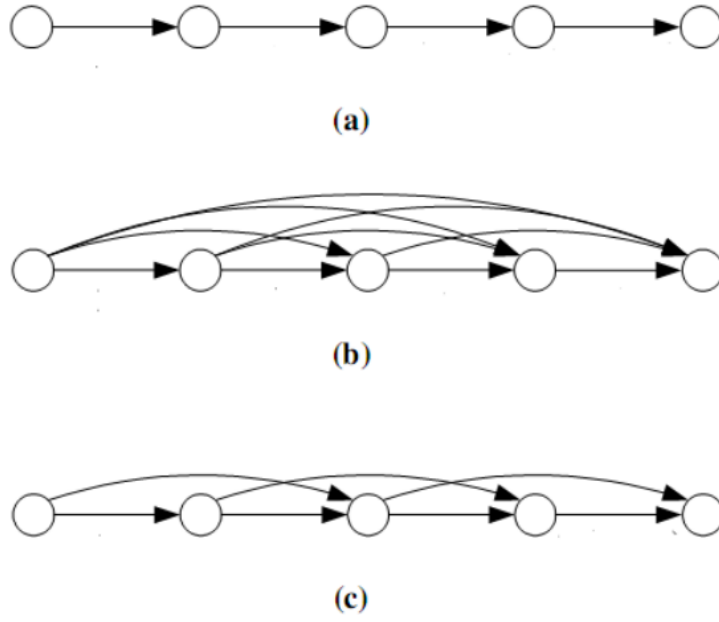
2.4.4 Artımlı aktarım

Daha önce söz edilen AF, DF ve SDF protokolleri sistemin servis dışı kalma ve hata başarımlarını iyileştirmekle birlikte her bir işaretin iki zaman aralığında gönderilmesi nedeniyle veri hızını azaltmaktadır. Özellikle kaynak ile hedef arasındaki kanalın iyi olduğu durumlarda rölenin işareti tekrar göndermesi başarımlar açısından önemli bir katkı sağlamamasına rağmen hızı düşürmektedir. Bundan dolayı veri hızını artırmak amacıyla geri beslemenin kullanıldığı artımlı aktarım protokolü önerilmektedir. Bu protokolde AF veya DF tekniği ile çalışan röle normal koşullarda iletim yapmamaktadır. Hedef, kaynak-hedef arasındaki anlık kanal bilgisine bağlı olarak sönmülemenin fazla olduğu durumlarda bunu geri besleme ile röleye ve kaynağa bildirmektedir. Bu durumda kaynak bir sonraki zaman aralığında sessiz kalmakta ve röle hangi teknikle çalışıyorsa o teknığe göre kaynaktan aldığı işareti hedefe göndermektedir. Böylece sistemin veri iletim hızı artırılmış olmaktadır.

2.4.5 Çok atlamalı ağlar

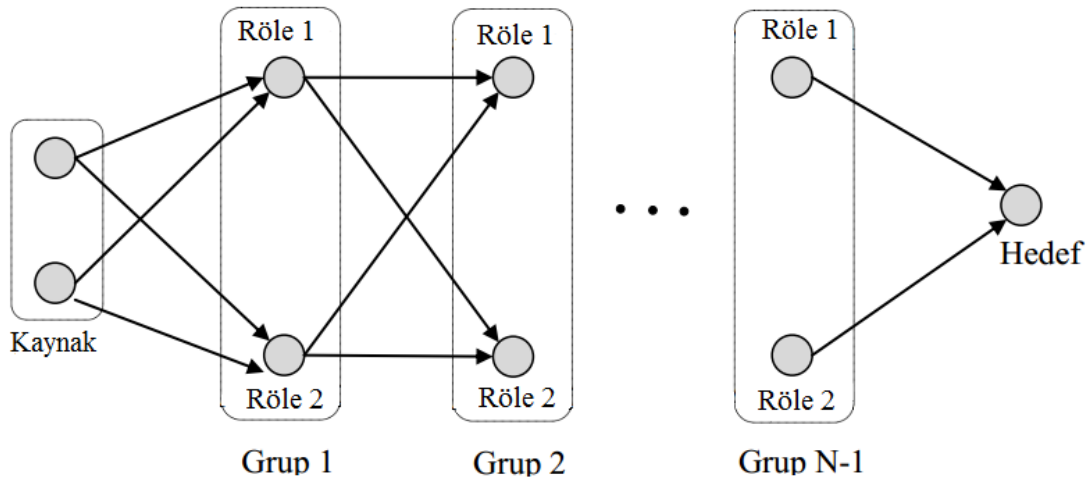
Çok atlamalı ağlar kaynak ile hedef arasında bir veya daha fazla röle veya röle grubu bulunan ve üç düğümlü ağlara göre daha karmaşık yapıya sahip ağlardır. Kaynak ile hedef arasındaki yol parçalara ayrılmakta ve birbirini izleyen rölelerin arasındaki uzaklığın düşürülmesiyle yol kaybının olumsuz etkileri belirli oranda azaltılmaktadır. Çok atlamalı ağlarda çeşitlemenin elde edilebilmesi için Şekil 2.7’de bazı örnekleri gösterildiği biçimde farklı iletim modelleri vardır [57]. Şekil 2.7’de (a)’da verilen model çok atlamalı modeldir ve (b) ve (c)’de verilen modeller çok atlamalı çeşitlemeli modellerdir. Burada (c)’de verilen modelde bir önceki ve iki önceki röleden alınan işaretler çözülürken (b)’de kendinden önceki bütün rölelerden alınan işaretler çözülmemektedir.

Bununla birlikte her atlamada tek röle yerine birden fazla röle yardımıyla da iletim yapılabilir. Örneğin [58]'de önerilen yöntemde rölelerin DF tekniği ile çalışmaları, art arda bağlanmış Alamouti kodu kullandıkları N atlamalı ağ modeli



Şekil 2.7 : Çok atlamalı ağ yapıları: (a) çok atlamalı model, (b),(c) çok atlamalı çeşitlemeli model.

incelenmektedir (Şekil 2.8). Burada her bir röle doğru veya hatalı çözmesine bakmaksızın aynı gruptaki diğer röle ile birlikte dağıtılmış Alamouti kodlama ile bir sonraki röle grubuna iletmektedir. Bu çalışmada röleler DF ile çalıştığı için ortaya çıkan hata yayılımına rağmen önerilen yöntemin çeşitleme derecesinin bu modelde elde edilebilecek maksimum derece olan 2'ye eşit olduğu kuramsal olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.8 : Art Arda Bağlanmış Alamouti kodunun blok diyagramı.

2.4.6 İşbirlikli çeşitleme ve dağıtılmış Alamouti kodu

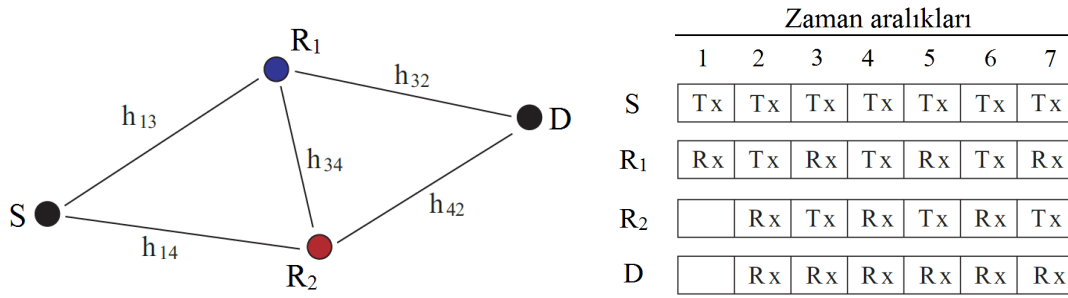
Dağıtılmış uzay-zaman blok kodu (DSTBC: Distributed Space Time Block Code) ilk olarak [59]'da ele alınmaktadır ve özellikle tek antenli aygıtların bulunduğu telsiz ağlarda verici çeşitlemesinin artırılması için önerilmektedir. [59]'da önerilen DSTBC yönteminde $M = \{1, 2, \dots, m\}$ verici aygıt kümesini göstermek üzere kaynak $s \in M$, diğer verici aygıtları ($M - \{s\}$) potansiyel röle olarak kullanarak hedefe ($d(s) \notin M$) veri iletmektedir. Burada röleler DF tekniği ile çalışmakta ve yalnızca kaynağın gönderdiği paketi doğru olarak çözen rölelerin oluşturduğu altküme ($D(s)$) DSTBC ile hedefe veri iletmektedir. Dağıtılmış Alamouti kodu da iki bağımsız kullanıcının oluşturduğu DSTBC'ye verilen addır. Bu modelde bağımsız iki kullanıcı bir vericinin iki anteni gibi davranarak dağıtılmış Alamouti kodunu oluşturmaktadırlar. Üç düğümlü ağlarda kaynak ile röle dağıtılmış Alamouti kodunu oluştururken, üçten fazla düğümlü ağlarda kaynak ile bir rölenin dışında iki röle de dağıtılmış Alamouti kodunu oluşturabilmektedir. Üç düğümlü ağlarda dağıtılmış Alamouti kodu şu biçimde çalışmaktadır: Her bir faz iki zaman aralığından oluşmak üzere birinci fazda kaynak röleye ve hedefe sırasıyla x_1 ve x_2 işaretlerini göndermektedir ve röle bu işaretleri sırasıyla $\hat{x}_1$ ve $\hat{x}_2$ biçiminde çözmektedir. İkinci fazda kaynak ile röle Alamouti kodunu oluşturmak için tek bir vericinin iki anteni gibi davranmakta ve ikinci fazın birinci zaman aralığında kaynak x_1 , röle $\hat{x}_2$, ikinci zaman aralığında ise kaynak $-x_2^*$, röle $\hat{x}_1^*$ göndermektedir. İkinci fazda iletilen işaretler Alamouti kodunu oluşturmaktadır.

Dağıtılmış Alamouti kodu sayesinde sistem başarımı iyileşmektedir. Eğer rölede hata oluşmazsa, hedef ikinci fazda aldığı işaretleri Alamouti kodunda olduğu gibi kolaylıkla çözmektedir. Ancak, eğer röle aldığı işaretlerin birisini veya ikisini hatalı çözerse hedefin doğru çözmesi eskisi kadar kolay olmayacaktır. Bu konu modülasyonun BPSK olduğu durum için [60]'ta incelenmektedir. Rölede kestirimlerden her ikisi de doğru, $\hat{x}_1$ hatalı $\hat{x}_2$ doğru, $\hat{x}_1$ doğru $\hat{x}_2$ hatalı ve her ikisi de hatalı olmak üzere dört farklı durum vardır. [60]'ta bu durumlar için bit hata olasılıkları sönümleme katsayılarına koşullu olarak ayrı ayrı bulunmaktadır.

2.5 Ardışık iletim (SR)

İki atlamalı ağlarda yarı çift yönlü (half-duplex) röleler kullanıldığında yukarıda sözü edilen işbirlikli iletim yöntemleri için bir simgenin iletilmesi iki zaman aralığında

gerçekleşmekte ve bundan dolayı bant verimliliğinde kayıp meydana gelmektedir. Yarı çift yönlü röleli ağlarda bant verimliliğini artırmak için önerilen yöntemlerden birisi ardışık iletim (SR: successive relaying) yöntemidir [61]. Kaynak ile hedef arasında doğrudan iletimin olmadığı varsayılmaktadır. Kaynaktan hedefe iki tane yarı çift yönlü R_1 ve R_2 röleleri aracılığıyla veri iletimi yapılmaktadır. Bir paketin iletimi iki zaman aralığında yapılmaktadır. Birinci zaman aralığında kaynak R_1 veya R_2 rölesine iletim yapmakta ve ikinci zaman aralığında iletim yapılan röle tarafından hedefe gönderilmekte, kaynak ise diğer röleye yeni bir paket göndermektedir. Şekil 2.9 SR yöntemi için incelenen ağ modelini ve iletim protokolünü göstermektedir. Şekilde



Şekil 2.9 : Ardışık iletim yöntemi için incelenen ağ modeli ve iletim protokolü.

aygıt verici durumunda ise Tx, alıcı durumunda ise Rx biçiminde gösterilmektedir. 1. zaman aralığında kaynak R_1 e göndermekte, ikinci zaman aralığında kaynak R_2 ye ve R_1 hedefe göndermektedir. 1. zaman aralığı hariç tutulmak ve k zaman aralık sırasını göstermek üzere tek zaman aralıklarında, $k = 1, 3, 5, \dots$, kaynak R_1 e göndermekte ve R_2 de hedefe göndermektedir. Çift zaman aralıklarında, $k = 2, 4, 6, \dots$, ise kaynak R_2 ye ve R_1 hedefe iletmektedir. Burada önemli olan nokta kaynak her zaman aralığında yeni bir paket ilettiği için işbirlikli iletişim tekniklerinin ulaşılabilen en yüksek veri hızı ifadelerinin başındaki $1/2$ katsayısı SR yönteminde bulunmamakta, yani bant verimliliği artmaktadır. Ancak R_1 ve R_2 dik kanallar üzerinden iletim yapmadıkları için röleler arasında girişim oluşmaktadır. SR yönteminin ulaşılabilen en yüksek veri hızı rölelerin çalışma stratejisine (DF veya AF) bağlı olarak tanımlanmakla birlikte tezin devamında DF stratejisi ile çalışan röleler temel alındığı için burada da DF için ulaşılabilen en yüksek veri hızı incelenecektir.

R_p rölesinde ($p \in \{1, 2\}$), k inci zaman aralığında alınan işaret

$$y_p[k] = h_{1p}[k]x_1[k] + h_{34}[k]x_1[k-1] + n_p[k] \quad (2.32)$$

biçiminde verilmektedir. Burada $n_p[k]$, k inci zaman aralığında sistemi etkileyen toplamsal Gauss gürültüsüdür. R_p rölesi iki strateji ile aldığı işareti çözmektedir: a) röle alınan işarete $h_{34}[k]x_1[k-1]$ terimini girişim olarak işleme katarak $x_1[k]$ yı çözmektedir veya b) kaynaktan gelen işaret ile ilgili $h_{1p}[k]x_1[k]$ terimini girişim olarak ele alarak öncelikle $x_1[k-1]$ i çözmekte, sonrasında $h_{34}[k]x_1[k-1]$ terimini $y_p[k]$ dan çıkararak $x_1[k]$ yı çözmektedir. İlk strateji (a) için ulaşılabilen en yüksek veri hızı

$$I_a = \min \left[\log \left(1 + \frac{P_S |h_{1p}|^2}{\sigma_R^2 + P_R |h_{34}|^2} \right), \log \left(1 + \frac{P_R |h_{p2}|^2}{\sigma_D^2} \right) \right] \quad (2.33)$$

biçiminde verilmektedir [61]. Burada P_S ve P_R sırasıyla kaynak ve rölenin iletim gücünü, σ_R ve σ_D ise sırasıyla kaynak-röle ve röle-hedef arasındaki bağlantıya ilişkin gürültü gücünü göstermektedir. (2.33)'teki ilk terim kaynak-röle arasındaki bağlantı için ulaşılabilen en yüksek veri hızını ve ikinci terim röle-hedef arasındaki bağlantı için ulaşılabilen en yüksek veri hızını göstermektedir. İkinci strateji (b) için ulaşılabilen en yüksek veri hızı

$$I_b = \min \left[\log \left(1 + \frac{P_S |h_{1p}|^2}{\sigma_R^2} \right), \log \left(1 + \frac{P_R |h_{p2}|^2}{\sigma_D^2} \right), \log \left(1 + \frac{P_R |h_{34}|^2}{\sigma_R^2 + P_S |h_{1p}|^2} \right) \right] \quad (2.34)$$

biçiminde verilmektedir [61]. (2.34)'teki ilk terim diğer röleden girişim olmadığı durumda kaynak-röle arasındaki bağlantı için, ikinci terim röle-hedef arasındaki bağlantı için ve üçüncü terim kaynaktan gelen işaret girişim oluşturduğu durumda röleler arası bağlantı için ulaşılabilen en yüksek veri hızlarını göstermektedirler. İlk strateji röleler arası bağlantı çok iyi olmadığı durumlarda ve ikinci strateji röleler arası bağlantı iyi olduğu durumlarda iyi çalışmaktadır.

2.6 Enerji verimliliği

Telsiz ağlarda enerji verimliliği (EE), literatürde birçok farklı biçimde tanımlanıyor olmakla birlikte en popüler olanı birim-enerji tüketimine karşılık düşen sığadır [9]. Başka bir deyişle birim enerji ile iletilebilecek maksimum veri miktarıdır. AWGN kanallar için kanal sığası

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad (2.35)$$

biçiminde tanımlanmaktadır [8]. Burada C kanalın sığasını yani ulaşılabilen en yüksek veri hızını, P iletim gücünü, B bant genişliğini, N_0 gürültünün güç spektral yoğunluğunu göstermektedir. Veri hızı R ile gösterilmek üzere $R \leq C$ olduğunda veri

iletimi yapılabilir ve aksi halde sistem servis dışı kalmaktadır. R nin sığaya eşit olduğunu düşündüğümüzde bir bitlik bir verinin iletebilmesi için geçen süre $T = 1/C$ dir. Bu durumda bir bit için harcanan enerji

$$E_b = PT = \frac{N_0 B (2^{C/B} - 1)}{C} \quad (2.36)$$

biçiminde ifade edilmektedir. EE ise bir bit için harcanan enerji ile ters orantılıdır, yani

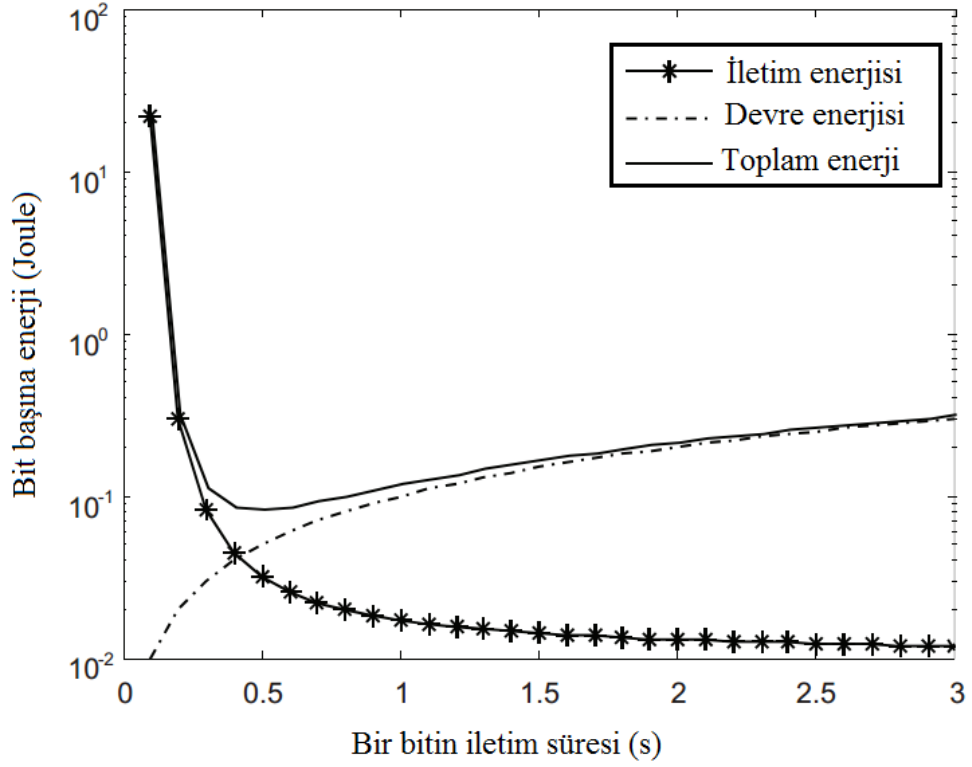
$$EE = \frac{1}{E_b} = \frac{C}{N_0 B (2^{C/B} - 1)} \quad (2.37)$$

biçiminde tanımlanmaktadır. Burada EE ifadesi C 'ye bağlı olarak verildiği gibi P 'ye bağlı olarak da

$$EE = \frac{C}{P} = \frac{B}{P} \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad (2.38)$$

biçiminde yazılmaktadır. Dolayısıyla bu şekilde tanımlandığında EE'yi maksimum yapmak, bir bit iletmek için harcanan enerjiyi minimum yapmak ile aynı anlama gelmektedir. (2.38)'deki P iletim gücüdür ama bu durumda devrede harcanan güç göz ardı edilmiş olmaktadır. [62]'de EE incelemelerinde devrede harcanan gücün ihmal edilmemesi gerektiği, çünkü sonuçlara doğrudan etki ettiği gösterilmektedir. Bu yüzden P yi iletim gücü ile devrede harcanan gücün toplamı, yani $P = P_t + P_c$ biçiminde tanımlamak daha doğru yaklaşımdır. Burada P_t ile gösterilen iletim için harcanan güç, P_c ile gösterilen ise verici ve alıcıda devrede harcanan güçtür. Devrede harcanan güç hesaba katılmadığında (2.37)'deki EE ifadesini maksimum yapmak için paketi mümkün olduğunca uzun sürede, yani düşük hızla göndermek gerektiği görülmektedir. Ancak devrede harcanan enerji hesaba katıldığında bu durumun artık geçerli olmadığı Şekil 2.10'da ortaya konmaktadır [62]. Devrelerde harcanan enerji, kaynak-hedef arası uzaklık gibi bazı değişkenlere bağlı olarak EE'yi maksimum yapan bir optimum veri iletim hızı bulunabilmektedir.

Sönümlemeli kanallarda EE'nin (2.37)'deki gibi kanal sığasına (C) bağlı olarak tanımlanabilmesi ancak vericinin anlık kanal bilgisine sahip olduğu varsayımı altında mümkündür, çünkü bu durumda veri hızı R , C ye eşitlenebilmektedir. Vericinin anlık kanal bilgisine sahip olmadığı durumlarda kanal gücüne bağlı olarak sistemin servis dışı kalma olasılığı vardır. Aynı şekilde verici kanal bilgisine sahip olsa bile belirli bir servis kalitesi kısıtı bulunan ağlarda kanal gücünün belirli bir eşik değerin altında kaldığı durumlarda da sistem servis dışı kalmaktadır. Bütün bu olası durumları göz



Şekil 2.10 : Enerji tüketimi ile işaret iletim süresi arasındaki ilişki.

önünde bulundurarak sönmülemeli kanallarda EE, “birim enerji başına başarılı iletilen bit sayısı” biçiminde tanımlanmakta ve

$$EE = \frac{R(1 - P_{out})}{P} \quad (2.39)$$

şeklinde ifade edilmektedir [22, 63]. Burada P_{out} servis dışı kalma olasılığıdır. Bu şekilde tanımlandığında EE ile etkin veri hızı arasında yakın bir ilişki olduğu görülmektedir. Çünkü etkin veri hızı r_e de

$$r_e = R(1 - P_{out}) \quad (2.40)$$

biçimde tanımlanmaktadır [64]. Diğer bir deyişle EE ile r_e arasında

$$EE = \frac{r_e}{P} \quad (2.41)$$

ilişkisi bulunmaktadır.

3. RASTGELE DAĞITILMIŞ GENİŞ ÖLÇEKLİ AĞLAR İÇİN ENERJİ VERİMLİLİKLİ RÖLE SEÇME YÖNTEMİ

3.1 Giriş

Bu çalışmada geniş ölçekli rastgele dağıtılmış telsiz ağlar için enerji verimlilikli bir tek-röle seçme yöntemi önerilmektedir. Literatürde önerilmiş olan merkezi veya dağıtılmış röle seçme yöntemleri genellikle geniş ölçekli rastgele dağıtılmış telsiz ağlar için uygulanabilir değildir. Özellikle ağdaki aygıtların pil ömürlerinin öncelikli olduğu sistemlerde, devrelerde ve kontrol paketlerinin iletimi için harcanan güç de probleme katıldığında bütün ağı kapsayan röle seçme yöntemlerinin uygulanması zorlaşmaktadır. Örneğin her bir paket iletimi için ağdaki bütün rölelerin anlık kanal bilgisine gereksinim duyan merkezi röle seçme yöntemleri geniş ölçekli ağlar için gerçekleştirilebilir değildir. Çünkü kaynağın kapsama alanına giren röle sayısının yüzlerce olduğu bir senaryoda anlık kanal bilgisinin toplanması, hem çoklu-erişim kanalının kullanımı sırasındaki yüksek çakışma olasılığı hem de fazla sayıda kontrol paketi iletimi gereksinimi gibi sorunlar nedeni ile gerçekçi bir sistemde uygulanması zordur. Bundan dolayı röle seçiminden önce seçime katılacak rölelerin sayısını kısıtlamanın ve röle seçimini bu altkümedeki röleler içinden yapmanın enerji verimliliği açısından avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada yalnızca içerisindeki rölelerin etkin olduğu ve röle seçimine katıldığı bir etkin röle alanı (ERA) tanımlanmaktadır. Bu sayede röle seçimine katılan röle sayısı kısıtlanmakta ve enerji tüketimi azaltılmaktadır. ERA'nın dışındaki röleler düşük güç tüketimi sağlayan uyku moduna geçirilmektedir. Önerilen yöntemde, ERA'nın tanımlanması ile belirlenmiş olan sınırlı sayıdaki röle içerisinde kaynak-röle arasındaki kanal gücü en yüksek olan röle, merkezi bir yaklaşımla seçilmektedir. ERA'nın belirlenmesi paket iletimine göre daha seyrek olarak yapılmakta, yani belirli sayıdaki veri paketi iletimi için aynı röle kümesi içerisinde seçim yapılmaktadır. Her paket iletimi için en iyi röle seçimi yeniden yapılmaktadır. Bu çalışmanın esas katkısı, röle kümesinin belirlenmesi, en iyi rölenin seçimi ve veri paketi iletimi aşamalarında

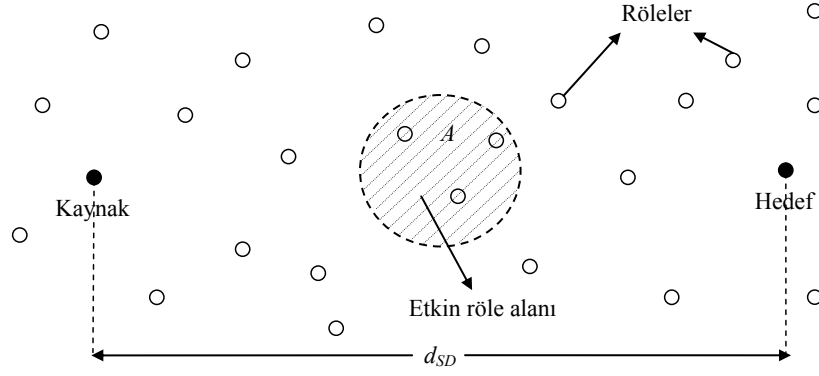
harcanan enerjilerin ayrı ayrı ele alınmasıdır. Aynı zamanda iletim için harcanan enerji ile birlikte devrelerde harcanan enerji hem veri iletimi hem de kontrol paketlerinin iletimi için hesaba katılmaktadır. Sonuç olarak enerji verimliliğini maksimum yapacak merkezi bir yöntem önerilmekte, bu yöntemin bütün aşamaları ayrıntılı bir şekilde incelenmekte ve enerji tüketimine neden olan bütün kalemler hesaba katılmaktadır.

3.2 Sistem Modeli ve Problem Tanımı

Kaynak-hedef arası uzaklığın (d_{SD}) büyük olduğu durumlarda kaynak-hedef arası doğrudan iletişim enerji verimliliği, bant verimliliği gibi birçok yönden istenilen sonuçları vermez. Telsiz ağlarda röle kullanımı d_{SD} 'yi parçalara ayırmak suretiyle yol kaybı etkisini azalttığı için d_{SD} 'nin büyük olduğu durumlarda iletişimi röle veya röleler aracılığıyla yapmak tercih edilebilmektedir. Ancak telsiz ağlarda, özellikle geniş-ölçekli dağıtılmış ağlarda, rölenin(lerin) nasıl seçildiği önem taşımaktadır, çünkü en iyi rölenin(lerin) seçim süreci gecikme, röle seçimi ile ilgili fazladan kontrol paketi iletimi gibi bazı ciddi olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Bu çalışmada enerji verimliliği bakımından en iyi rölenin seçimi kapsamlı bir biçimde incelenmektedir.

Şekil 3.1'de gösterilen düzgün dağılımlı (ρ (m^{-2}) yoğunluklu) rölelerden oluşan geniş ölçekli bir ağ modeli göz önünde bulundurulmaktadır. Bir kaynak, bir hedef ile seçilmiş bir röle aracılığıyla iletişim kurmaktadır ve röleler çöz-ve-aktar tekniğiyle çalışmaktadır. d_{SD} 'nin büyük olduğu durumlar göz önüne alındığı için kaynak ile hedef arasında verimli bir veri iletişiminin olmadığı düşünülmektedir. Yalnızca, kaynak ile hedef arasındaki iletişimin başlatılması için bir kontrol paketinin iletilmesi söz konusudur ve bu kontrol paketinin nasıl iletileceği daha sonraki bölümlerde anlatılacaktır. Veri iletiminin sadece röleler aracılığıyla sağlandığı düşünülmektedir. Yalnızca içerisindeki rölelerin röle seçimine katıldığı bir ERA tanımlanmaktadır. Bir paket iletimi için gerekli olan süre boyunca kanalın sabit kaldığı, bir sonraki paket iletiminde ise kanalın Rayleigh dağılımına bağlı olarak yeni bir değer aldığı blok sönmülemeli kanal modeli varsayılmaktadır. Veri iletimi için minimum bir veri hızı kısıtının bulunduğu ve her verici için de iletim gücü üst sınır kısıtının olduğu düşünülmektedir.

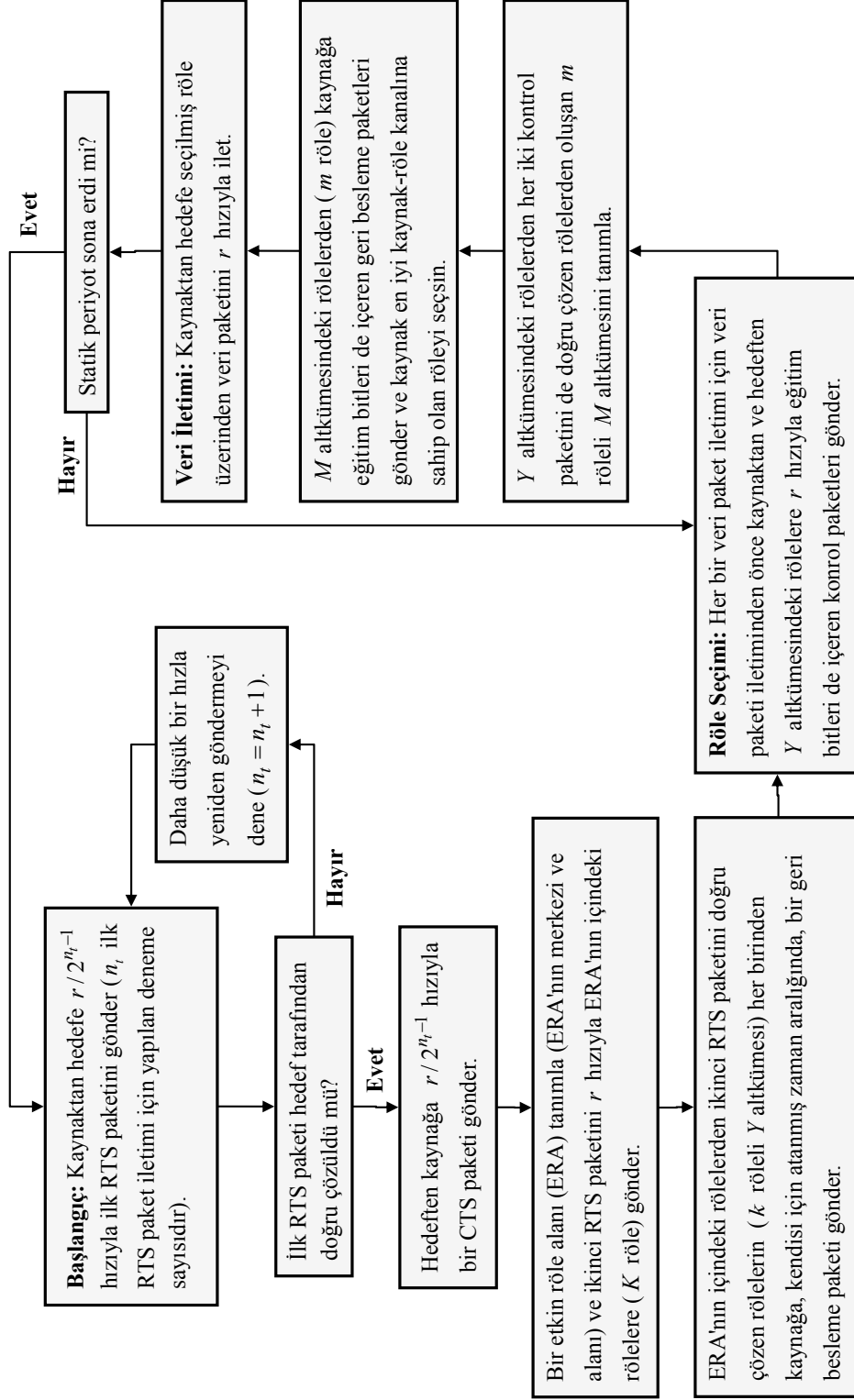
Ağdaki bütün gezgin aygıtlar özdeştir ve aygıtların verme, alma, bekleme, uyku modları olmak üzere dört farklı güç tüketim seviyesi vardır. Verme, alma ve bekleme



Şekil 3.1 : Ele alınan geniş ölçekli ağ modeli.

modlarına kısaca etkin mod adı verilmektedir. Genellikle gezgin aygıtların verme ve alma durumlarındaki devre güç tüketimleri birbirine yakın, bekleme modunda kabaca onda biri ve uyku modunda ise binde biri mertebesinde [65]. Bir aygıt bekleme modunda alma ve verme modlarına hızlıca geçiş yapabilmekte ve gönderilen bir paketi alabilmektedir. Uyku modunda ise devrenin birçok kısmı kapalı bulunduğu için gönderilen bir paketi alamamakta ve diğer modlara geçişi zaman almaktadır. Bu yüzden uyku modunda güç tüketimi düşük olmakla beraber gerçek zamanlı iletişim için uygun değildir. Ancak uyku modundaki bir aygıt belirli periyotlarla, örneğin 1-2 saniyede bir uyanıp belirli bir süre uyanık kalmaktadır [65]. Bu çalışmada uyku modundaki güç tüketimi çok düşük olması nedeni ile ihmal edilmektedir.

ERA'nın dairesel olduğu ve alanının A olup, kaynak-hedef arası uzaklığa göre dairesel alanın çapının oldukça küçük olduğu varsayılmaktadır. Bilgisayar benzetimleri sırasında rölelerin gerçek konumları kullanılmasına rağmen, kolaylık açısından kuramsal çıkarımlarda ERA içerisindeki rölelerin alanın merkezinde olduğu varsayılmaktadır. Sonraki bölümlerde göreceğimiz gibi kuramsal ve benzetim sonuçlarının ciddi anlamda örtüşmesi nedeniyle bu varsayımın makul bir varsayım olduğu ve sonuçları çok etkilemediği gözlemlenmektedir. Bütün gezgin aygıtların bir GPS alıcısı yardımıyla konumlarını bildikleri de varsayılmaktadır. Veri iletimi başlangıç, röle seçme ve veri iletimi olmak üzere üç aşamada yapılmaktadır. Önerilen enerji verimlilikli röle seçme yönteminin akış diyagramı Şekil 3.2'de gösterilmekte ve başlangıç, röle seçme ve veri iletimi aşamaları kısaca anlatılmaktadır.



Şekil 3.2 : Önerilen enerji-verimlilikli röle seçme yöntemine ait akış diyagramı.

3.2.1 Başlangıç aşaması - röle kümesinin belirlenmesi

Bu aşamada ulaşılmak istenen iki amaç vardır: röle seçimine katılacak rölelerin belirlenmesi ve bu rölelerin her biri için ayrı zaman aralıklarının belirlenmesi. Rölelerin düşük hızlarda hareket ettikleri varsayılmaktadır ve bu şekilde ERA içerisinde kalan röle altkümesi belirlendikten sonra belirli bir zaman boyunca rölelerin sabit kaldıkları, dolayısıyla belirlenen röle altkümesinin geçerli olduğu varsayılabilir. Rölelerin hareketsiz varsayıldığı bu zaman dilimine statik periyot adı verilmekte ve bu periyot boyunca röle altkümesinin ve röleler için atanan bu zaman aralıklarının değişmeden kaldığı düşünülmektedir. Böylece başlangıç aşamasının her statik periyot boyunca sadece bir kez tekrar edilmesinin yeterli olacağı anlaşılmaktadır.

Kaynak bir hedefe veri iletmek istediğinde, hedefe maksimum iletim gücü P_{max} ile gönderim isteği paketi (RTS: Ready-to-Send) göndermektedir. Ancak d_{SD} 'nin büyük olduğu düşünüldüğü için hedefin gönderilen RTS paketini düzgün bir biçimde almama olasılığı büyüktür. Bu yüzden kaynak ile hedef arasındaki iletişimin başlatılması için bir protokol önerilmektedir. Servis dışı kalma olasılığının minimum veri hızı kısıtı ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. Veri hızını düşürmek servis dışı kalma olasılığını da azaltacaktır. Bu yüzden yalnızca RTS paketi için veri hızı hedef veri hızından (r bit/s/Hz) başlanarak adım adım düşürülmektedir. Örneğin kaynak bir RTS paketini r hızı ile göndermektedir ve hedeften bir gönderime uygun paketi (CTS: Clear-to-Send) beklemektedir. Hedef RTS paketini doğru çözerse CTS paketi göndermektedir. Ağdaki bütün alıcılar, paketlerin sonuna eklenen döngüsel artıklık denetimi (CRC: Cyclic Redundancy Check) sayesinde aldıkları paketi doğru çözüp çözmediklerini kolay ve etkin bir şekilde saptayabilmektedirler. Eğer hedeften bir yanıt gelmezse, kaynak hızını $r/2$ ye düşürerek ikinci bir sefer daha denemektedir ve yine yanıt gelmezse $r/4$, $r/8$ biçiminde hız düşürülerek tekrar tekrar denemektedir. Bu işlem hedeften bir yanıt gelene kadar ya da hız belirli bir eşik değerin altına düşene kadar devam etmektedir.

Eğer kaynak ile hedef arasında bir iletişimin kurulması sağlanırsa kaynak ERA'nın içerisinde kalan bütün rölelere (K röle) yeni bir RTS paketi (ikinci RTS paketi

olarak adlandırılacaktır) göndermektedir. Bu ikinci RTS paketi ERA'nın yarıçapı ile merkezinin konum bilgisini de içermektedir. K Poisson dağılımlı olup olasılık yoğunluk işlevi (pdf: probability density function)

$$p_K(K) = \frac{(\rho A)^K e^{-\rho A}}{K!}, \quad K = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (3.1)$$

biçiminde verilmektedir. Burada önemli bir nokta, ERA'nın içerisindeki rölelerin tamamının ikinci RTS paketini doğru olarak çözmemesidir. Bu yüzden ERA'nın içerisindeki rölelerden ikinci RTS paketini doğru çözenler Y altkümesini oluşturmaktadır. Röleler, paketlerin sonuna eklenen CRC sayesinde aldıkları paketi doğru çözüp çözmediklerini saptayabilmektedirler. Y ye ait röle sayısı k , K ye, d_{SD} 'ye ve ERA'nın merkezinin konumuna bağlı rastlantısal bir değişkendir. İletişim için minimum veri hızı kısıtı vardır ve maksimum iletim gücü ile istenen minimum veri hızı r sağlanamazsa sistem servis dışı kalmaktadır. Kaynak ile i inci röle arasındaki bağlantıya ($S \rightarrow R_i$) ilişkin ulaşılabilen en yüksek veri hızı

$$R_{SR_i} = \log_2 \left(1 + \frac{P_S |h_i|^2}{\sigma^2 d_{SR}^n} \right) \quad (3.2)$$

biçiminde verilmektedir. P_S kaynağın iletim gücü, h_i kanal sönümlemesini gösteren, ortalaması 0 standart sapması 1 olan karmaşık Gauss rastlantı değişkeni, d_{SR} kaynak ile ERA'nın merkezi arasındaki uzaklık, n yol kaybı katsayısıdır. $\sigma^2 = BN_0 N_f G_1$ biçiminde tanımlanmaktadır ve burada B bant genişliği, N_0 gürültünün güç spektral yoğunluğu, N_f alıcı gürültü eşdeğeri (receiver noise figure), G_1 1 m'deki kazanç çarpanı. Aynı şekilde i inci röle ile hedef arasındaki bağlantıya ($R_i \rightarrow D$) ilişkin ulaşılabilen en yüksek veri hızı

$$R_{R_i D} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{R_i} |g_i|^2}{\sigma^2 d_{RD}^n} \right) \quad (3.3)$$

biçiminde verilmektedir. Burada P_{R_i} i inci röle için iletim gücü, kanal sönümleme katsayısı g_i , $R_i \rightarrow D$ bağlantısına ilişkin ortalaması 0 standart sapması 1 olan karmaşık Gauss rastlantı değişkeni, d_{RD} ERA'nın merkezi ile hedef arasındaki uzaklıktır. Servis dışı kalma olasılığı, bir bağlantının ulaşılabilen en yüksek veri hızının hedef veri hızından düşük kalma olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Y deki bütün röleler için servis dışı kalma olasılığı özdeş olarak tanımlanmaktadır. Kaynak ile Y deki herhangi bir röle arasındaki bağlantıya ve Y deki herhangi bir röle ile hedef arasındaki bağlantıya

ilişkin servis dışı kalma olasılıkları, sırasıyla,

$$\begin{aligned} P_{o,1} &= \Pr \left\{ |h_i|^2 < \frac{(2^r - 1)\sigma^2 d_{SR}^n}{P_{max}} \right\} \\ &= 1 - e^{-\beta_1} \end{aligned} \quad (3.4)$$

ve

$$\begin{aligned} P_{o,2} &= P \left\{ |g_i|^2 < \frac{(2^r - 1)\sigma^2 d_{RD}^n}{P_{max}} \right\} \\ &= 1 - e^{-\beta_2}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

biçiminde verilmektedir. Burada $\beta_1 = (2^r - 1)\sigma^2 d_{SR}^n / P_{max}$ ve $\beta_2 = (2^r - 1)\sigma^2 d_{RD}^n / P_{max}$ olarak tanımlanmaktadır. Y deki rölelerin ikinci RTS paketini doğru olarak çözen rölelerden oluştuğu belirtilmişti. Bu durumda k, K ya koşullu olarak

$$p_{k|K}(k|K) = \binom{K}{k} (1 - P_{o,1})^k (P_{o,1})^{K-k} \quad (3.6)$$

biçiminde verilmektedir. Burada $k = 0$ olması Y altkümesinin boş olduğu anlamına gelmektedir ve bu durumda sistem servis dışıdır. Başlangıç aşamasında sistem servis dışı kalmış ise kaynak statik periyot boyunca beklemekte ve daha sonra ERA'nın içerisindeki röleleri güncellemektedir. Bu koşulda fazladan enerji tüketilmemekte ancak etkin veri hızı (r_e) düşmektedir. Bundan dolayı EE ile r_e arasında kuvvetli bir ilişki vardır ve ilerleyen bölümlerde bu ilişki daha ayrıntılı olarak incelenecektir.

Bu aşamadaki ikinci önemli adım Y altkümesindeki her bir röle için ayrı bir zaman aralığının atanması işlemidir ve bu işlem Aloha ile yapılabilmektedir. Aloha basit bir çoklu erişim (multiple access) tekniğidir. Bu teknikte, kanalı kullanma yetkisi bulunan her verici, kanalın meşgul olup olmamasına bakmaksızın göndermek istediği bir paket varsa göndermektedir. Paket iletimleri ayrık zaman aralıklarında yapılıyorsa dilimli Aloha (slotted Aloha) denilmektedir ve tezde kısaca Aloha olarak söz edilen teknik dilimli Aloha tekniğidir. Aloha basit bir teknik olmakla birlikte yüksek çakışma olasılığına sahip olması nedeni ile etkin veri hızı (throughput) düşüktür [51]. Y altkümesindeki her bir röle kaynağa bir kontrol paketi göndermeye çalışmaktadır. Bütün rölelerin aynı anda paket göndermesi istenmeyeceğinden her bir röle için P_{acc} kanalı kullanma isteğinde bulunma olasılığı tanımlanmaktadır. Tek zaman aralıklarında röleler P_{acc} olasılıkla kontrol paketi göndermeye çalışmakta ve ancak tek bir röle paket gönderdiğinde sıradaki zaman aralığı o röle için ayrılmaktadır. Kaynak, yalnız bir paket aldıysa, bir sonraki çift zaman aralığında paket gönderebilen röle için bir zaman aralığının ayrıldığını haber vermektedir. O röle tekrar kontrol paketi

göndermeye çalışmayacaktır. Kalan röleler diğer tek zaman aralıklarında kontrol paketi göndermeye devam etmektedirler. Bu işlem her bir röle için bir zaman aralığı ayrılana kadar devam etmektedir.

k büyük bir sayı ise Y deki röleler için zaman aralıklarını atama işlemi oldukça uzun sürebilmektedir. Bu yüzden optimum P_{acc} 'in belirlenmesi çok önemlidir. k röle varken ilk zaman aralığında tek bir rölenin paket gönderme olasılığı

$$P_{s,k} = kP_{acc}(1 - P_{acc})^{k-1} \quad (3.7)$$

biçiminde verilmektedir. Yine k röle varken ilk zaman aralığı başarıyla atanana kadar geçen zaman aralığı sayısının ortalaması

$$L_k = \sum_{L=1}^{\infty} L(1 - P_{s,k})^{(L-1)} P_{s,k} \quad (3.8)$$

biçiminde verilmektedir. Burada L zaman aralığı sayısıdır. Bu toplam

$$\begin{aligned} L_k &= P_{s,k} + 2(1 - P_{s,k})P_{s,k} + 3(1 - P_{s,k})^2 P_{s,k} \dots \\ &= P_{s,k}(1 + 2(1 - P_{s,k}) + 3(1 - P_{s,k})^2 \dots) \end{aligned} \quad (3.9)$$

biçiminde elde edilmektedir. Her iki tarafı $(1 - P_{s,k})$ ile çarptığımızda

$$L_k(1 - P_{s,k}) = P_{s,k}((1 - P_{s,k}) + 2(1 - P_{s,k})^2 + 3(1 - P_{s,k})^3, \dots) \quad (3.10)$$

elde edilmektedir. (3.9)'dan (3.10) çıkarıldığında

$$\begin{aligned} L_k - L_k(1 - P_{s,k}) &= P_{s,k}(1 + (1 - P_{s,k}) + (1 - P_{s,k})^2 + \dots) \\ &= P_{s,k} \left(\frac{1}{1 - (1 - P_{s,k})} \right) = 1 \end{aligned} \quad (3.11)$$

elde edilmektedir. Sonuç olarak

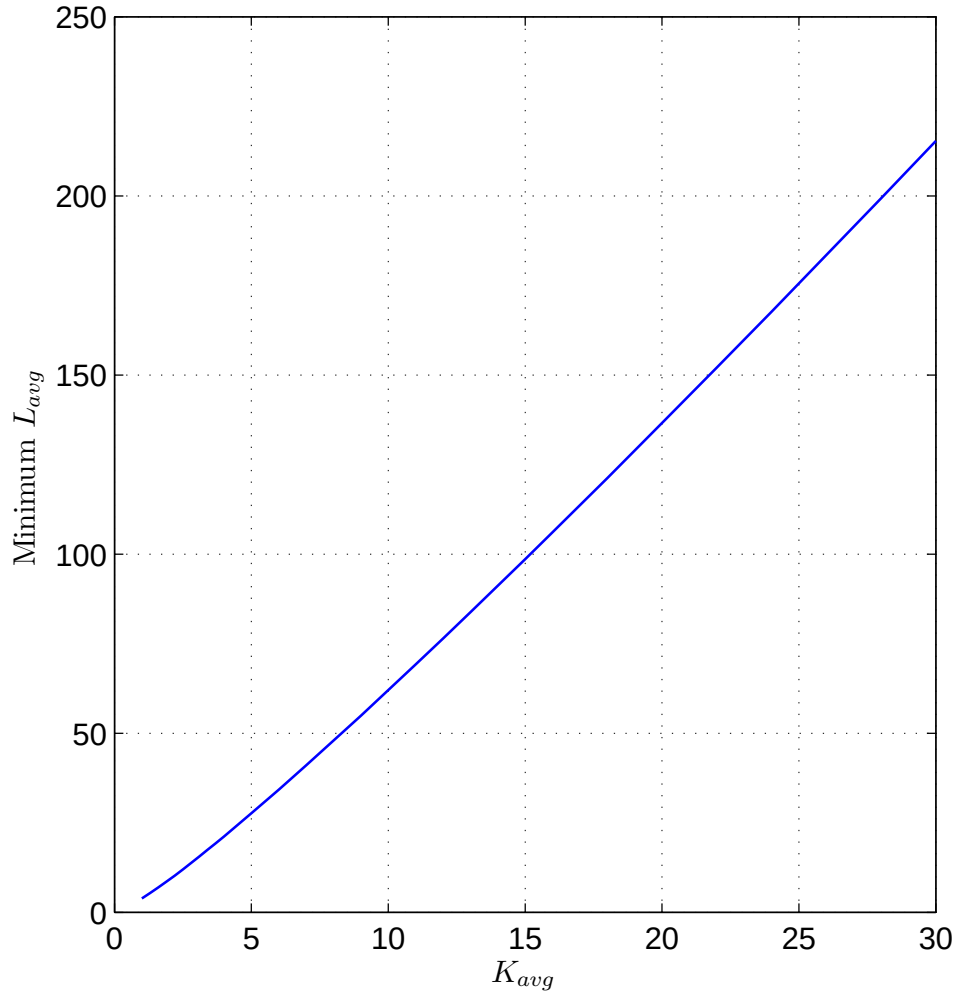
$$L_k = \frac{1}{P_{s,k}} \quad (3.12)$$

olarak bulunmaktadır. Y deki bütün röleler için birer zaman aralığının ayrılması için gerekli toplam zaman aralığının sayısının ortalaması

$$\bar{L}_k = \sum_{j=0}^{k-1} L_{k-j} \quad (3.13)$$

biçiminde yazılmaktadır. k da bir rastgele değişken olduğu için optimum P_{acc} 'in bulunabilmesi için $\bar{L}_k$ 'nın k üzerinden ortalamasının bulunması gerekmektedir. (3.7), (3.8) ve (3.13) yardımıyla

$$\begin{aligned} L_{avg} &= \sum_{K=1}^{\infty} \sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^{k-1} p_K(K) p_{k|K}(k|K) \frac{1}{P_{s,k-j}} \\ &= \sum_{K=1}^{\infty} \sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^{k-1} \frac{p_K(K) p_{k|K}(k|K)}{(k-j)P_{acc}(1 - P_{acc})^{k-j-1}} \end{aligned} \quad (3.14)$$



Şekil 3.3 : ERA'daki ortalama röle sayısına bağlı olarak minimum L_{avg} .

biçiminde elde edilmektedir. Optimum P_{acc} nümerik analizler sonucunda elde edilmektedir.

Şekil 3.3'te, $d_{SD} = 500$ m ve ERA'nın merkezinin kaynak-röle arasında orta noktada olduğu varsayımı altında, optimum P_{acc} ve sabit A değerleri için ERA'daki ortalama röle sayısına (K_{avg}) bağlı olarak minimum L_{avg} gösterilmektedir. L_{avg} 'ın belirli bir değerin üzerinde olması istenmemektedir çünkü zaman aralıklarının atanması işlemi için gerekli sürenin kanalın uyumluluk zamanından kısa olması gerekmektedir. Bu yüzden incelenen sistemin uyumluluk zamanının 200 zaman aralığı civarında olduğu varsayımı altında bu yöntemde röle altkümesinin ortalaması en fazla 30 civarında olabilmektedir.

Yavaş değişen sönmülemeli bir telsiz ağ düşünülmektedir. Bu yüzden birkaç saniyelğine bütün rölelerin sabit kaldığı varsayılmaktadır ve bu makul bir varsayımdır

çünkü örneğin rölelerin hızları 2 m/s olsa ve statik periyot 5 s olsa bir periyot boyunca alınan toplam yol 10 m'dir. Bu da düşünülen en küçük $d_{SD} = 400$ m'ye kıyasla ihmal edilebilir bir uzaklıktır. Bu varsayımın bir sonucu da Y altkümesinin bir periyot boyunca aynı kalması ve her statik periyot sonunda güncellenmesidir. Başka bir deyişle, başlangıç aşaması her bir statik periyotta yalnızca bir kez işlemekte ve başlangıç aşamasında elde edilen sonuçlar ilgili periyotun sonuna kadar geçerliliğini korumaktadır. Bilgisayar benzetimleri sırasında statik periyot 5 saniye olarak alınmakta ve bu sürede veri hızına bağlı olarak 60 ila 360 veri paketi iletilmektedir. Bundan dolayı başlangıç aşaması bir statik periyotun en fazla %0.3 ile %1.6 aralığındaki bir kısmını kapsamaktadır. Sonuç olarak başlangıç aşamasında harcanan enerji matematiksel analizlerde ihmal edilmektedir. Benzetim sonuçları da bu enerjinin ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir.

3.2.2 Röle seçimi aşaması

Başlangıç aşaması her statik periyotta bir kez çalıştırılmasına rağmen röle seçme aşamasının her paket iletiminde çalıştırılması gerekmektedir. Önerilen yöntemde röle seçimi yalnızca kaynak-röle bağlantılarının anlık kanal bilgisine bağlı olarak yapılmaktadır. Kaynak-röle ve röle-hedef bağlantılarının tamamının göz önünde bulundurulması yerine bu tarz bir röle seçimi, karmaşıklığının düşük olması ve daha az kontrol paketi iletimine gereksinim duyması bakımından tercih edilebilmektedir ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır [66–68]. Başlangıç aşamasından sonraki her veri paket iletimi için önerilen röle seçme protokolünün adımları şu şekildedir:

1. Her paket iletiminden sonraki ilk zaman aralığında hedef kanal kestirimi için gerekli olan alıştırma bitlerini de içeren bir kontrol paketi göndermektedir.
2. İkinci zaman aralığında kaynak da alıştırma bitlerini de içeren bir kontrol paketi göndermektedir.
3. Y altkümesindeki rölelerin tamamı bu kontrol paketlerinin her ikisini de doğru olarak çözemezler. Bu röleler servis dışı olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle M ile gösterilen yeni bir altküme tanımlanmaktadır. Her paket iletiminde Y deki rölelerden servis dışı olmayanlar M altkümesini oluşturmaktadır ve M nin eleman sayısı m dir.

4. Eğer bir röle M altkümesinin içerisinde ise kendisine ayrılan zaman aralığında kaynağa bir geri besleme paketi göndermektedir ve bu paket, kaynağın ilgili kanalı kestirmesine olanak sağlamak için eğitim bitleri de içermektedir.
5. Son olarak, kaynak M deki rölelerden kaynak-röle bağlantısı için en iyi kanal gücüne sahip röleyi seçmektedir.

Seçilen rölenin servis dışı olmadığı bilinmektedir çünkü M altkümesinden seçilmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi bütün etkin gezgin aygıtlar başlangıç aşamasında senkronize edildiği için her bir röle zaman aralıklarının sırasını ve kendisi için atanan zaman aralığını bilmektedir. Y altkümesindeki röleler için servis dışı kalma olasılığı

$$\begin{aligned} P_{o,R} &= 1 - (1 - P_{o,1})(1 - P_{o,2}) \\ &= 1 - e^{-\beta_1} e^{-\beta_2} \end{aligned} \quad (3.15)$$

biçiminde verilmektedir. Bu durumda m nin k ya koşullu pdf'i

$$p_{m|k}(m|k) = \binom{k}{m} (1 - P_{o,R})^m (P_{o,R})^{k-m} \quad (3.16)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir.

Bu aşamada harcanan enerji iki kısımda incelenebilmektedir: Devrelerde harcanan enerji ve kontrol paketlerinin (RTS, CTS, geri besleme gibi) iletimi için harcanan enerji. Bütün kontrol paketlerinin aynı uzunluğa sahip oldukları ve P_{max} ile iletildikleri varsayılmaktadır. Dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta şudur: Y altkümesindeki röleler, servis dışı olanlar da dahil, uyku moduna geçemezler çünkü bir sonra iletilecek olan veri paketi için yeni bir röle seçimi yapılacaktır ve ancak etkin olan röleler seçime katılabilmektedirler. İki ardışık paket arasında uyku moduna geçip sonra yeniden etkin moda geçmek süre açısından uygulanabilir olmadığı için Y altkümesindeki röleler uyku moduna geçememektedirler [19]. Böylece etkin röle sayısı k olmaktadır ve bu durumda röle seçme aşamasında kontrol paketlerinin iletimi sırasında devrelerde harcanan enerji

$$\begin{aligned} E_{cs}(m) &= (2(P_{ts} + kP_{rs} + P_{is}) \\ &\quad + m(P_{ts} + P_{rs} + kP_{is}) + (k - m)(k + 2)P_{is})T_c \end{aligned} \quad (3.17)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada P_{ts} , P_{rs} ve P_{is} sırasıyla verme, alma ve bekleme modlarında güç tüketimini, T_c bir kontrol paketinin iletimi için gerekli süredir ve

bu süre bir zaman aralığına da denktir. (3.17)'deki birinci terim kaynak ve hedef tarafından M altkümesindeki rölelere gönderilen kontrol paketleri içindir, ikinci terim M deki rölelerin kaynağa gönderdikleri geri besleme paketleri içindir ve üçüncü terim Y deki servis dışı olan röleler ($k - m$ adet) için ayrılan zaman aralıklarında, bekleme modunda olan gezgin aygıtların (k röle, kaynak ve hedef) devrelerinde harcanan enerji içindir. Röle seçme aşamasında kontrol paketlerinin iletimi için harcanan enerji de

$$E_{ts}(m) = \frac{(m+2)P_{max}T_c}{\alpha} \quad (3.18)$$

biçiminde verilmektedir. Burada α yükselticinin verimliliğidir ve $(m+2)$ röle seçme aşamasında iletilen toplam kontrol paket sayısını göstermektedir.

3.2.3 Veri iletimi aşaması

Son aşama seçilen röle aracılığıyla verinin iletilmesidir. $P_{T,m}$, m ye koşullu olarak toplam iletim gücüdür ve $P_{T,m} = P_{S,m} + P_{R,m}$ biçiminde verilmektedir. Burada $P_{S,m}$ kaynağın iletim gücü ve $P_{R,m}$ seçilen rölenin iletim gücüdür. Öncelikle $P_{S,m}$ bulunacaktır. $|h_i|$ birim varyanslı Rayleigh dağılımlı olduğu için $\Gamma_i = |h_i|^2$ parametresi 1 olmak üzere üstel dağılımlıdır. M deki röleler içinden $S \rightarrow R_i$ bağlantısının kanal gücü maksimum olan röle seçilmektedir ve seçilen rölenin kanal gücü $\Gamma_{max} = \max(\Gamma_i | \Gamma_i \geq \beta_1, \forall i \in M)$ biçiminde ifade edilmektedir. Burada $\Gamma_i \geq \beta_1$ koşulu geçerlidir çünkü M servis dışı kalmayan rölelerin oluşturduğu altkümedir. Böylece kaynağın iletim gücü

$$P_{S,m} = \frac{(2^r - 1)\sigma^2 d_{SR}^n}{\Gamma_{max}} \quad (3.19)$$

eşitliği ile verilmektedir. $P_{S,m}$ 'nin ortalaması bulunmak istenmektedir bundan dolayı Γ_{max} 'ın pdf'inin bulunması gerekmektedir. Γ_{max} 'ın olasılık dağılım işlevi (cdf: cumulative distribution function)

$$\begin{aligned} F_{\Gamma_{max}}(\gamma) &= \Pr\{\Gamma_{max} \leq \gamma | \Gamma_i \geq \beta_1, \forall i \in M\}, \\ &= \prod_{i \in M} \Pr\{\Gamma_i \leq \gamma | \Gamma_i \geq \beta_1\} \end{aligned} \quad (3.20)$$

biçiminde yazılmaktadır. Γ_i 'ler özdeş oldukları için alt indis i düşmektedir ve $F_{\Gamma_i}(\gamma) = F_{\Gamma}(\gamma) = \Pr\{\Gamma_i \leq \gamma\}$ olmak üzere

$$\Pr\{\Gamma_i \leq \gamma | \Gamma_i \geq \beta_1\} = \frac{F_{\Gamma}(\gamma) - F_{\Gamma}(\beta_1)}{1 - F_{\Gamma}(\beta_1)} \quad (3.21)$$

biçiminde elde edilmektedir [69]. Böylece

$$F_{\Gamma_{max}}(\gamma) = \left(\frac{F_{\Gamma}(\gamma) - F_{\Gamma}(\beta_1)}{1 - F_{\Gamma}(\beta_1)} \right)^m \quad (3.22)$$

elde edilmektedir. Γ_{max} 'ın pdf'i de

$$f_{\Gamma_{max}}(\gamma) = m \left(\frac{F_{\Gamma}(\gamma) - F_{\Gamma}(\beta_1)}{1 - F_{\Gamma}(\beta_1)} \right)^{m-1} \frac{f_{\Gamma}(\gamma)}{1 - F_{\Gamma}(\beta_1)} \quad (3.23)$$

biçiminde bulunmaktadır. Burada $f_{\Gamma}(\gamma)$ Γ_i nin pdf'idir ($\Gamma_i, \forall i \in M$). Γ_i üstel dağılımlı olduğu için $F_{\Gamma}(\gamma) = 1 - e^{-\gamma}$ ve $f_{\Gamma}(\gamma) = e^{-\gamma}$ olmaktadır ve

$$f_{\Gamma_{max}}(\gamma) = m \frac{(e^{-\beta_1} - e^{-\gamma})^{m-1}}{e^{-m\beta_1}} e^{-\gamma} \quad (3.24)$$

biçiminde yazılmaktadır. Buradan $P_{S,m}$ 'in ortalaması

$$\begin{aligned} \bar{P}_{S,m} &= \int_{\beta_1}^{\infty} \frac{(2^r - 1) \sigma^2 d_{SR}^n}{\gamma} f_{\Gamma_{max}}(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{m\beta_1 P_{max}}{e^{-m\beta_1}} \int_{\beta_1}^{\infty} \frac{(e^{-\beta_1} - e^{-\gamma})^{m-1} e^{-\gamma}}{\gamma} d\gamma \\ &= \frac{m\beta_1 P_{max}}{e^{-m\beta_1}} \sum_{j=0}^{m-1} (-1)^j \binom{m-1}{j} e^{-(m-j-1)\beta_1} \text{Ei}(-(j+1)\beta_1) \end{aligned} \quad (3.25)$$

biçiminde bulunmaktadır. Burada $\text{Ei}(x)$ üstel integraldir ve $\text{Ei}(x) = -\int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$ biçiminde tanımlanmaktadır. $P_{R,m}$ de benzer biçimde bulunmaktadır. Röle seçimi $R_i \rightarrow D$ bağlantılarına bağlı olarak yapılmadığı ve rölelerin kanal gücü $\Lambda_i = |g_i|^2$ bütün rölelerde aynı oldu için seçilen rölenin kanal gücü ($\Lambda = \Lambda_i \mid \Lambda_i \geq \beta_2, i \in M$) biçiminde ifade edilmektedir. Bu durumda seçilen rölenin iletim gücü

$$P_{R,m} = \frac{(2^r - 1) \sigma^2 d_{RD}^n}{\Lambda} \quad (3.26)$$

biçiminde verilmektedir. M altkümesindeki rölelerin servis dışı kalmadığı bilindiği için koşullu olarak ifade edilen kanal gücünün pdf'i $f_{\Lambda}(\lambda) = e^{-\lambda}/e^{-\beta_2}$ eşitliği yardımıyla $P_{R,m}$ 'nin ortalaması

$$\begin{aligned} \bar{P}_{R,m} &= \int_{\beta_2}^{\infty} \frac{(2^r - 1) \sigma^2 d_{RD}^n}{\lambda} f_{\Lambda}(\lambda) d\lambda, \\ &= \beta_2 P_{max} \int_{\beta_2}^{\infty} \frac{e^{-\lambda}}{\lambda e^{-\beta_2}} d\lambda, \\ &= \frac{\beta_2 P_{max}}{e^{-\beta_2}} \text{Ei}(-\beta_2). \end{aligned} \quad (3.27)$$

olarak elde edilmektedir. Sonuç olarak veri iletimi aşamasında iletim için harcanan ortalama enerji

$$E_{td}(m) = \begin{cases} 0, & m = 0 \text{ ise,} \\ \frac{\bar{P}_{T,m} T_d}{\alpha}, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (3.28)$$

biçiminde yazılmaktadır. Burada $\bar{P}_{T,m} = \bar{P}_{S,m} + \bar{P}_{R,m}$ ortalama toplam güç, T_d bir paketin kaynaktan röleye iletim süresidir. Paketin kaynaktan hedefe kadar iletilmesi için gerekli süre $2T_d$ dir. Veri iletimi aşamasında devrelerde harcanan güç de

$$E_{cd}(m) = \begin{cases} 2(k+2)P_{is}T_d, & m = 0 \text{ ise,} \\ 2(P_{ts} + P_{rs} + kP_{is})T_d, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases} \quad (3.29)$$

biçiminde elde edilmektedir. $m = 0$ iken sıradaki paket iletilmez ve $2T_d$ süresince bütün aygıtlar bekleme durumunda kalırlar. Bir paketin iletimi için harcanan ortalama toplam enerji (röle seçme ve veri iletimi aşamalarında harcanan enerji)

$$E_T = \sum_{K=1}^{\infty} \sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^k p_K(K) p_{k|K}(k|K) p_{m|k}(m|k) (E_{td}(m) + E_{cd}(m) + E_{ts}(m) + E_{cs}(m)). \quad (3.30)$$

biçiminde elde edilmektedir. Bütün aşamaları göz önünde bulundurarak servis dışı kalma olasılığı

$$\begin{aligned} P_{out} &= \sum_{K=0}^{\infty} \sum_{k=0}^K p_K(K) p_{k|K}(k|K) \Pr\{m = 0 \mid k\} \\ &= \sum_{K=0}^{\infty} \sum_{k=0}^K p_K(K) p_{k|K}(k|K) (P_{o,R})^k \end{aligned} \quad (3.31)$$

biçiminde yazılmaktadır. Enerji verimliliği (EE), "birim enerji ile başarılı iletilen bit sayısı" olarak tanımlanmakta ve

$$EE = \frac{L_d(1 - P_{out})}{E_T} \quad (3.32)$$

biçiminde verilmektedir [22, 63]. Burada L_d bir veri paketinin bit cinsinden uzunluğudur. Son olarak analiz edilecek diğer bir büyüklük olan etkin veri hızı (r_e) "birim zamanda başarılı iletilen bit sayısı" olarak tanımlanmakta ve

$$r_e = r(1 - P_{out}) \quad (3.33)$$

biçiminde yazılmaktadır [64].

3.2.4 Çok-kaynaklı sistemlerin incelenmesi

Bu bölümde buraya kadar tek-kaynaklı sistemler göz önünde bulundurulmaktadır. Ancak gerçek bir sistemde birden çok kaynak iletim yapma isteğinde bulunabilmektedir ve bu durumda sistemin nasıl çalışacağını da incelenmesi gerekmektedir. Telsiz ağların tasarımı ile ilgili önemli bir kısıt iletimde gecikme miktarıdır. Eğer bir telsiz ağ için gecikme süresi ile ilgili olarak bir kısıt yok ise tek-kaynaklı sistemler için düşünülen süreç çok-kaynaklı sistemler için de geçerlidir. Ama çok-kaynaklı sistemler göz önünde bulundurulduğunda kanala çoklu-erişim (multiple-access) için bir protokolün sürece katılması gerekmektedir. Bu durumda, kaynaklardan birisi çoklu-erişim kanalı (multiple-access channel) aracılığıyla kanalı kullanma hakkını elde ettikten sonra göndermesi gereken verinin tamamı iletilene kadar kanalı kullanmaya devam etmektedir. Daha sonra, diğer kaynaklar veri iletmek için istekte bulunmaktadırlar.

Ancak iletim gecikmesi ile ilgili bir kısıt olduğu durumda kanalı kullanma hakkını elde eden kaynağın ne kadar süre kanalı meşgul edebileceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Her bir kaynağın, kanalı kullanma hakkını elde ettiğinde göndermek istediği verinin tamamını tek seferde göndermek yerine N_p adet veri paketi ilettiği ve sırası geldikçe N_p adet paketi diziler halinde göndermeye devam ettiği düşünülmektedir. Önerilen yöntem açısından, çok-kaynaklı sistemlerin tek-kaynaklı sistemlerden hangi farkları gösterdikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Eğer bir kaynak veri paketi iletmek isterse herhangi bir çoklu-erişim tekniği ile kanalı kullanma hakkını elde etmektedir.
- Hedef, etkin kaynak sayısına ve gecikme kısıtına bağlı olarak N_p yi belirlemektedir.
- Kanala yeni giriş yapan kaynak için röle altkümesinin belirlenmesi ve gerekli zaman aralığı ataması işlemleri tek-kaynaklı sistemle aynı şekilde yapılabilir. Sonrasında kaynak N_p adet paketi art arda iletmektedir. İletim bittikten sonra kaynak ve bu kaynağa ait röle altkümesi yeniden sıra gelene kadar bekleme modunda beklemektedir.
- Bütün etkin kaynaklar sırasıyla N_p adetlik paket dizilerini göndermektedir ve bu sıra hedef tarafından yönetilmektedir. Hedef, sırası gelen kaynağa ait röle altkümesine

bir kontrol paketi göndererek ilettime devam etmesi isteği göndermektedir. Bu röle altkümesindeki servis dışı olmayan röleler, yani hedef tarafından gönderilen kontrol paketini doğru olarak çözebilmiş röleler, kendilerine ayrılan zaman aralıklarında kaynağa birer kontrol paketi iletmektedirler. Kaynak bu kontrol paketleri aracılığıyla kanalları kestirmekte ve en iyi kaynak-röle kanalına sahip olan röleyi seçmektedir.

- Çok-kaynaklı sistemlerde farklı kaynaklara ait röle altkümelerinin örtüşme olasılığı az da olsa vardır. Ancak, her bir kaynak kendisine ayrılan zamanda kendisi için tanımlanmış röle altkümesi üzerinden iletim yaptığı için röle altkümelerinin örtüşmesi bir sorun oluşturmaz. Diğer bir deyişle herhangi bir röle birden fazla kaynağın röle altkümesine ait olabilmekte ve hangi kaynağın sırası gelmiş ise o kaynağın iletimi sırasında rol almaktadır.

Sonuç olarak çok-kaynaklı senaryonun röle altkümesinin belirlenmesi, zaman aralığı atamalarının yapılması ve röle seçimi üzerinde tek-kaynaklı senaryoya göre farklı bir etkisi yoktur. Ancak çok-kaynaklı sistemin çoklu-erişim yapısı nedeni ile gecikme kaçınılmazdır.

3.3 Başarım Değerlendirmesi

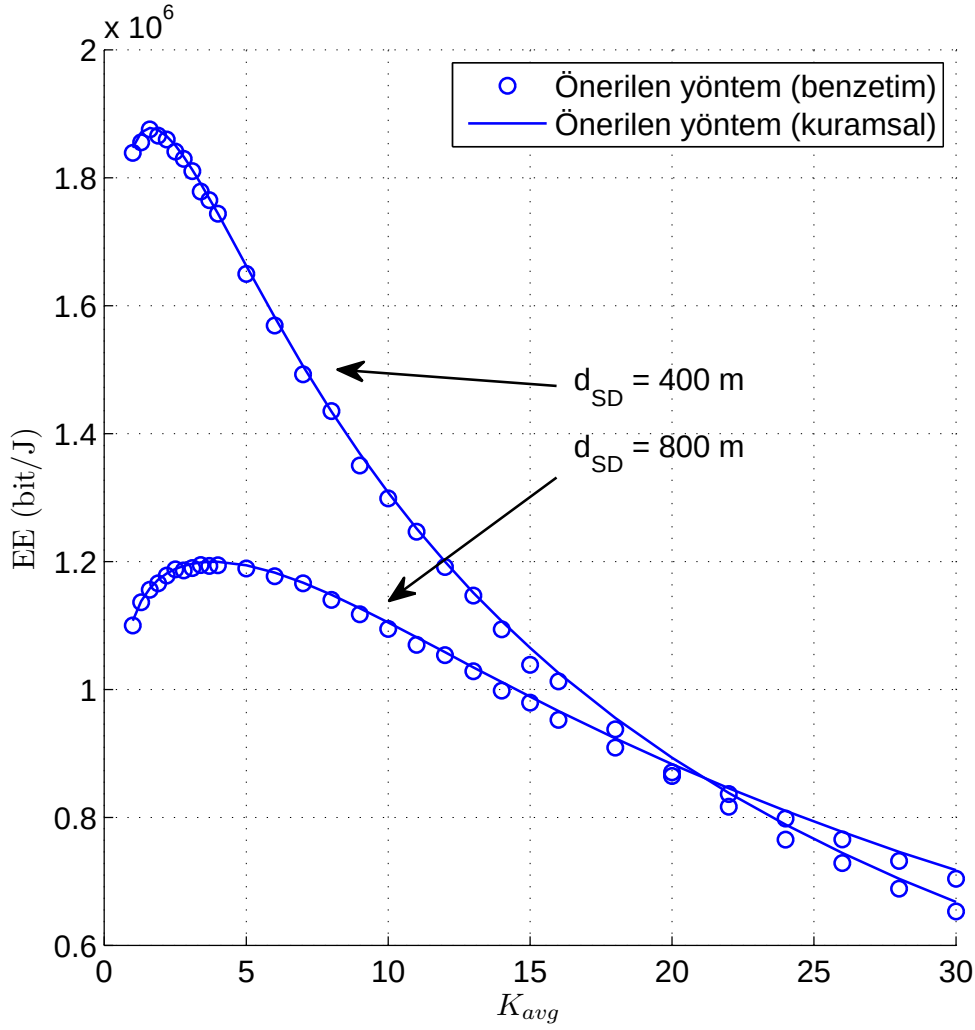
Telsiz ağın gerçekleşmesi sırasında kullanılan sistem değişkenleri Çizelge 3.1’de verilmektedir. Çizelge 3.1’deki etkin aygıtların güç tüketim özellikleri endüstriyel bir alıcı-verici [65] temel alınarak belirlenmiştir. Burada önerilen röle seçme yöntemi iki referans yöntemle enerji verimliliği ve etkin veri hızı (r_e) açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan referans yöntemlerden birincisi doğrudan iletim yöntemi ve diğeri [25]’te önerilen Aloha-temelli röle seçme yönteminin geliştirilmiş biçimidir. [25]’teki Aloha-temelli röle seçme yöntemi üzerinde adil karşılaştırma yapabilmek açısından EE başarımını artırmaya yönelik bazı geliştirmeler yapılmıştır çünkü özgün yöntem EE temel alınarak önerilmektedir. Karşılaştırmalarda kullanılan (geliştirilmiş) Aloha-temelli röle seçme yöntemi şu şekilde çalışmaktadır. Dairesel bir ERA tanımlanmaktadır ve ERA’nın alanı ($A = v/\rho$, $v = 1, 2, \dots, V$) biçiminde ayrıık olarak değiştirilebilmektedir. Kaynak tarafından en küçük alandan ($A = 1/\rho$) başlayarak A alana sahip bir ERA tanımlanmakta ve bu alanın içerisinde röle olup

Çizelge 3.1 : Sistem değişkenleri.

Değişken	Değişkenin değeri
B	500 kHz
ρ	0.01 m^{-2}
N_0	-174 dBm/Hz
N_f	10 dB
L_c	100 bit
L_d	10 kbit
G_1	10^3
α	0.35
P_{ts}	46 mW
P_{rs}	46 mW
P_{is}	6 mW
P_{max}	100 mW

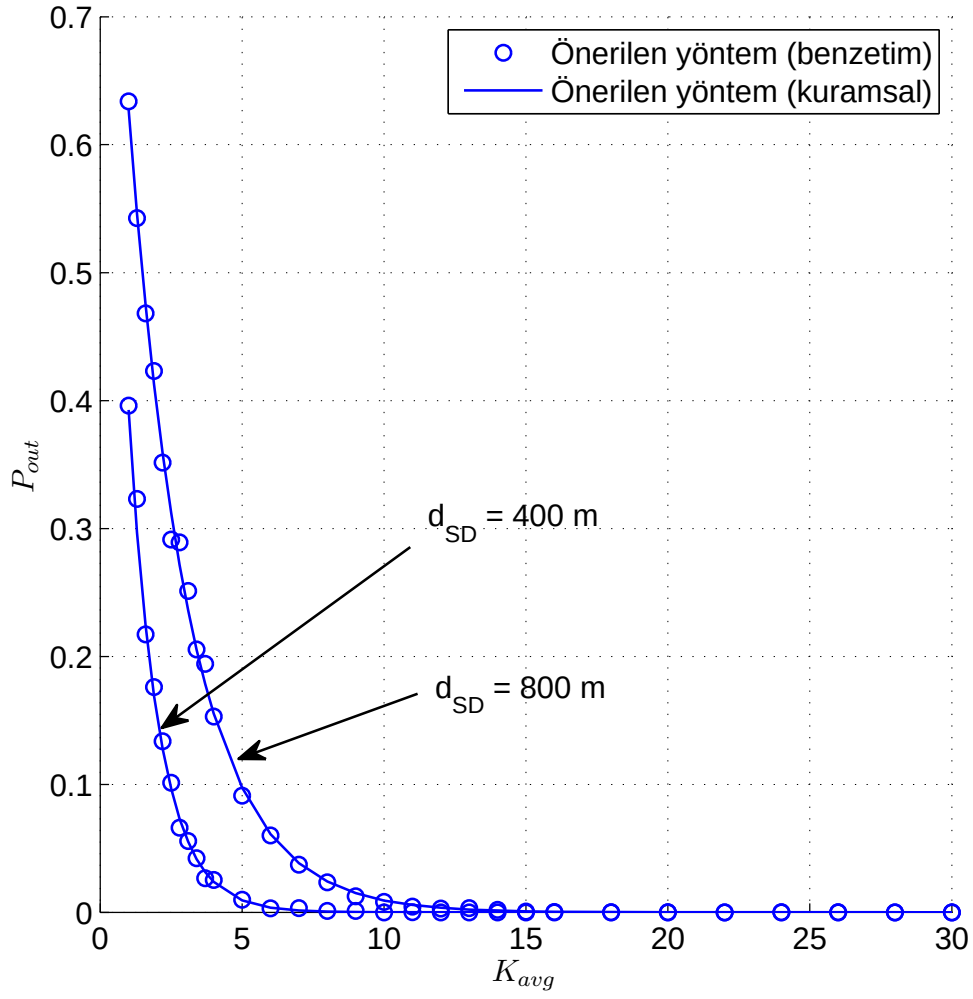
olmadığı test edilmektedir. Eğer yoksa ERA'nın alanı bir kademe daha genişletilerek aynı işlem devam etmektedir. ERA'nın alanı bir röle seçilene veya izin verilen maksimum genişliğine ulaşana kadar genişletilmektedir ve buna rağmen bir röle seçilememiş ise sistem servis dışı kalmaktadır. Eğer ERA'nın içerisinde birden çok röle varsa röleler bir kontrol paketi göndermek için her bir zaman aralığında birbirleriyle yarışmaktadırlar. Bir röle çakışma olmadan kontrol paketini göndermeyi başarana kadar veya maksimum deneme sayısına (N) ulaşana kadar röleler birbirleriyle yarışmaya devam eder. Kontrol paketini çakışma olmadan gönderen röle seçilmekte ve sonrasında daha önce tanımlanmış olan statik periyot boyunca (örneğin 3 s) bu seçilmiş olan röle üzerinden veri iletimi devam etmektedir. Her bir statik periyotun bitiminde röle seçimi tekrar yapılmaktadır. Bilgisayar benzetimleri için $V = 6$ ve $N = 8$ alınmaktadır.

ERA'nın merkezinin d_{SD} 'nin ortasında olduğu kabul edilerek sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 3.4'te EE'yi maksimum yapan bir K_{avg} olduğu görülmektedir ve bu sayı küçük bir değerdir. Yani $r = 1 \text{ bit/s/Hz}$ iken $d_{SD} = 400 \text{ m}$ olduğunda optimum K_{avg} değerinin 1.6 ve $d_{SD} = 800 \text{ m}$ olduğunda 3.5 olduğu gözlenmektedir. $d_{SD} = 400 \text{ m}$ ve 800 m olduğunda optimum K_{avg} değerleri için $P_{out} = 0.2$ dolaylarında olduğu Şekil 3.4 ve 3.5'te görülmektedir. Aslında, rastgele dağıtılmış geniş-ölçekli ağlarda röle seçimi genellikle karmaşık yapıya sahiptir çünkü röleleri saptamak ve rölelere ilişkin kanal bilgisini toplamak çok fazla sayıda kontrol paketi iletimine ve eşzamanlama sorunlarına neden olmaktadır. Ancak önerilen yöntem makul sayılabilecek bir karmaşıklık seviyesine sahiptir çünkü ERA'nın tanımlanması ile



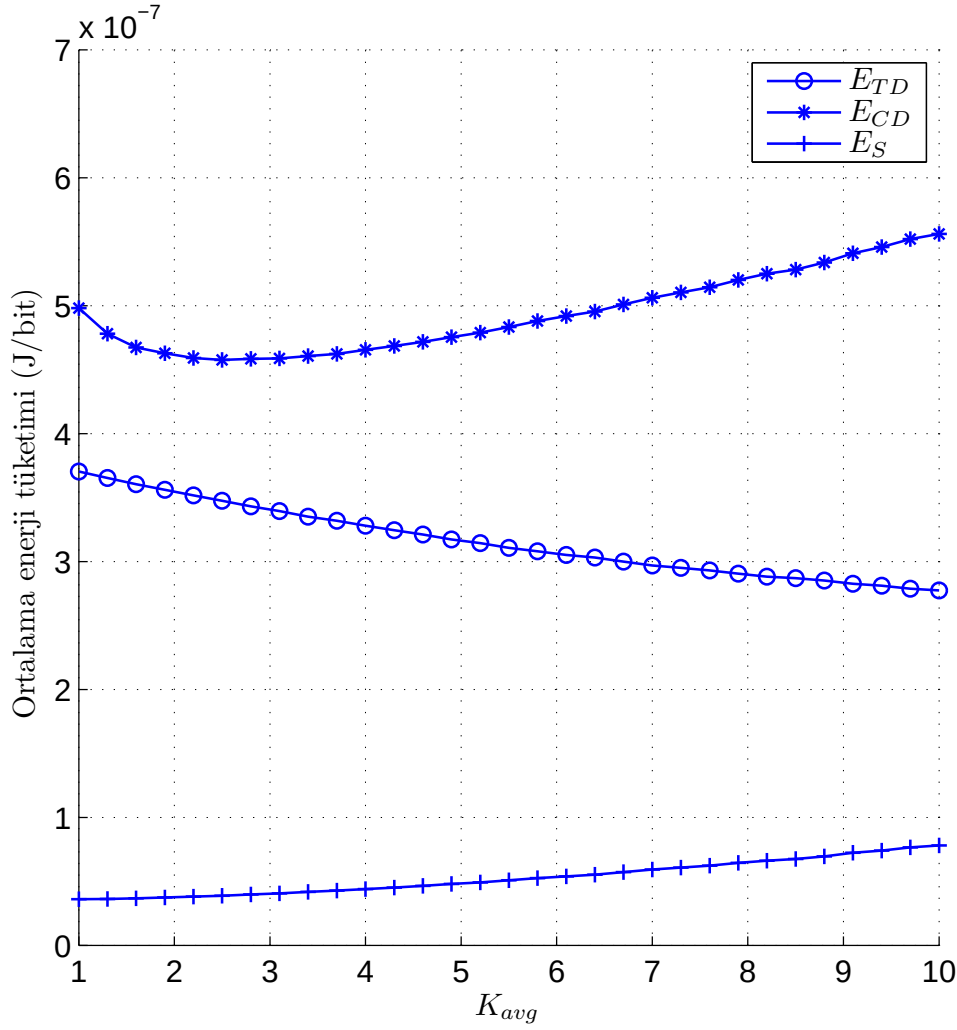
Şekil 3.4 : Enerji verimliliğinin ERA'nın içindeki ortalama röle sayısına bağlı değişimi ($r = 1$).

röle seçimine katılacak röle sayısı ciddi bir oranda azaltılmaktadır ve bilgisayar benzetimleri ile optimum K_{avg} 'ın oldukça küçük değerler olduğu gözlemlenmektedir. Bu sayede zaman aralığı atama sayısı ve iletilen kontrol paketi sayısı düşük değerlerde tutulabilmektedir. Örneğin $d_{SD} = 400$ m ve 800 m olduğunda, sırasıyla, başlangıç aşamasında zaman aralıklarının atanması için gerekli ortalama zaman aralığı sayısı (L_{avg}), 7 ve 8 olmakta, aynı zamanda röle seçimi aşamasında her bir veri paketi için iletilen kontrol paketi sayısı da 3.5 ve 3.6 olmaktadır. Bununla birlikte, röle seçimi aşamasında rölelere atanan ortalama zaman aralığı sayısı da sırasıyla 1.6 ve 2.7 olmaktadır. Bütün bu değerler göstermektedir ki önerilen yöntem merkezi bir yapıya sahip olmasına rağmen oldukça sınırlı bir sayıda kontrol paketi iletimine ve zaman aralığı atamasına gereksinim duymaktadır ve bunlar önerilen yöntemin düşük bir karmaşıklığa sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.5 : Servis dışı kalma olasılığının ERA'nın içindeki ortalama röle sayısına bağlı değişimi ($r = 1$).

Şekil 3.6'da başarılı iletilen bir bit için ortalama iletim enerjisi (E_{TD}), veri iletimi sırasında devrede harcanan ortalama enerji (E_{CD}) ve kontrol paketlerinin iletimi sırasında harcanan ortalama enerji (E_S) incelenmektedir. Daha önce tanımlanan E_{td} ve E_{cd} bir veri paketi iletimi için (başarılı veya başarısız oluşuna bakmaksızın) harcanan ortalama enerjileri ifade ederken buradaki E_{TD} ve E_{CD} ise başarılı iletilen bir bit için harcanan güçleri ifade etmektedir. E_S , hem kontrol paketleri için iletim gücünü hem de kontrol paketlerinin iletimi sırasında devrelerde harcanan güçü içermektedir. Şekil 3.6'da K_{avg} 'ın artışına bağlı olarak E_{TD} düzenli olarak azalmakta ve E_S ise düzenli olarak artmaktadır çünkü K_{avg} 'ın artması daha iyi bir röle seçme olasılığını artırmakta ve bu da iletim için gerekli ortalama gücü azaltmaktadır ama aynı zamanda daha fazla kontrol paketi iletimine neden olduğu için E_S 'yi artırmaktadır.

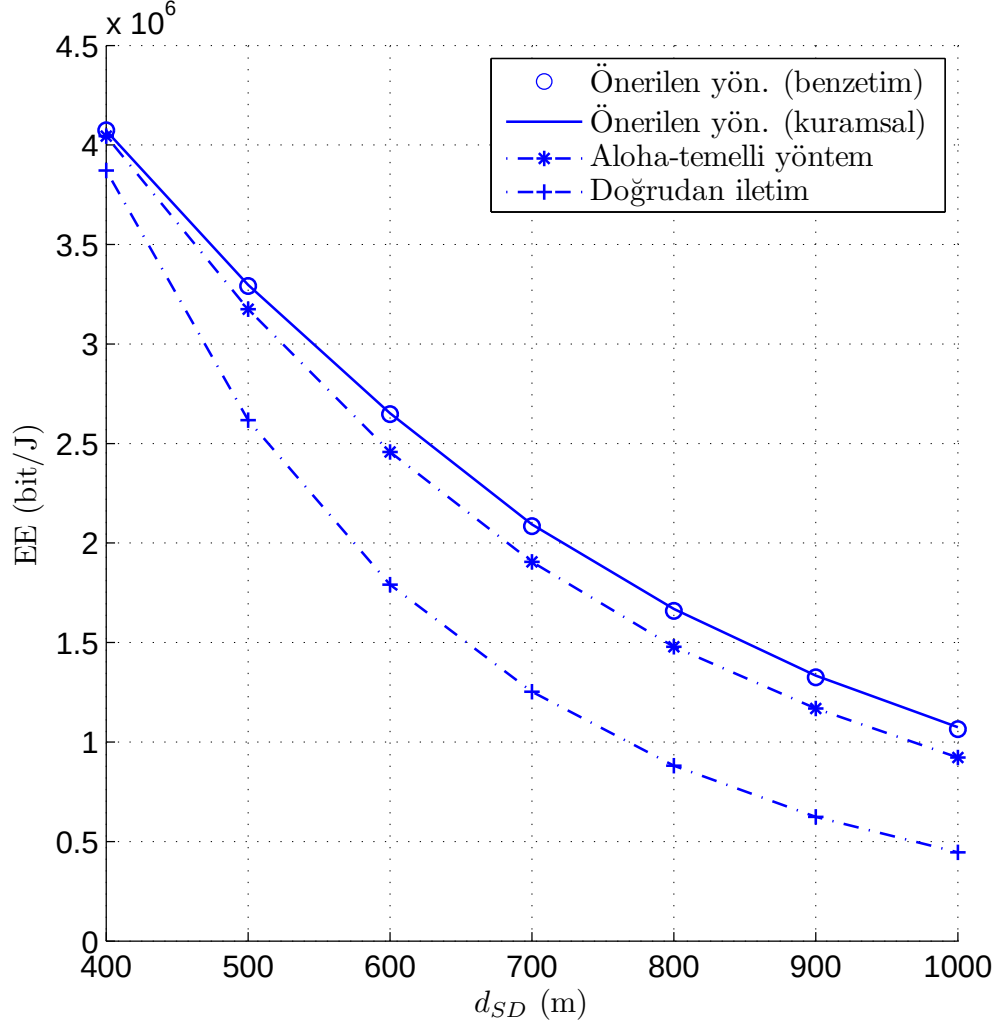


Şekil 3.6 : E_{TD} , E_{CD} ve E_S 'nin ERA'nın içindeki ortalama röle sayısına bağlı değişimi ($r = 1$ ve $d_{SD} = 800$ m).

E_{CD} 'nin davranışı incelemeye değerdir çünkü belirli bir noktaya kadar düşmekte ama sonrasında düzenli olarak artmaktadır. Bunun nedeni K_{avg} düşük olduğunda sistemin servis dışı kalma olasılığı artmaktadır ve sistem servis dışı olduğunda bütün etkin gezgin aygıtlar bir statik periyot boyunca bekleyip paketi yeniden göndermeye çalışmaktadır ve bu da E_{CD} yi artırmaktadır. Bu yüzden K_{avg} nin artması ile ilk etapta E_{CD} azalmaktadır. Ama K_{avg} artmaya devam ettiğinde rölelerin devrelerinde harcanan güç servis dışı kalma olasılığındaki iyileşmeye kıyasla baskın geldiği için E_{CD} artmaktadır. Şekil 3.6'dan çıkarılabilecek diğer önemli bir sonuç da devrede harcanan gücün toplam harcanan gücün önemli bir kısmını oluşturuyor olmasıdır. Örneğin $d_{SD} = 800$ m için optimum olan $K_{avg} = 3.5$ değeri için bakıldığında, E_{TD} , E_{CD} ve E_S toplam harcanan enerjinin sırasıyla %55, %35 ve %5'ini oluşturmaktadır. Diğer bir deyişle toplam harcanan enerjinin büyük bir kısmını devrelerde harcanan

enerji oluşturmaktadır. Bundan dolayı devrelerde harcanan enerjinin ihmal edildiği röle seçme yöntemlerinin yanıltıcı sonuçlar vermesi kaçınılmazdır.

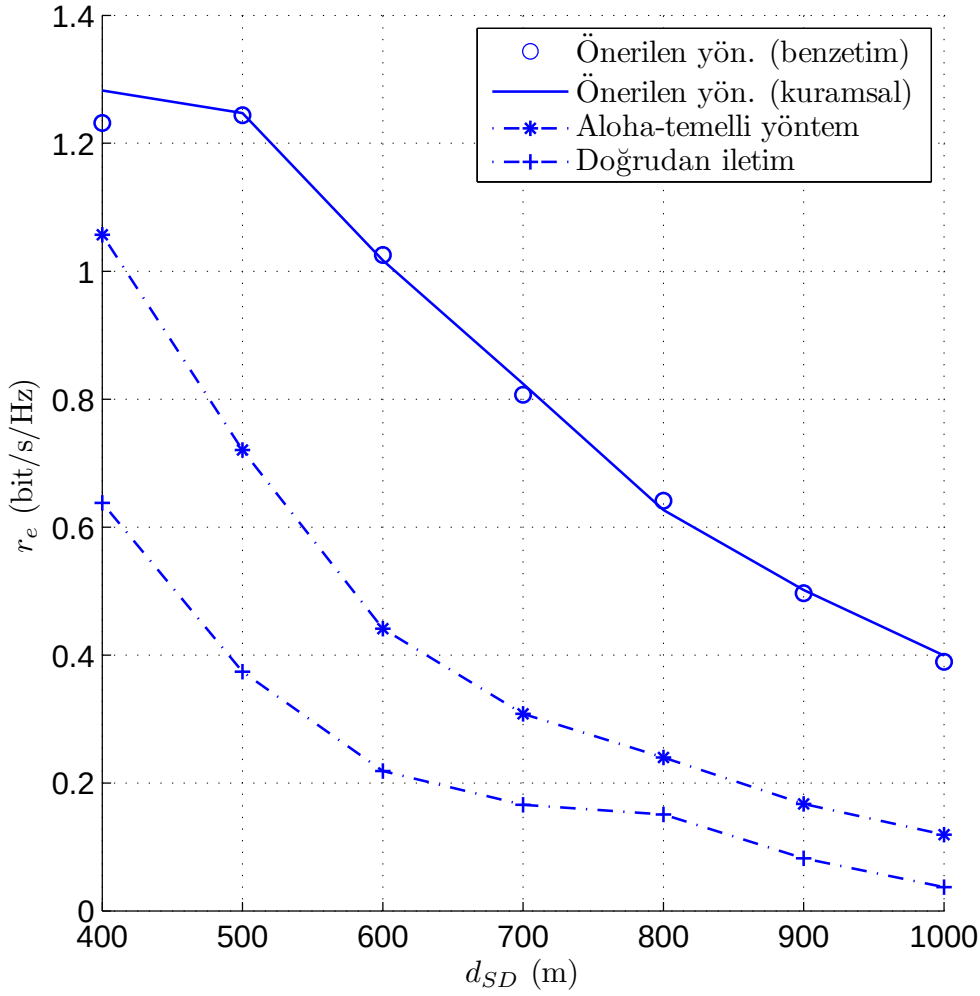
Üç iletişim yöntemi (önerilen, Aloha-temelli röle seçme ve doğrudan iletim yöntemleri) EE ve r_e bakımından karşılaştırılmaktadır. Öncelikle d_{SD} 'nin söz edilen üç yöntemin EE ve r_e başarımları üzerindeki etkisi Şekil 3.7 ve 3.8'de incelenmektedir. d_{SD} küçük iken (400 m) karşılaştırılan üç yöntemin EE başarımları birbirine oldukça



Şekil 3.7 : Karşılaştırılan üç yöntemin enerji verimliliklerinin d_{SD} 'ye bağlı olarak değişimi.

yakın olmakla birlikte r_e açısından önerilen yöntem Aloha-temelli röle seçmeye kıyasla %30, doğrudan iletişime kıyasla %100 daha fazla etkin hıza sahiptir. $d_{SD}=1000$ m iken EE açısından önerilen yöntem Aloha-temelli röle seçmeye kıyasla %15, doğrudan iletişime kıyasla %120 daha verimlidir ve r_e açısından önerilen yöntem Aloha-temelli röle seçmeye kıyasla %300, doğrudan iletişime kıyasla %1000 daha

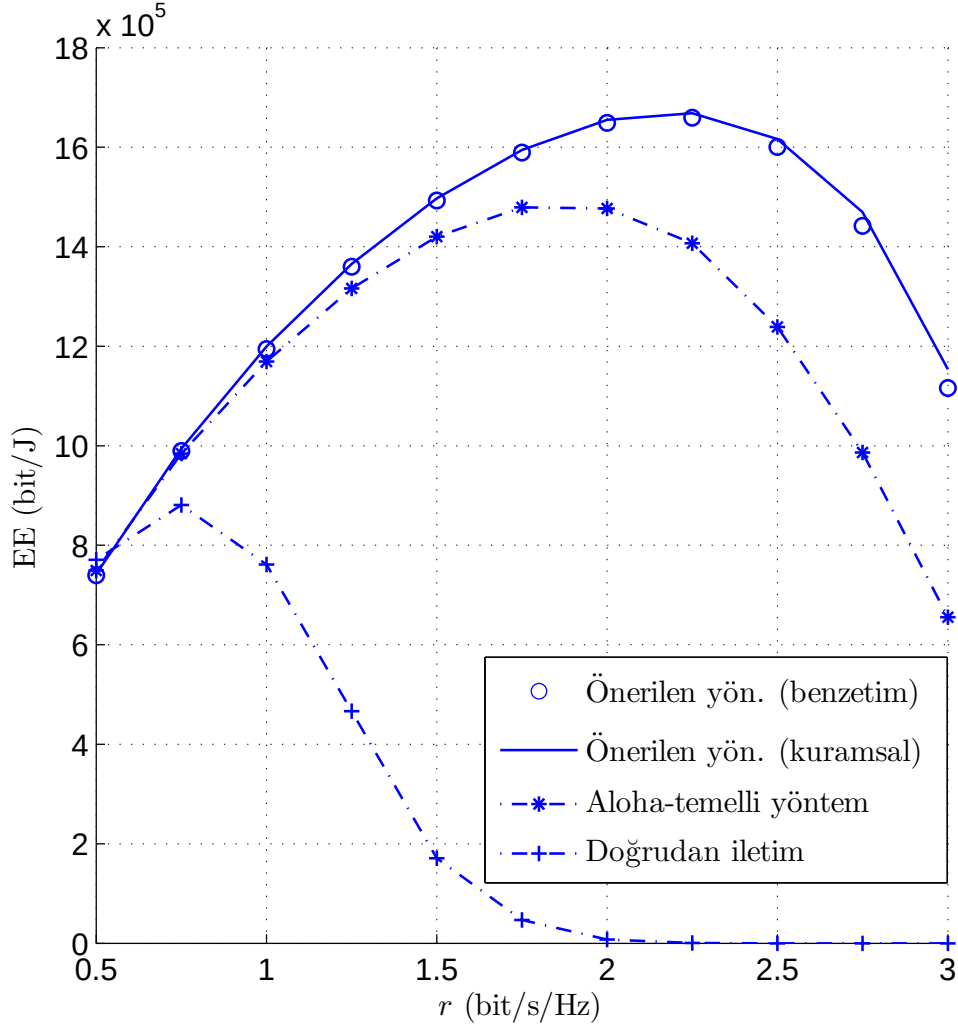
fazla etkin hıza sahiptir. Yani uzun mesafeler için referans modeller veri iletimi açısından başarısız olurken önerilen model hala veri iletimini sağlayabilmektedir. Yol-kaybının fazla olduğu durumlarda rölelerin servis dışı kalma olasılıkları arttığı için burada önerilen ve seçimi anlık kanal bilgisine dayalı olarak yapan yöntemin referans modellere kıyasla EE kazancı artmaktadır. Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta da d_{SD} arttıkça, ERA'nın optimum yüzey alanı dolayısıyla K_{avg} da artmaktadır ve bu da EE için önemli olan servis dışı kalma olasılığını istenilen seviyede tutmaktadır.



Şekil 3.8 : Karşılaştırılan üç yöntemin etkin veri hızlarının d_{SD} 'ye bağlı olarak değişimi.

Son olarak EE ve r_e 'nin veri iletim hızı ile ilişkisi incelenmektedir. r , kaynak ile röle veya röle ile hedef arasındaki yola ilişkin veri hızı olarak tanımlanmakta olduğu için kaynak-hedef arasındaki veri hızı $r/2$ olarak ifade edilmektedir. Ancak doğrudan iletim için kaynak-hedef arasındaki veri hızı r dir. Veri hızındaki değişim EE ve r_e

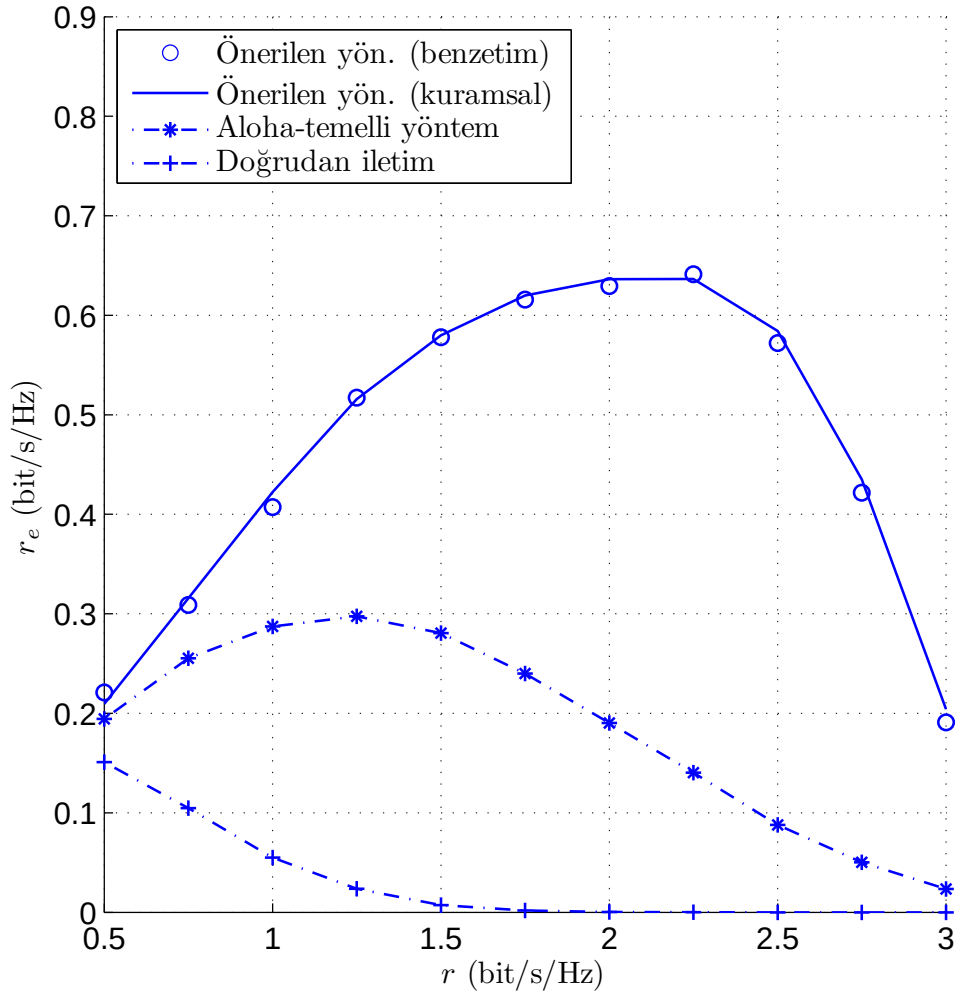
üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir çünkü veri hızını artırmak, bir paketin iletim süresini kısaltarak enerji tüketimi ve r_e üzerinde olumlu bir etki yaparken, paketin başarılı iletilme olasılığını düşürmektedir. Bundan dolayı EE ve r_e açısından optimum r 'nin ne olduğu belirlenmesi gereken önemli bir konudur. Öncelikle, EE'nin veri hızına nasıl bağlı olduğu Şekil 3.9'da incelenmektedir. Ulaşılabildikleri maksimum EE açısından



Şekil 3.9 : Karşılaştırılan üç yöntemin enerji verimliliklerinin veri hızına bağlı olarak değişimi ($d_{SD} = 800$ m).

önerilen yöntemin Aloha-temelli röle seçmeye kıyasla %10, doğrudan iletişime kıyasla %80 daha verimli olduğu görülmektedir. Önerilen yöntemin etkin veri hızı bakımından daha önemli kazanımlara sahip olduğu Şekil 3.10'da gösterilmektedir.

EE'yi maksimum yapan veri hızlarındaki r_e ler karşılaştırıldığında önerilen yöntemin Aloha-temelli röle seçmeye kıyasla %150, doğrudan iletişime kıyasla %500 daha hızlı olduğu görülmektedir. Bu sonuç oldukça önemlidir çünkü önerilen yöntemin daha az



Şekil 3.10 : Karşılaştırılan üç yöntemin etkin veri hızlarının veri hızına bağlı olarak değişimi ($d_{SD} = 800$ m).

enerjiyle çok daha hızlı bir şekilde veri iletebildiği ortaya çıkmaktadır. Aloha-temelli röle seçme yöntemine göre elde edilen bu kazancın önemli bir nedeni önerilen yöntemin konumları esas alınarak belirlenmiş sınırlı sayıdaki rölenin anlık kanal bilgisine bağlı olarak seçim yapmasıdır. Bu sayede çeşitleme kazancı artmaktadır ve bu da servis dışı kalma olasılığını azaltarak EE'yi artırmaktadır. Ancak Aloha-temelli röle seçme yöntemi anlık kanal bilgisine dayalı seçim yapmadığı için çeşitleme kazancı elde edememektedir. Burada sınırlı sayıdaki rölenin anlık kanal bilgisine dayalı seçim yapmanın EE açısından önemli bir avantaja sahip olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, önerilen yöntemin referans yöntemlerden hem EE hem de r_e açısından çok daha iyi olduğu bilgisayar benzetimleri ile ortaya konmaktadır. Önerilen yöntemin bu üstünlüğü elde etmesine karşılık verilen ödün karmaşıklığın referans yöntemlere

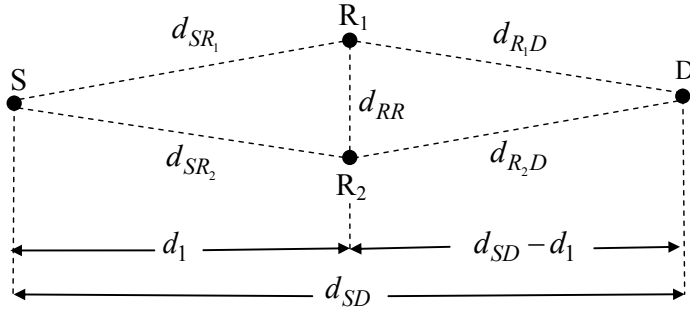
kıyasla daha fazla olmasıdır. Çünkü Aloha-temelli röle seçme yönteminde seçilen röle ile statik periyot boyunca iletim yapılırken önerilen yöntemde her paket iletimi için röle seçimi yapılmaktadır. Ancak, kontrol paketlerinin iletimi, devrelerde harcanan enerji gibi enerji tüketimine neden olan kaynakların tamamı hesaba katıldığı için EE açısından adil bir karşılaştırma yapılmaktadır. Son olarak altının çizilmesi gereken bir nokta röle seçme yöntemleri incelenirken EE ile r_e 'nin birlikte incelenmesinin gerekliliğidir. Örneğin burada Aloha-temelli röle seçme yönteminde EE'yi artırmak için iletim kanalı izlenerek kanal gücü yalnızca belirli bir eşik değerin üzerindeyse iletim yapılmaktadır, ancak bu durum r_e 'yi düşürmektedir. Bu yüzden yalnızca EE'lerin karşılaştırılması yeterli olmayacaktır. Örnek olarak Şekil 3.9'da gösterildiği gibi önerilen yöntem Aloha-temelli yöntemden %10 daha yüksek EE'ye sahipken, Şekil 3.9'da %150 daha yüksek r_e 'ye sahip olmaktadır. Bu nedenle EE ve r_e beraber ele alındığında önerilen yöntemin üstünlüğü açıkça ortaya çıkmaktadır.

4. İKİ ATLAMALI VE İKİ RÖLELİ AĞLAR İÇİN ENERJİ VERİMLİLİKLİ İLETİM YÖNTEMİ

4.1 Giriş

Bu bölümde, iki atlamalı ve iki röleli ağlar için enerji verimliliğini artıracak bir iletim yöntemi önerilmektedir. Çöz-ve-aktar tekniğiyle çalışan iki rölenin birbirine yakın olduğu ve kendi aralarında iletişim kurabildiği varsayılmaktadır. Bir noktadan başka bir noktaya iletimde paketin hangi hızda iletildiği enerji verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır çünkü veri hızını artırmak, bir paketin iletim süresini kısaltarak enerji tüketimini azaltmakta ama paketin başarılı iletilme olasılığını düşürmektedir. Bu nedenle her ağ modeli için EE'yi maksimum yapan optimum veri hızının bulunması araştırmaya değecek bir konudur. Bu çalışmada kaynak-röle, röleler arası ve röle-hedef arasındaki iletim için veri hızı ayrı ayrı tanımlanmakta ve EE'yi maksimum yapan veri hızları her bir bağlantı için bulunmaktadır.

Önerilen yöntemde, kaynaktan gelen veri paketini rölelerden birisi hatalı olarak çözerse diğer röle röleler arası bağlantının yardımıyla paketi hatalı çözen röleye iletmektedir. Bu sayede iki röle dağıtılmış uzay-zaman blok kodlamanın özel bir durumu olan dağıtılmış Alamouti kodlama [59] ile paketi hedefe iletmeye olanağını elde etmektedir. Dağıtılmış Alamouti kodlama ile iletildiğinde çeşitleme kazancı elde edilmekte bu da servis dışı kalma olasılığını düşürmektedir. EE'nin “birim enerji ile başarılı iletilen bit sayısı” olarak tanımlanması nedeni ile servis dışı kalma olasılığını düşüren yöntemlerin EE açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Elde edilen benzetim sonuçları bu düşüncenin haklılığını ortaya koymakta ve önerilen yöntemin literatürde bu ağlar için önerilmiş olan ardışık iletim (SR: Successive Relaying) yöntemiyle [61] karşılaştırıldığında hem EE açısından hem de etkin veri hızı açısından çok daha iyi bir başarıma sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.1 : Ele alınan iki atlamalı iki röleli ağ modeli.

4.2 Sistem Modeli

Kaynak (S) ile hedef (D) arasında doğrudan bağlantının olmadığı ve iletişimin iki röle (R_1 ve R_2) aracılığıyla sağlandığı Şekil 4.1’de gösterilen iki atlamalı ağ modeli göz önüne alınmaktadır. Rölelerin DF tekniği ile çalıştığı varsayılmaktadır. Her verici iletim yaptığı bağlantıya ilişkin kanalın yalnızca ortalama ve varyansını bilmekte ama anlık kanal bilgisine sahip olamamaktadır. Buna karşılık, bütün alıcılar anlık kanal bilgisine sahiptir. Rölelerin birbirine yakın olduğu ve röleler arasında iletimi mümkün kılan bir bağlantının olduğu varsayılmaktadır. Röleler, kaynak-hedef arasındaki yola göre simetrik olarak yerleştiği düşünülmektedir. Yani $d_{SR} = d_{SR_1} = d_{SR_2}$ ve $d_{RD} = d_{R_1D} = d_{R_2D}$ biçiminde tanımlanmaktadır.

İletişim üç aşamada yapılmaktadır:

1. Kaynak-röle iletimi: S, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ biçiminde tanımlanan N simgeli bir veri paketini D’ye göndermek istediğinde, veri paketini öncelikle R_1 ve R_2 ye göndermektedir.
2. Röleler arası iletim: Röleler DF tekniğini uygulamakta ve kaynaktan gönderilen paketi doğru çözüp çözmediğini diğer röleye bildirmektedir. Üç farklı olasılık vardır: (a) Eğer her iki röle de paketi doğru çözdülerse, doğrudan röle-hedef veri iletimi başlamaktadır. (b) Rölelerden yalnızca bir tanesi kaynaktan aldığı paketi doğru olarak çözdüyse, doğru çözen röle diğer röleye veri paketini yüksek bir hızda iletmektedir ve sonrasında röle-hedef veri iletimi başlamaktadır. (c) Her iki röle de paketi doğru olarak çözemediyse 3. Aşamaya geçilememekte ve paket kaybolmaktadır.

3. Röle-hedef iletimi: Eğer her iki röle de doğru çözülmüş veri paketine sahipse iki röle birlikte dağıtılmış Alamouti kodu yardımı ile paketi hedefe iletmektedir. Eğer tek bir röle doğru çözdüyse, yalnızca o röle paketi hedefe iletmektedir.

Dağıtılmış Alamouti kodunda [59] R_1 ve R_2 röleleri eşzamanlı olarak, sırasıyla, $\mathbf{x}_1 = (x_1, -x_2^*, x_3, -x_4^*, \dots, x_{N-1}^*, x_N)$ ve $\mathbf{x}_2 = (x_2, x_1^*, x_4, x_3^*, \dots, x_N, x_{N-1}^*)$ paketlerini iletmektedir. Burada $i \rightarrow j$ bağlantısına ilişkin erişilebilir maksimum veri hızı

$$C_{ij} = \log_2 \left(1 + \frac{P_t |h_{ij}|^2}{\sigma^2 d_{ij}^n} \right) \quad (4.1)$$

biçiminde verilmektedir. Burada ij çiftinin alabileceği değerler SR ($S \rightarrow R_1$ veya $S \rightarrow R_2$ bağlantıları için), RR ($R_1 \rightarrow R_2$ veya $R_2 \rightarrow R_1$ bağlantıları için) veya RD ($R_1 \rightarrow D$ veya $R_2 \rightarrow D$ bağlantıları için) çiftlerinden biridir. P_t vericinin iletim gücünü göstermekte ve kaynak ve röleler için eşit olduğu kabul edilmektedir, h_{ij} ortalaması 0 standart sapması 1 olan karmaşık Gauss rastlantı değişkeni, d_{ij} i ile j arasındaki uzaklık, n yol kaybı sabitidir. $\sigma^2 = BN_0 N_f G_1$ biçiminde tanımlanmaktadır ve burada B bant genişliği N_0 gürültünün güç spektral yoğunluğu, N_f alıcı gürültü eşdeğeri (receiver noise figure), G_1 1 m'deki kazanç çarpanıdır. Rölelerden hedefe olan dağıtılmış Alamouti kodunun kullanıldığı çoklu erişim kanalı için erişilebilir maksimum hız ise

$$C_{RRD} = \log_2 \left(1 + \frac{P_t (|h_{R_1 D}|^2 + |h_{R_2 D}|^2)}{\sigma^2 d_{RD}^n} \right) \quad (4.2)$$

biçiminde verilmektedir.

4.3 Enerji Verimliliği ve Etkin Veri Hızı Analizi

Bu çalışmanın en önemli katkısı iletimin her bir aşaması için r_1 , r_2 ve r_3 (bit/s/Hz) olmak üzere farklı hedef veri hızları (target data rate) tanımlamak ve EE'yi maksimum yapacak biçimde bu hızları uyarlamaktır. Yani $r_{SR} = r_1$, $r_{RR} = r_2$ ve $r_{RD} = r_{RRD} = r_3$ biçiminde tanımlanmaktadır. Diğer yandan sistemin servis dışı kalma olasılığı EE ve r_e üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bütünüyle tanımlanan hedef veri hızlarına bağlıdır. Bundan dolayı sistemin servis dışı kalma olasılığının öncelikli olarak bulunması gerekmektedir.

4.3.1 Servis dışı kalma olasılığı

Herhangi bir bağlantı için servis dışı kalma olasılığı P_{ij} erişilebilir maksimum veri hızı C_i nin istenen iletim hızı r_{ij} den düşük olma olasılığıdır ve $P_{ij} = \Pr(C_{ij} < r_{ij})$ biçiminde verilmektedir. Tek yönlü bağlantılar için servis dışı kalma olasılığı

$$P_{ij} = \Pr \left\{ |h_{ij}|^2 < \frac{(2^{r_{ij}} - 1) \sigma^2 d_{ij}^n}{P_t} \right\} \quad (4.3)$$

$$= 1 - e^{-\frac{(2^{r_{ij}} - 1) \sigma^2 d_{ij}^n}{P_t}}$$

biçiminde, çoklu erişim kanalı için ise

$$P_{RRD} = \Pr \left\{ |h_{R_1D}|^2 + |h_{R_2D}|^2 < \frac{(2^{r_3} - 1) \sigma^2 d_{RD}^n}{P_t} \right\} \quad (4.4)$$

biçiminde verilmektedir. $|h_{R_1D}|^2$ ve $|h_{R_2D}|^2$ aynı parametrelere sahip üstel dağılımlı olmaları nedeni ile toplamı Erlang-2 dağılımlıdır [70]. Bu durumda

$$P_{RRD} = 1 - (1 + (2^{r_3} - 1) \sigma^2 d_{RD}^n / P_t) e^{-\frac{(2^{r_3} - 1) \sigma^2 d_{RD}^n}{P_t}}. \quad (4.5)$$

eşitliği elde edilmektedir. Sonuç olarak sistemin toplam servis dışı kalma olasılığı

$$P_{out} = 1 - ((1 - P_{SR})^2 (1 - P_{RRD}) + 2P_{SR}(1 - P_{SR})$$

$$[(1 - P_{RR})(1 - P_{RRD}) + P_{RR}(1 - P_{RD})]). \quad (4.6)$$

biçiminde elde edilmektedir. Eşitliğin sağındaki ilk terim olan $((1 - P_{SR})^2 (1 - P_{RRD}))$ terimi iki rölenin ve hedefin paketi doğru çözme olasılıklarıdır. İkinci terim $(2P_{SR}(1 - P_{SR}))$ rölelerden yalnızca birisinin doğru çözme olasılığıdır ve bu durumda hedefe başarılı bir iletimin yapılabilmesi için iki farklı olasılık vardır: ya röleler arası iletişim sayesinde her iki röle de doğru çözülmüş pakete sahip olur ve iki röle birden iletim yapar D de doğru olarak çözer veya rölelerden yalnızca birisi doğru çözülmüş pakete sahip olur ve o rölenin ilettiği paketi D doğru olarak çözer. İlkinin olma olasılığı $(1 - P_{RR})(1 - P_{RRD})$ ve ikincinin olma olasılığı ise $P_{RR}(1 - P_{RD})$ biçimindedir.

4.3.2 Enerji verimliliği

Enerji verimliliği “Birim enerji başına başarılı iletilen bit sayısı” olarak tanımlanmakta ve

$$EE = L_d(1 - P_{out})/E_T \quad (4.7)$$

biçiminde verilmektedir. Burada L_d bit cinsinden paket uzunluğudur. E_T bir paketin iletimi için harcanan enerjidir ve $E_T = E_1 + E_2 + E_3$ eşitliği ile verilmektedir, burada

E_1 , E_2 ve E_3 , sırasıyla 1., 2. ve 3. aşamalarda harcanan enerjileri göstermektedir. Her bir aşama için farklı bir veri hızı tanımlandığı için her aşamadaki paket iletiminin süresi de farklıdır. i inci aşamada bir veri paketinin iletimi için gerekli süre ($T_i = L/(Br_i)$, $i = 1, 2, 3$) eşitliği ile verilmektedir. İlk aşamada harcanan ortalama enerji

$$E_1 = (P_t/\alpha + 3P_c)T_1 \quad (4.8)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Burada α yükselticinin verimliliği, P_c alıcı veya verici durumundaki aygıtın devrelerinde harcanan gücüdür. İlk aşamada S paketi iletmekte ve röleler almaktadır, bundan dolayı 3 gezgin aygıt etkin moddadır yani alıcı veya verici modundadır.

İkinci aşamada harcanan ortalama enerji

$$E_2 = 2P_{SR}(1 - P_{SR})(P_t/\alpha + 2P_c)T_2. \quad (4.9)$$

biçiminde verilmektedir. Röleler arası iletişim ancak rölelerden birisi kaynağın ilettiği paketi doğru olarak diğeri de hatalı olarak çözdüğünde gerçekleşmektedir ve bundan dolayı (4.9)'da $2P_{SR}(1 - P_{SR})$ olasılığı çarpan olarak gelmektedir.

Son olarak, üçüncü aşamada harcanan ortalama enerji

$$E_3 = \left[(1 - P_{SR})^2 + 2P_{SR}(1 - P_{SR})(1 - P_{RR}) \right] (2P_t/\alpha + 3P_c) + 2P_{SR}(1 - P_{SR})P_{RR}(P_t/\alpha + 2P_c)T_3 \quad (4.10)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada ilk terim, $[(1 - P_{SR})^2 + 2P_{SR}(1 - P_{SR})(1 - P_{RR})](2P_t/\alpha + 3P_c)$, dağıtılmış Alamouti kodlama ile iletim, ikinci terim ise tek röleli iletim sırasında harcanan enerjilerdir.

4.3.3 Etkin veri hızı

Her ağ için önemli diğer bir değişken “birim zamanda başarılı iletilen bit sayısı” olarak tanımlanan etkin veri hızıdır ve

$$r_e = \frac{L_d(1 - P_{out})}{T_{avg}} \quad (4.11)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada, T_{avg} bir paketin kaynaktan hedefe iletimi için gerekli ortalama süredir ve

$$T_{avg} = T_1 + 2P_{SR}(1 - P_{SR})T_2 + (1 - P_{SR}^2)T_3. \quad (4.12)$$

biçiminde verilmektedir. (4.12)'de T_2 ve T_3 koşullu olarak T_{avg} a eklenmektedir çünkü rölelerden sadece birisi kaynaktan aldığı paketi doğru olarak çözerse röleler arası iletişim gerçekleşmekte ve rölelerden en az birisi doğru olarak çözerse röle-hedef veri iletişimi sağlanmaktadır.

Genellikle bütün ağ modelleri için EE ve r_e önemli iki parametre olarak değerlendirilmektedir ama bazı ağlarda kullanım amaçlarına bağlı olarak bunlardan birisi öne çıkabilmektedir. Örneğin pil ömrünün önemli olduğu duyurga ağlarında (sensor networks) EE öne çıkarken, büyük miktarda verinin iletildiği hücresel ağlarda r_e öne çıkmaktadır. Ancak incelenen ağ modeli için önerilen yöntemde EE ile r_e , (4.7) ve (4.11) eşitlikleri ile verilmekte olup iletim gücü (P_t) sabit olduğunda EE ile r_e arasında kuvvetli bir ilişki vardır. Çünkü matematiksel olarak incelendiğinde

$$E_T = (P_t/\alpha + 2P_c)T_{avg} + P_c T_1 + 2P_{SR}(1 - P_{SR})(1 - P_{RR})(P_t/\alpha + P_c)T_3. \quad (4.13)$$

olduğu görülmektedir. Yani E_T büyük oranda T_{avg} a bağlı olduğu için EE'yi maksimum yapan hızlar r_e yi de maksimum değerine yaklaştırmaktadır. Bilgisayar benzetimleri ile bu ilişki daha açık ortaya konulmaktadır. Bundan dolayı EE'yi maksimum yapmak amaçlanmaktadır ve bunun için optimizasyon problemi

$$\begin{aligned} &\text{EE'yi maksimize et} \\ &\text{koşul: } r_1, r_2, r_3 \leq r_{max} \end{aligned} \quad (4.14)$$

biçiminde verilmektedir. Burada r_{max} izin verilen veya ulaşılabilen en yüksek veri hızı olarak tanımlanmaktadır. Optimizasyon problemi sayısal tekniklerle çözülmektedir.

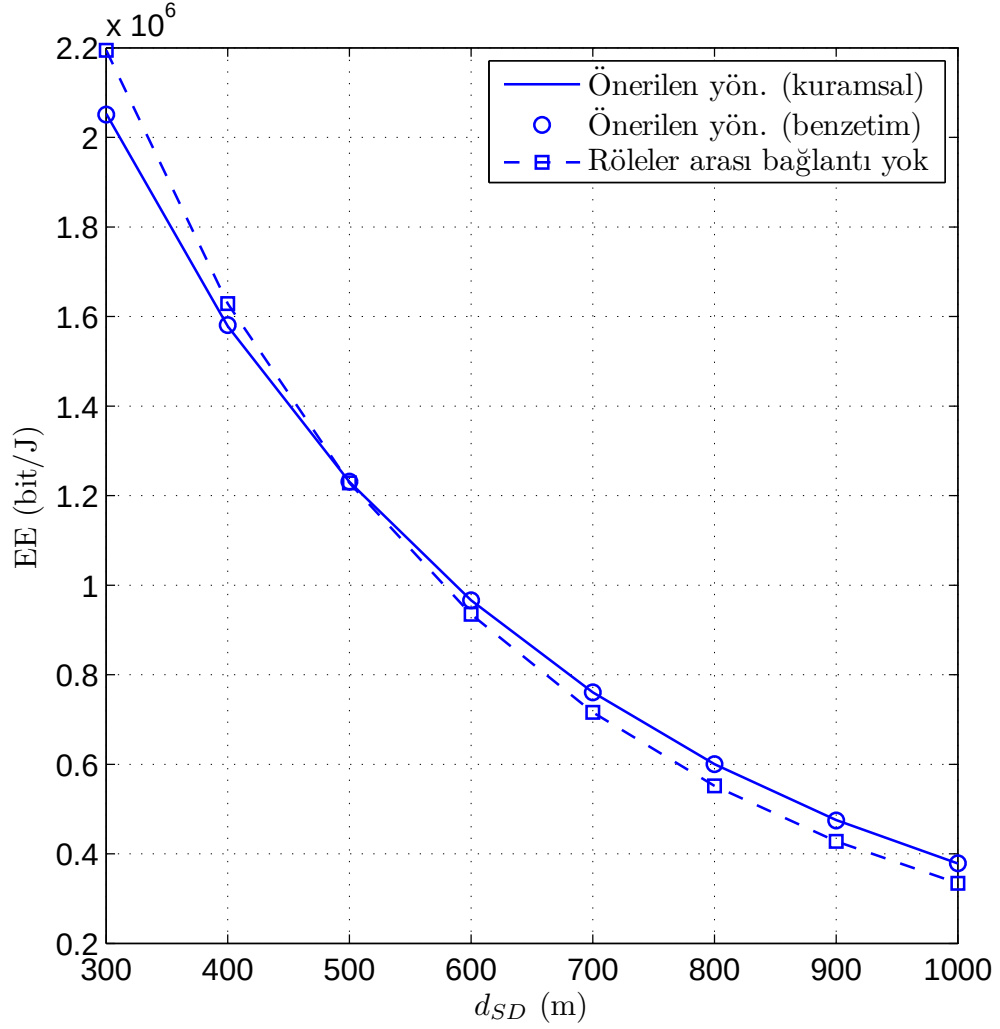
4.4 Başarım Değerlendirmesi

Telsiz ağın bilgisayar ortamında gerçekleşmesi sırasında kullanılan sistem değişkenleri Çizelge 4.1'de verilmektedir. Buradaki P_t ve P_c değerleri endüstriyel bir alıcı-verici temel alınarak belirlenmektedir [65].

Önerilen iletim tekniğinde röleler arası bağlantının olduğu ve rölelerden birisi hatalı çözdüğünde diğer rölenin çözdüğü paketi hatalı çözen röleye gönderdiği varsayılmaktadır. Öncelikle röleler arası bağlantının EE ve r_e ye etkisi sırasıyla Şekil 4.2 ve 4.3'te incelenmektedir. Bu şekillerde referans olarak kullanılan yöntemde röleler arası bağlantı yoktur ve her bir röle doğru olarak çözerse hedefe iletmekte, hatalı çözerse sessiz kalmaktadır. Önerilen yöntemin karşılaştırılan referans yöntemine

Çizelge 4.1 : Sistem değişkenleri.

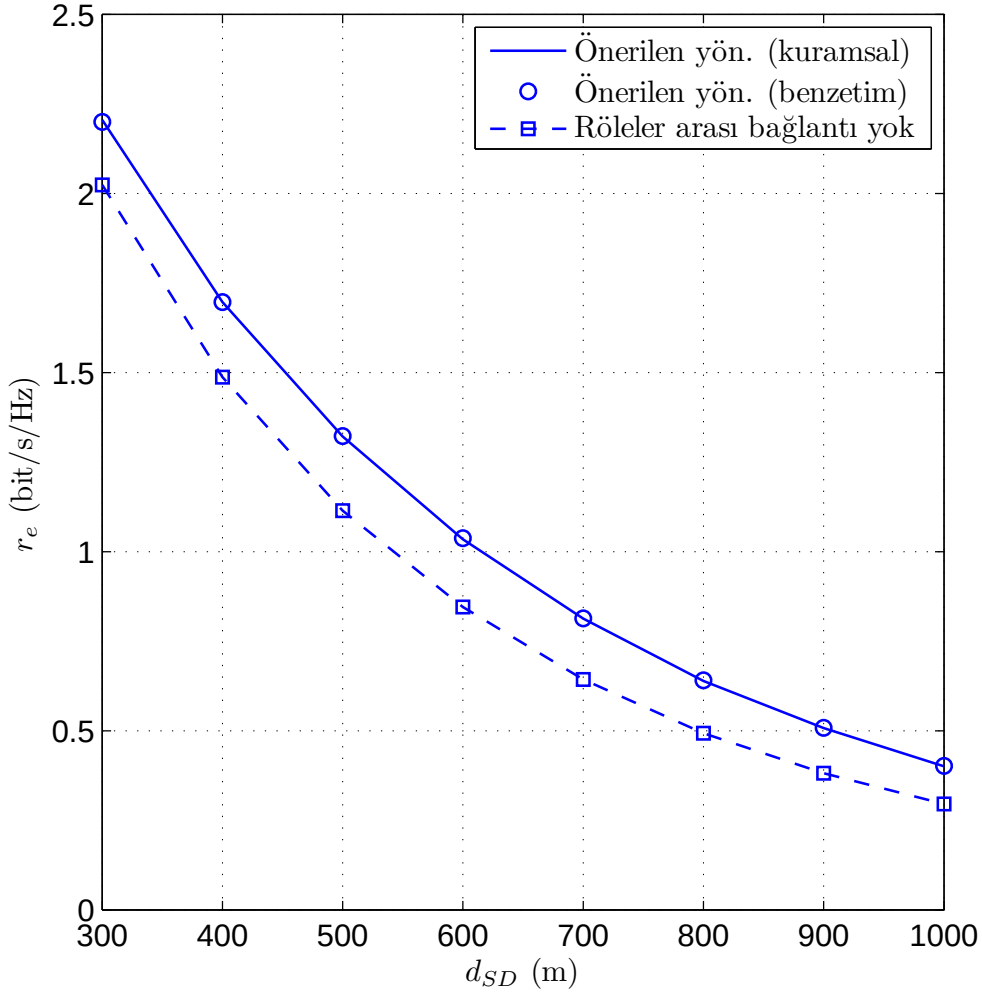
Değişken	Değeri
B	500 kHz
N_0	-174 dBm/Hz
N_f	10 dB
n	3.5
L_d	10 kbit
G_1	10^3
r_{max}	10 bit/s/Hz
α	0.35
P_c	46 mW
P_{max}	100 mW
d_{RR}/d_{SD}	1/20



Şekil 4.2 : Röleler arası bağlantının EE'ye etkisi ($d_1 = d_{SD}/2$, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).

göre EE kazancı : $(EE - EE_{ref})/EE_{ref}$ ve r_e kazancı: $(r_e - r_{e,ref})/r_{e,ref}$ oranları ile verilmektedir. Burada EE_{ref} ve $r_{e,ref}$, sırasıyla, karşılaştırılan referans yöntemin

EE ve r_e sini göstermektedir. Şekil 4.2’de d_{SD} nin küçük olduğu durumlarda röleler arası bağlantı yokken önerilen yönteme göre az da olsa daha enerji verimlilikli olduğu görülmektedir. Örneğin $d_{SD} = 300$ m iken, önerilen yöntem röleler arası bağlantının olmadığı duruma kıyasla %7 daha düşük EE’ye sahiptir. $d_{SD} = 500$ m’den sonra önerilen yöntem daha enerji verimlilikli duruma gelmekte ve $d_{SD} = 1000$ m iken önerilen yöntem %13 daha yüksek EE’ye sahip olmaktadır. r_e açısından bakıldığında ise önerilen yöntemin incelenen d_{SD} aralığında röleler arası bağlantının olmadığı duruma göre daha yüksek r_e ye sahip olduğu Şekil 4.3’te gözlemlenmektedir. Örneğin $d_{SD} = 1000$ m iken önerilen yöntem %35 daha yüksek r_e ye sahiptir.

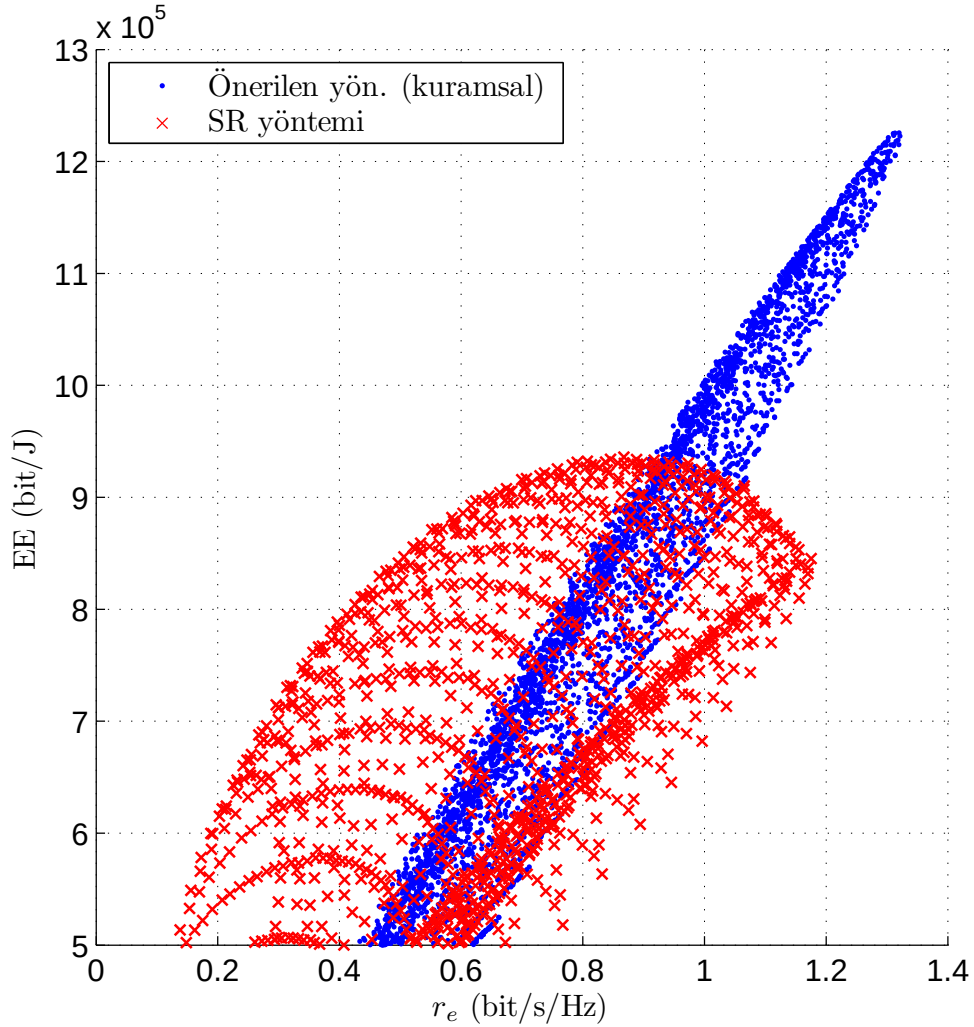


Şekil 4.3 : Röleler arası bağlantının r_e ye etkisi ($d_1 = d_{SD}/2$, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).

Önerilen iletim tekniğinin başarımının değerlendirilebilmesi için karşılaştırmalarda kullanılabilecek önemli bir referans yöntem ardışık iletim (SR: Successive Relaying)

yöntemidir [61]. SR, önerilen yöntem ile aynı ağ modeline sahiptir ve yüksek r_e ye sahip olarak bilinmektedir. SR yönteminde kaynak y_1 ve y_2 veri paketlerini, sırasıyla, R_1 ve R_2 rölelerine t ve $t + 1$ inci zaman aralıklarında göndermektedir. Daha sonra R_1 ve R_2 kaynaktan aldıkları paketleri doğru olarak çözdülerse y_1 ve y_2 paketlerini, sırasıyla, $t + 1$ ve $t + 2$ inci zaman aralıklarında hedefe göndermektedirler. SR yöntemi için kaynaktan röleye ve röleden kaynağa iletimin hızları, sırasıyla, r_{s1} ve r_{s2} ile gösterilmektedir.

Şekil 4.4'te karşılaştırılan iki yöntem için EE ve r_e nin alabileceği bütün değerler gösterilmektedir. Bu değerler, sabit bir P_t varsayımı altında veri hızları izin verilen

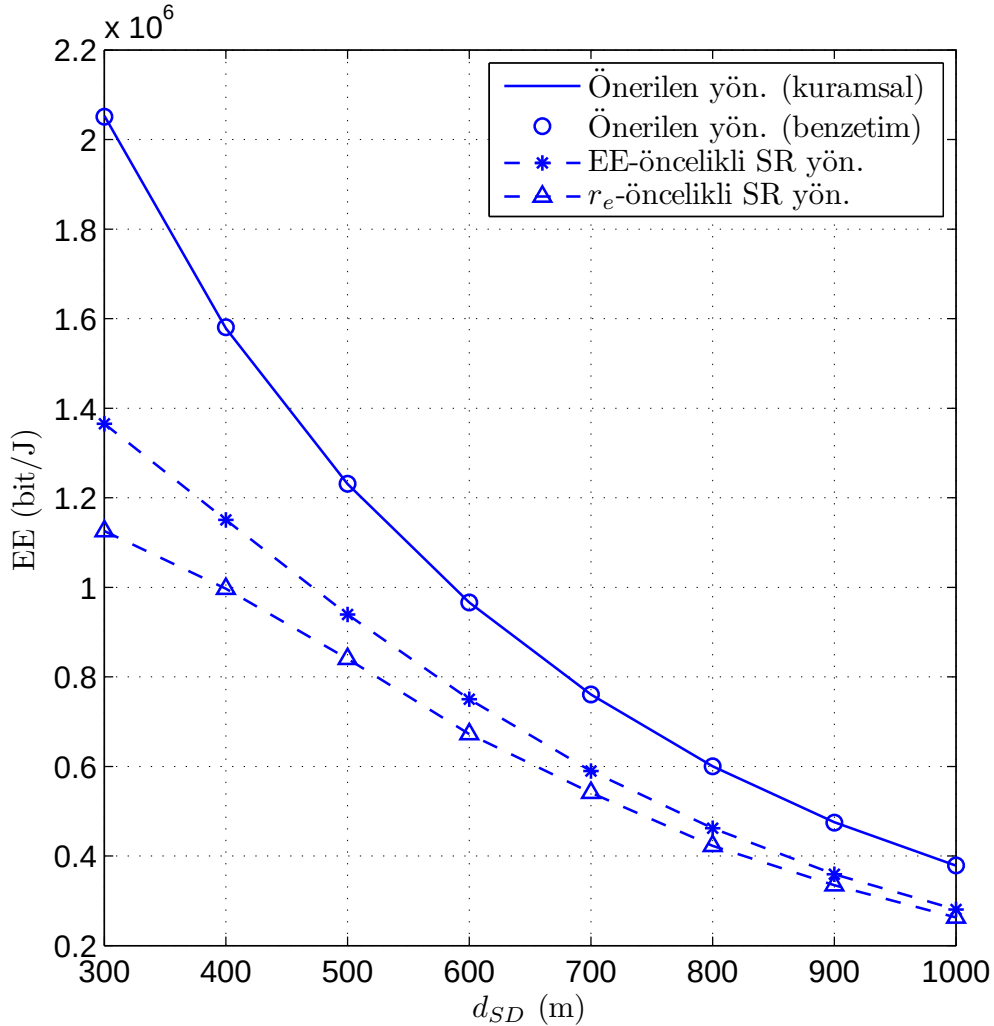


Şekil 4.4 : Sabit P_t varsayımı altında olabilecek bütün hız uyarlamaları için EE- r_e başarımlarının alabileceği değerlerin gösterimi ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = d_{SD}/2$, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).

aralık içerisinde değiştirilerek belirlenmektedir. Örneğin bu şekilde, $P_t = 100$ mW'dır ve veri hızları (r_1 , r_2 , r_3 , r_{s1} ve r_{s2}) 0.1 - 10 bit/s/Hz arasında değiştirilerek, önerilen

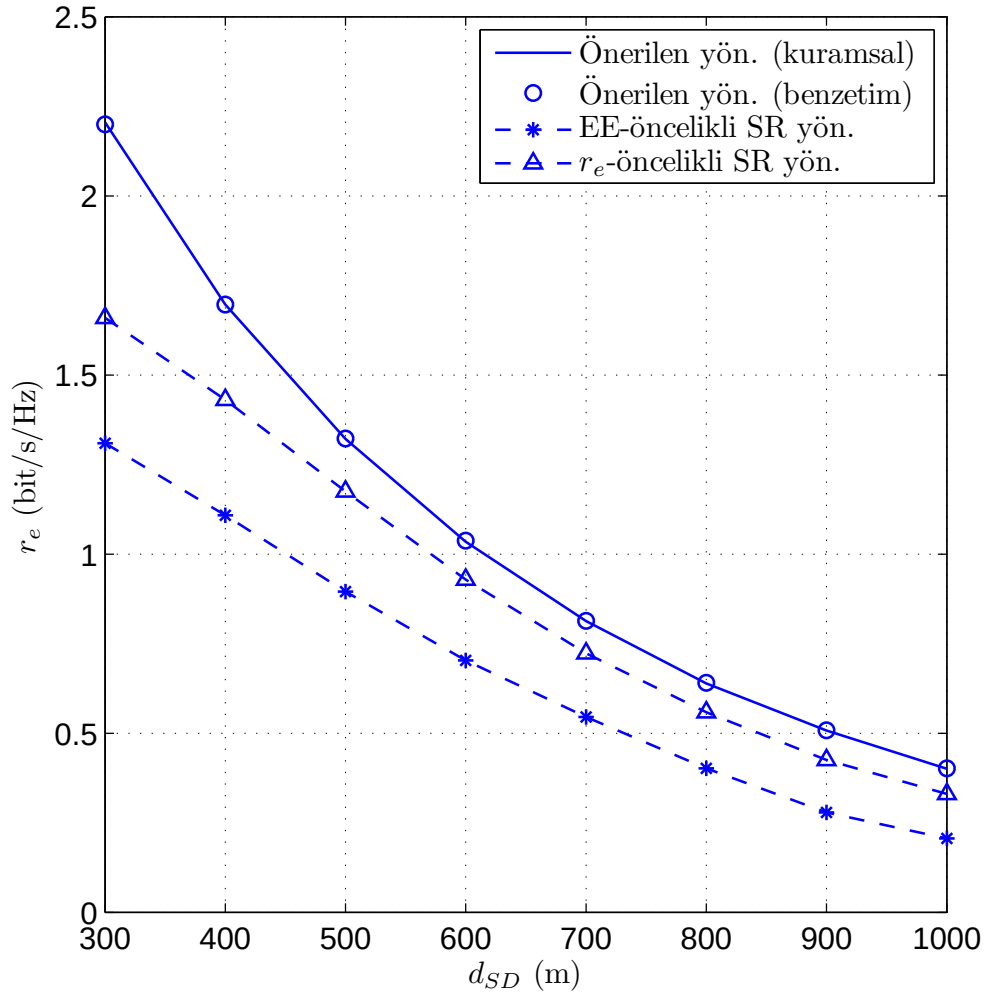
ve SR yöntemlerinin EE ve r_e si gözlemlenmektedir. Önerilen yöntem için EE ve r_e nin arasındaki doğrusal ilişki açıkça görülmektedir. Bu da EE maksimum yapıldığında r_e nin de maksimuma yaklaşacağı anlamına gelmektedir. Ancak, SR yöntemi için aynı şeyden söz etmek olası değildir çünkü EE ve r_e nin farklı hız uyarlamalarında maksimum olduğu gözlenmektedir. Bundan dolayı, SR yöntemi için iki farklı yaklaşım göz önünde bulundurulmaktadır: EE öncelikli SR yöntemi ve r_e öncelikli SR yöntemi. Bu iki yöntem için farklı optimum hız uyarlamalarının olduğu unutulmamalıdır.

Şekil 4.5 ve 4.6’da önerilen yöntemin EE ve r_e başarımları verilmektedir ve önerilen yöntem, bilgisayar benzetim eğrilerinin verildiği EE-öncelikli SR ve r_e -öncelikli SR yöntemleri ile karşılaştırılmaktadır. Bu şekillerden, önerilen yöntemin diğer referans



Şekil 4.5 : EE'nin d_{SD} ye bağlı başarımı ($d_1 = d_{SD}/2$, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).

yöntemlerden hem EE hem de r_e açısından daha başarılı olduğu açık bir biçimde

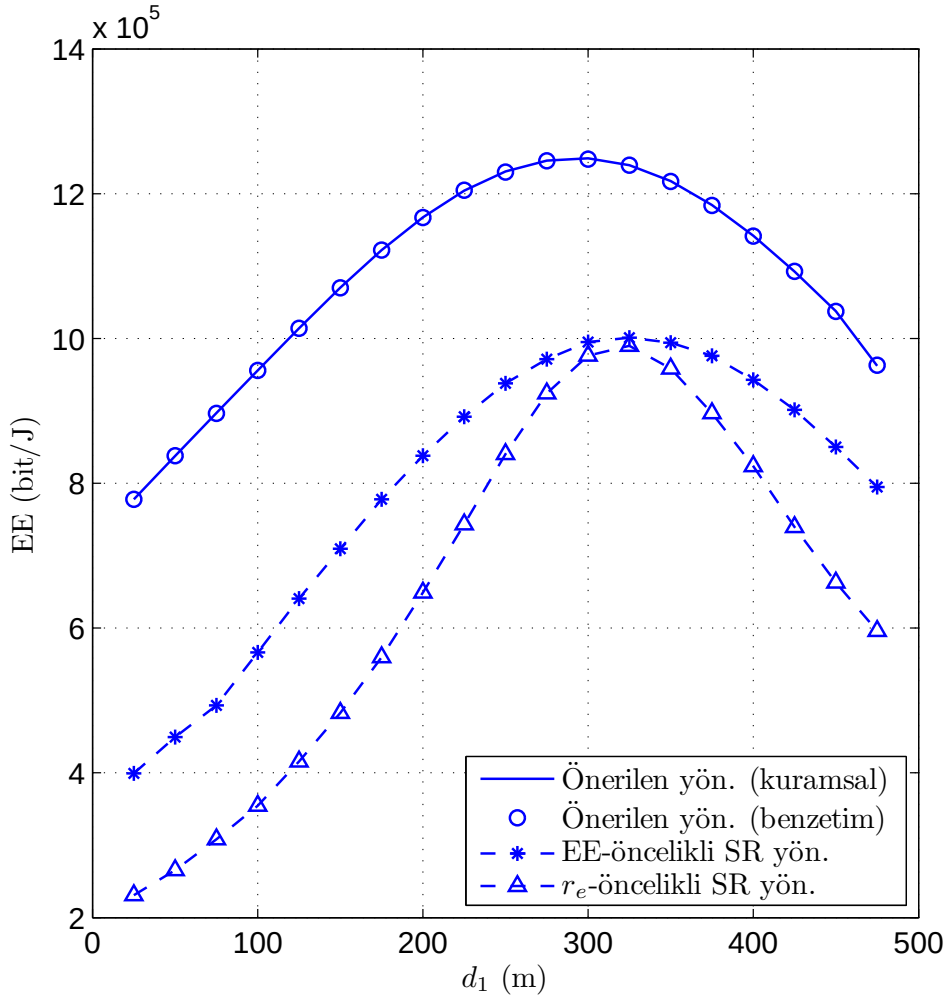


Şekil 4.6 : r_e nin d_{SD} ye bağlı başarımı ($d_1 = d_{SD}/2$, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).

görülmektedir. Ayrıntılı olarak incelemek gerekirse, d_{SD} ye bağlı olarak önerilen yöntem EE-öncelikli SR yöntemine göre EE açısından %35 - %50 arasındaki oranlarda daha verimli olduğu ve aynı zamanda r_e açısından da %70 - %100 arasındaki oranlarda daha hızlı olduğu gözlemlenmektedir. r_e -öncelikli SR yöntemiyle karşılaştırıldığında ise önerilen yöntem EE açısından %45 - %100 arasındaki oranlarda daha verimli olduğu ve r_e açısından da %20 - %35 arasındaki oranlarda daha hızlı olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar ortaya koymaktadır ki önerilen yöntemin her iki referans yöntemden de enerji bakımından daha verimli olmasının yanında daha yüksek r_e ye de sahiptir. İlk bakışta, bu sonuç şaşırtıcı gelebilmektedir çünkü önerilen yöntemde kaynak-hedef arasındaki iletişim üç aşamada sağlanmasına rağmen SR yönteminde kaynak sürekli veri iletmektedir ve bundan dolayı SR yönteminin daha yüksek r_e ye sahip olması gerektiği düşünülebilmektedir. Oysa, benzetim sonuçları

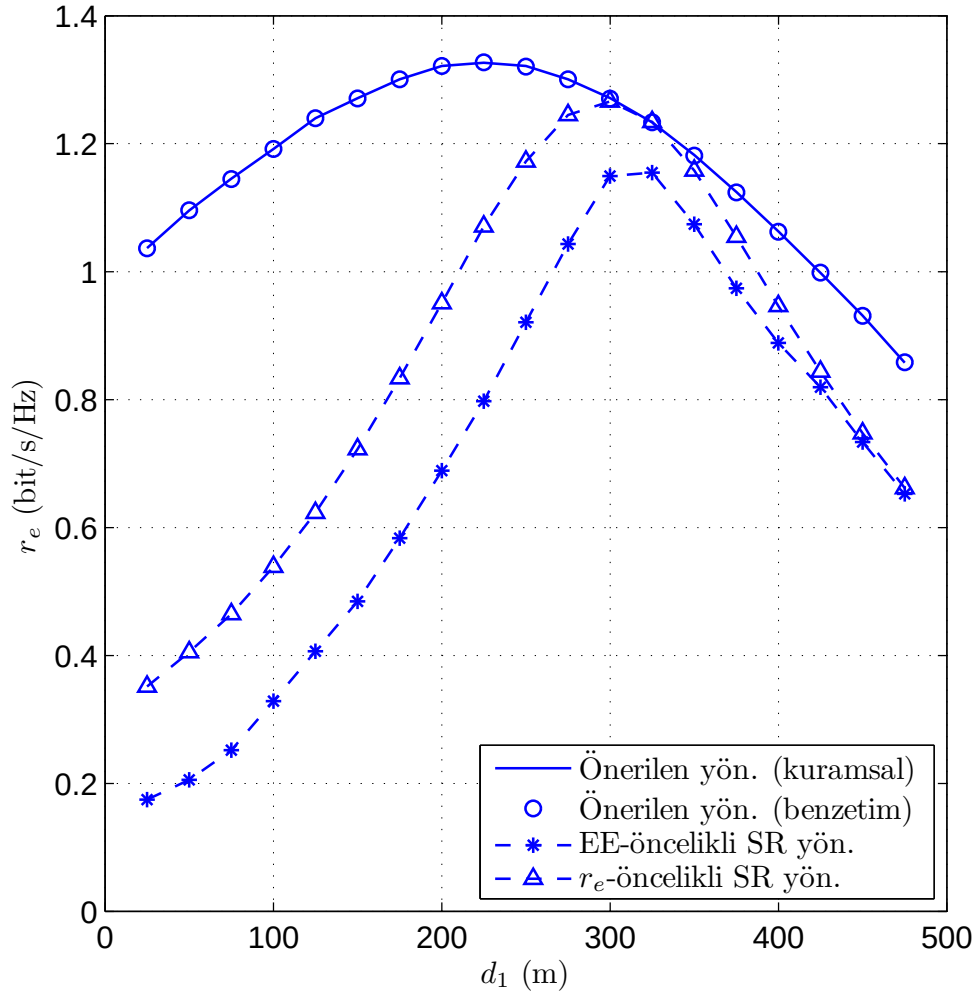
sonucun bunun tam tersi olduğunu ortaya koymaktadır. Önerilen yöntemin bu başarımı sağlamasının en önemli nedeni röleler arası iletişimin yardımıyla çok yollu çeşitleme elde etmesi ve bu sayede makul servis dışı kalma olasılıkları ile yüksek hızlarda iletim yapabiliyor olmasıdır. Çünkü EE'yi artırmanın en önemli yolu veri hızını artırırken servis dışı kalma olasılığının fazla artmamasını sağlayabilmektir. Önerilen yöntem de tam olarak bunu yapmaktadır. Üç aşamada iletim yapılmasına rağmen daha yüksek hızlarda iletim yapılabilmektedir. Örneğin $d_{SD} = 500$ m olduğunda önerilen yöntemin optimum r_1 , r_2 ve r_3 hızları, sırasıyla, 3.5, 10.0 ve 3.6 bit/s/Hz olarak bulunmakta iken, r_e -öncelikli SR yönteminin r_e yi maksimum yapan optimum r_{s1} ve r_{s2} hızları, sırasıyla, 2.1 ve 2.2 bit/s/Hz olarak bulunmaktadır. Bu değerler önerilen yöntemin neden daha yüksek r_e ye sahip olduğunu açıklamaktadır. Aynı yaklaşım EE için de geçerlidir.

Şekil 4.7 ve 4.8'de rölelerin konumunun, sırasıyla, EE ve r_e ye etkisi incelenmektedir. Rölelerin kaynağa yakın olduğu durumda önerilen yöntemin her iki referans



Şekil 4.7 : EE'nin d_1 e bağlı başarımı ($d_{SD} = 500$ m, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).

yöntemden de enerji bakımından önemli ölçüde verimli olduğu Şekil 4.7'den görülmektedir. Örneğin, $d_1 = 100$ m iken önerilen yöntem EE-öncelikli SR yönteminden %70, r_e -öncelikli SR yönteminden %100 daha yüksek EE'ye sahiptir. Etkin veri hızları göz önünde bulundurulduğunda Şekil 4.8'de $d_1 = 100$ m iken önerilen yöntem EE-öncelikli SR yönteminden %270, r_e -öncelikli SR yönteminden %120 daha yüksek r_e ye sahiptir. Diğer taraftan, her iki SR yöntemi için rölelerin optimum konumu olan $d_1 = 325$ m iken önerilen yöntem hala her iki SR yönteminden de %25 daha yüksek EE'ye sahiptir ve r_e -öncelikli SR yöntemiyle aynı r_e ye sahiptir. Yani röle konumu referans yöntemlerin lehine olarak ayarlandığı durumda dahi önerilen yöntemin daha yüksek EE'ye sahip olduğu görülmektedir.



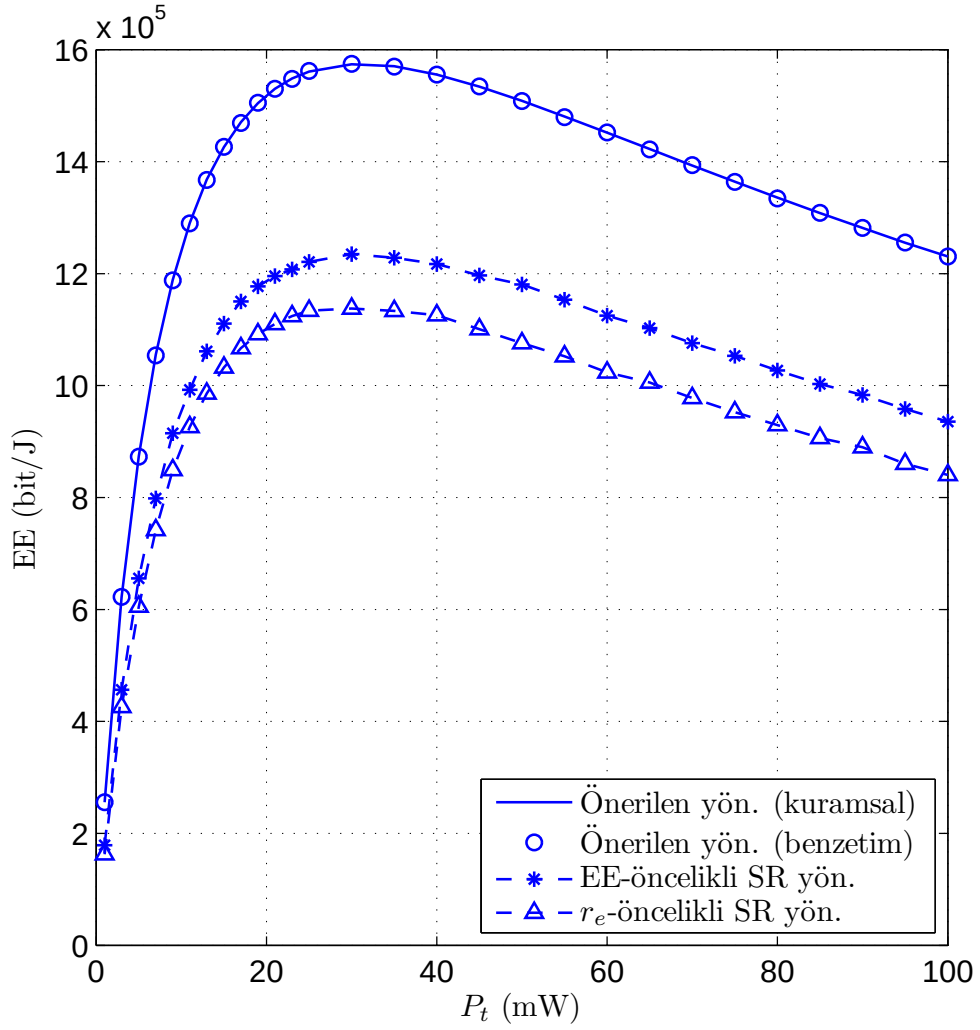
Şekil 4.8 : r_e nin d_1 e bağlı başarımı ($d_{SD} = 500$ m, $P_t = 100$ mW ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).

Şekil 4.7 ve 4.8'den çıkarılabilecek önemli bir sonuç önerilen yöntemin başarımının rölelerin konumundaki değişikliklerden SR yöntemlerine kıyasla daha az etkilendiğidir,

çünkü röleler kaynağa veya hedefe yakın bir konuma yerleştirildiğinde önerilen yöntemin referans yöntemlere göre EE ve r_e kazançları artmaktadır. Bunun başlıca nedeni şudur: Burada karşılaştırdığımız bütün yöntemlerde röleler DF tekniğini kullanılmaktadırlar ve bu durumda röleler kaynak veya hedefe yaklaştığında uzak olan bağlantının (röleler kaynağa yakınsa röle-hedef bağlantısı veya röleler hedefe yakınsa kaynak-röle bağlantısı) ortalama kanal kazancı düşmekte ve bu bağlantının başarımı sistemin başarımında belirleyici bir rol üstlenmektedir. Çünkü kısa olan bağlantıda hatasız iletim dahi yapılsa uzak olan bağlantının başarımı çok düşük olacağı için kaynaktan hedefe başarım da aynı oranda düşecektir. Bundan dolayı DF tekniği kullanılan sistemlerde genellikle rölelerin ortaya yakın olması başarımı artırmaktadır. Burada karşılaştırılan bütün yöntemlerde de röleler kaynak veya hedefe fazlaca yaklaştıklarında EE ve r_e başarımları düşmektedir. Ancak önerilen yöntemin çok-yollu çeşitlemenin katkısıyla rölelerin konumundaki değişimlerden referans yöntemlere göre daha az etkilenmektedir.

Şekil 4.9 ve 4.10 gezgin aygıtların iletim gücünün (P_t) önerilen yöntemin, sırasıyla, EE ve r_e başarımları üzerindeki etkisini göstermektedir. P_t nin, 1 mW ile 100 mW (P_t nin alabileceği maksimum değer $P_{max} = 100$ mW'dır) arasında değişen değerleri için optimum veri hızı uyarlaması her yöntem için ayrı ayrı yapılmaktadır. $d_{SD} = 500$ m iken önerilen ve referans yöntemler için optimum P_t nin yaklaşık 30 mW olduğu Şekil 4.9'dan gözlemlenmektedir. Optimum P_t sistem değişkenlerine doğrudan bağlıdır, yani örneğin P_c si daha yüksek alıcı-vericiler ağda kullanıldığında optimum P_t de buna bağlı olarak daha yüksek bir değer olarak belirlenecektir. Karşılaştırılan yöntemlerin maksimum EE'leri karşılaştırıldığında önerilen yöntemin, EE-öncelikli SR yönteminden %30, r_e -öncelikli SR yönteminden %40 daha yüksek EE'ye sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.10'dan çıkarılacak sonuç ise beklendiği gibi P_t nin artmasıyla r_e nin de arttığıdır.

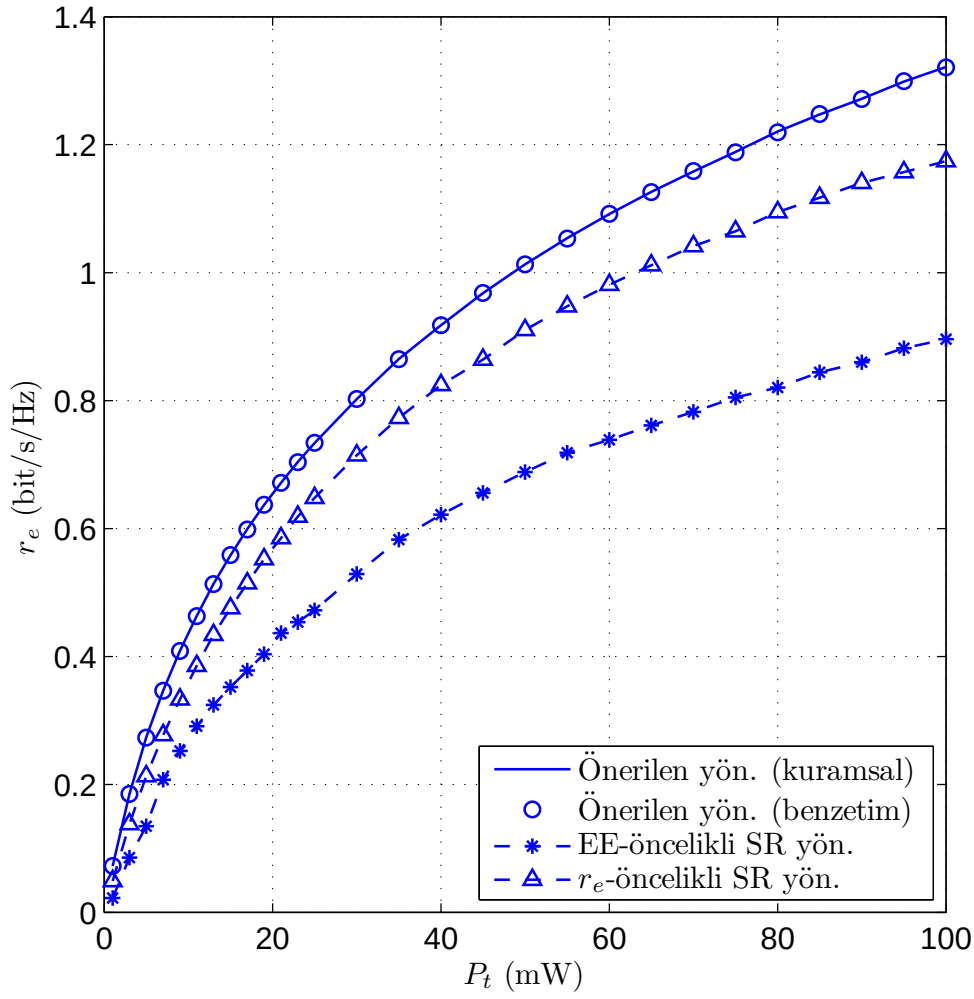
Şekil 4.11'de önerilen yöntemin EE- r_e ödünleşimi (trade-off) ayrıntılı bir biçimde incelenmektedir. Bu şekildeki eğriler, 1 mW ile 100 mW arasında değişen P_t değerleri için her P_t değerine karşılık gelen EE ve r_e değerleri Şekil 4.9 ve 4.10'dan alınarak elde edilmektedir. Eğrilerin en sol noktası minimum P_t ye karşılık gelmektedir ve sağa doğru ilerlerken P_t artmaktadır. EE-öncelikli SR yönteminin ulaşabileceği maksimum enerji verimliliği olan 1.23 Mbit/J değerine $P_t = 30$ mW iken ulaşılabilmekte ve



Şekil 4.9 : EE'nin P_t ye bağlı başarımı ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = d_{SD}/2$ ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).

bu durumda etkin veri hızı 0.53 bit/s/Hz olmaktadır. Diğer yandan r_e -öncelikli SR yönteminin ulaşabileceği maksimum enerji verimliliği olan 1.13 Mbit/J değerine ulaştığında etkin veri hızı 0.76 bit/s/Hz olmaktadır. Bu eğrilerden görülmektedir ki önerilen yöntem referans yöntemlerden hem EE hem de r_e bakımından daha başarılıdır çünkü önerilen yöntemin maksimum EE'si 1.57 Mbit/J'dir ve bu da EE-öncelikli SR yönteminden %27, r_e -öncelikli SR yönteminden %39 daha yüksektir ve bununla birlikte bu noktadaki r_e si 0.8 bit/s/Hz'dir. Bunun ötesinde önerilen yöntem için ulaşılacak maksimum r_e 1.32 bit/s/Hz'dir ve bu da EE-öncelikli SR yönteminden %46, r_e -öncelikli SR yönteminden %12 daha yüksektir.

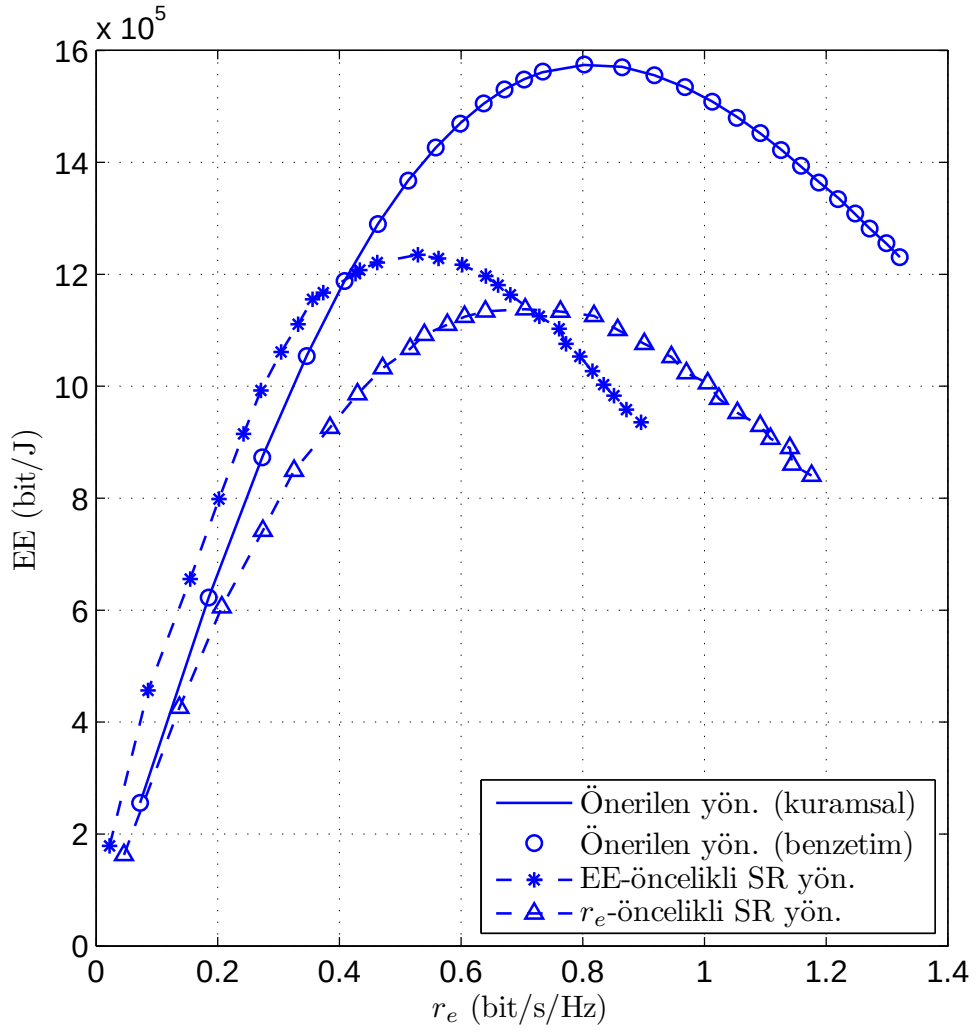
Şekil 4.12'de $d_1 = d_{SD}/4$ iken değişen P_t değerleri için EE- r_e ödünleşimi incelenmektedir. Röleler kaynağa yakın iken önerilen yöntemin SR yöntemlerine göre EE ve r_e kazançlarının arttığı gözlemlenmektedir. EE-öncelikli SR yönteminin



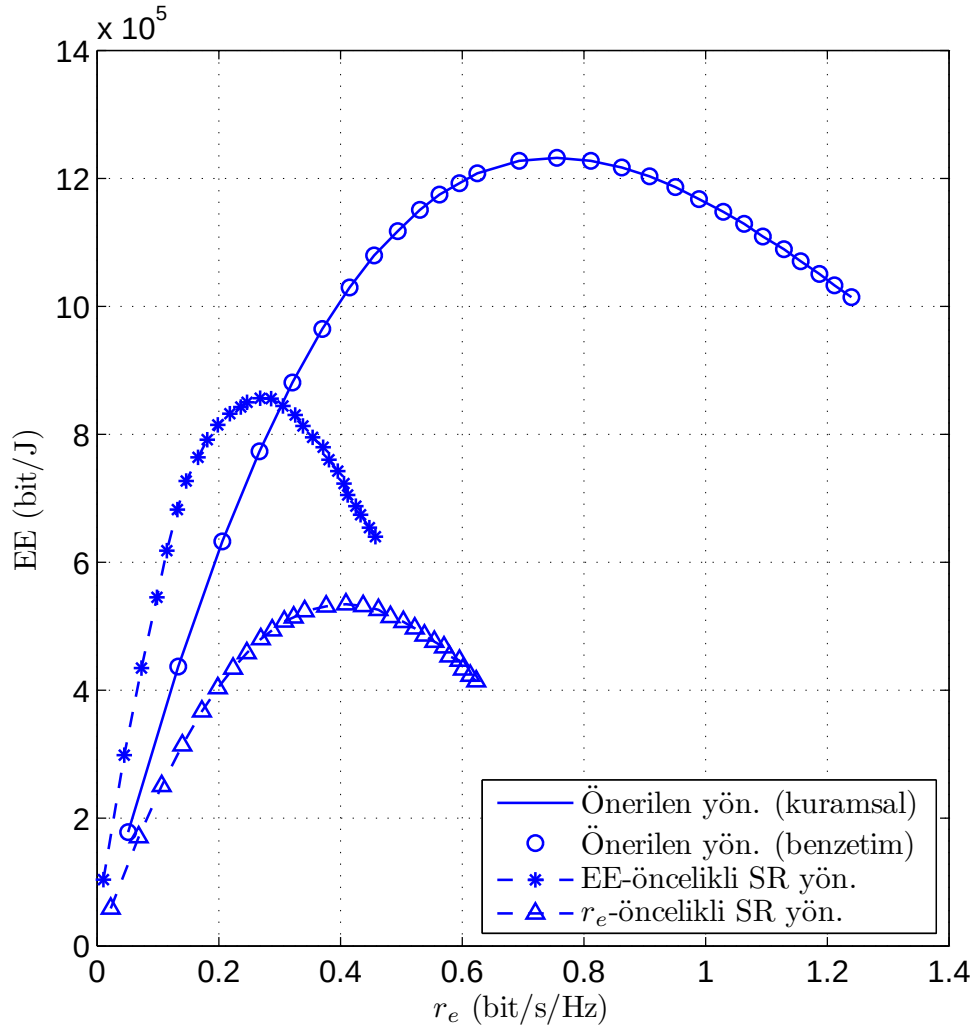
Şekil 4.10 : r_e nin P_t ye bağlı başarımı ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = d_{SD}/2$ ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).

ve r_e -öncelikli SR yönteminin sahip oldukları maksimum EE, sırasıyla, 0.85 Mbit/J ve 0.53 Mbit/J iken önerilen yöntemin maksimum EE'si 1.32 Mbit/J'dir ve bu da EE-öncelikli SR yönteminden %55 ve r_e -öncelikli SR yönteminden %150 daha yüksektir. Bunun yanında her yöntemin kendi enerji verimliliğinin maksimum olduğu noktada önerilen yöntemin r_e EE-öncelikli SR yönteminin r_e sinden %170 ve r_e -öncelikli SR yönteminin r_e sinden %90 daha yüksektir.

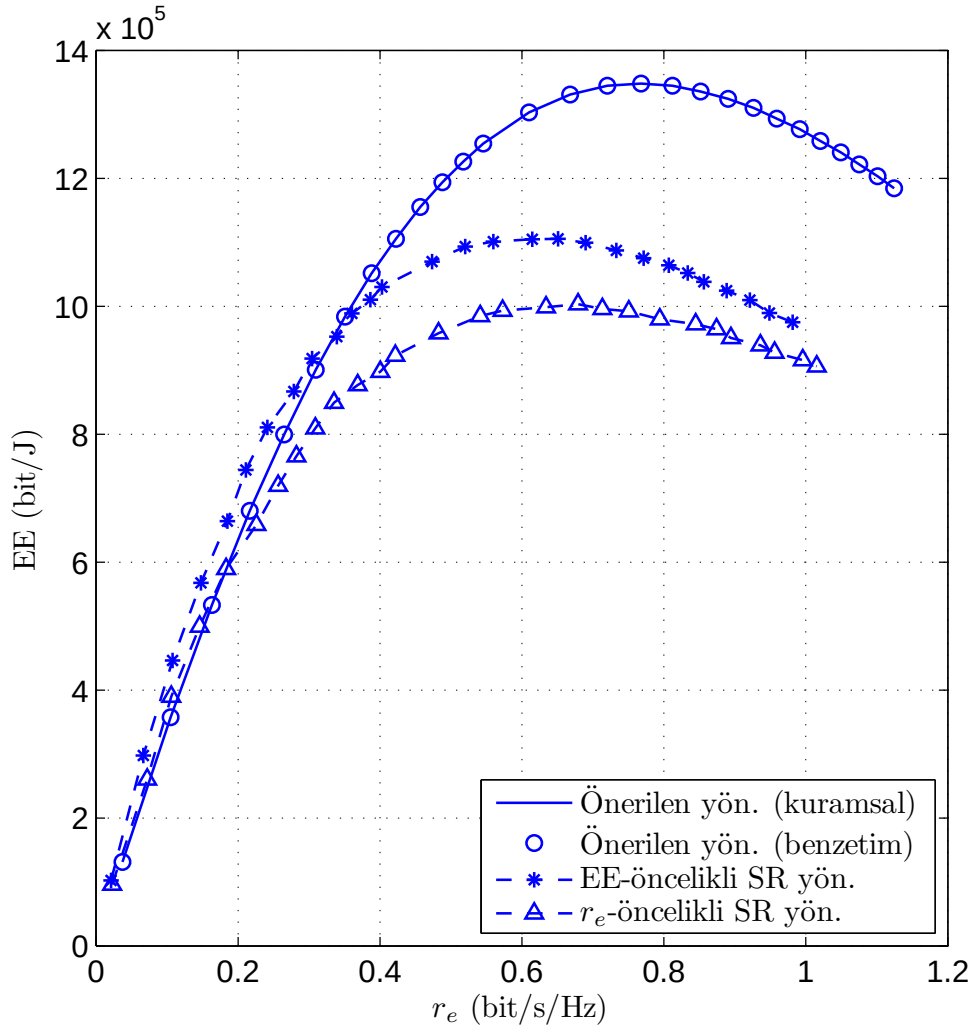
Şekil 4.13'te ise $d_1 = 3d_{SD}/4$ iken değişen P_t değerleri için EE- r_e ödünleşimi incelenmektedir. Röleler hedefe yakın bir konumda olduğunda EE ve r_e başarımları açısından önerilen yöntem ile referans yöntemler arasındaki fark azalmaktadır. Ancak, her yöntemin maksimum EE'leri karşılaştırıldığında hala önerilen yöntemin EE-öncelikli SR yönteminden %20 ve r_e -öncelikli SR yönteminden %35 daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.11 : P_t nin 1 mW (en sol) ile 100 mW (en sağ) arasındaki değişimlerine bağlı olarak EE- r_e başarımlarının gösterimi ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = d_{SD}/2$, ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).



Şekil 4.12 : P_t nin 1 mW (en sol) ile 100 mW (en sağ) arasındaki değişimlerine bağlı olarak EE- r_e başarımlarının gösterimi ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = d_{SD}/4$, ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).

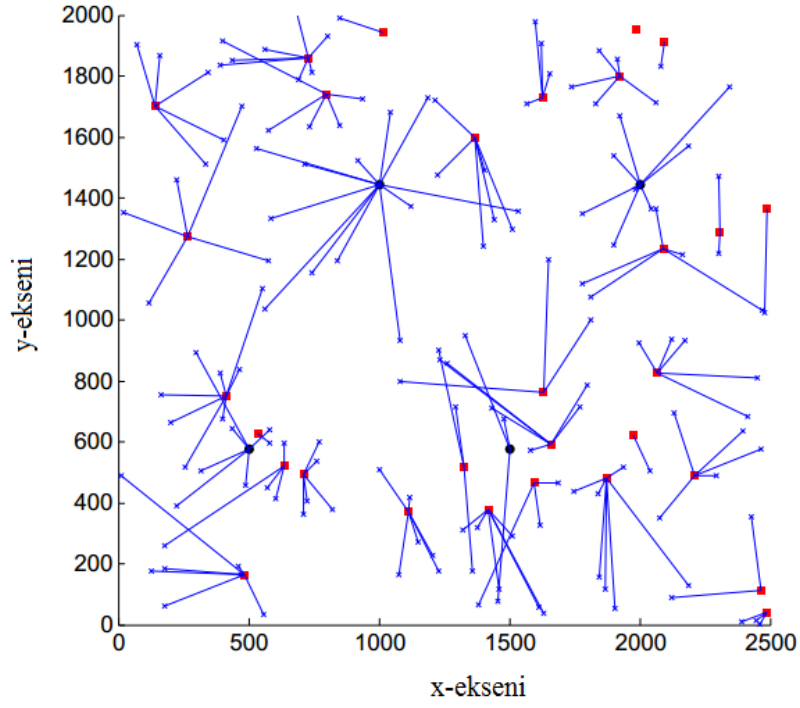


Şekil 4.13 : P_t nin 1 mW (en sol) ile 100 mW (en sağ) arasındaki değişimlerine bağlı olarak EE- r_e başarımlarının gösterimi ($d_{SD} = 500$ m, $d_1 = 3d_{SD}/4$, ve $d_{RR} = d_{SD}/20$).

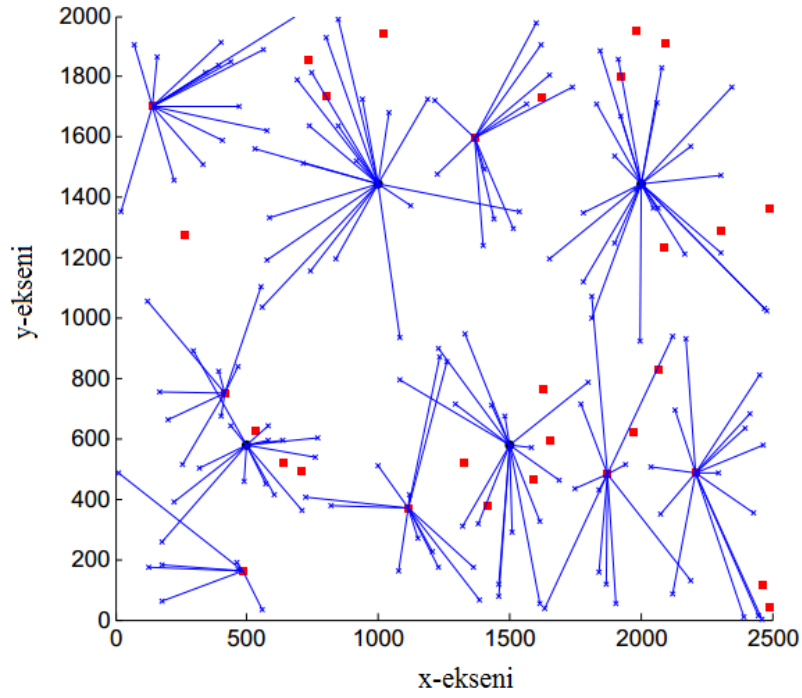
5. UT-FARKINDALIKLI HÜCRE-KAPATMA (CSO) ALGORİTMASI

Bu bölümde, hücresel ağlarda enerji verimliliğini artırmak için hücre kapatma algoritması önerilmektedir. Hücresel ağlarda toplam tüketilen enerjinin büyük bir kısmı kullanıcı uçbirimi (UT: User Terminal) yerine baz istasyonlarında (BS: Base Station) harcanmaktadır. Bununla birlikte, iletişim teknolojileri 5G'ye doğru gelişirken, kilometrekare başına düşen BS sayısı da, özellikle küçük hücresel ağların yaygınlaşmasıyla artış eğilimindedir. Dikkate değer bir nokta, trafik yükünün zamanda ve uzayda heterojen olması nedeni ile bazı zaman dilimlerinde ve bazı yerlerde trafik yoğunluğu oldukça düşük seviyelere inebilmektedir. Örneğin iş yerlerinin yoğun olduğu yerlerde geceleri veya konutların fazla olduğu yerlerde gün içerisinde trafik yoğunluğu düşmektedir. Bundan dolayı, düşük trafik yoğunluğuna sahip BS'lerin kapatılmasının sistemin enerji verimliliği açısından önemli kazanımlar sağlayacağı düşünülmektedir. Şekil 5.1'de düşük trafik yoğunluğuna sahip heterojen bir ağda hücre kapatma yönteminin uygulanması gösterilmektedir. Şekil 5.1-(a)'da hücre kapatma uygulanmadan önceki ağın durumu ve (b)'de uygulandıktan sonraki ağın durumu görülmektedir. Her iki durumda da hiç bir UT'nin bağlı olmadığı BS'ler kapatılmaktadır ve (a)'da yalnızca 1 tane BS kapalıyken (b)'de 25 BS kapatılabilmektedir.

Literatürdeki birçok çalışmada düşük trafik yoğunluğuna sahip BS'ler için hücre kapatma önerilmekte ve kapatma kıstası olarak aşağı yönlü olan (downlink, DL) iletim göz önünde bulundurulmaktadır. Ama bildiğimiz kadarı ile hücre kapatma ile ilgili literatürde UT'lerin ortalama güç tüketimini başarımlı ölçütü olarak ele alan bir çalışma yoktur. Halbuki BS kapatma yaklaşımı yukarı yönlü (uplink, UL) iletimi, dolayısıyla UT'lerin pil ömrünü doğrudan etkilemektedir çünkü bir BS'nin kapatılması durumunda onun kapsama alanındaki bütün UT'ler daha düşük bir kanal gücüne sahip başka bir BS'ye bağlanma durumunda kalacaktır. Böyle bir durumdaki UT ancak daha yüksek bir iletim gücüyle eski servis kalitesini elde edebilmektedir. Bundan dolayı, hücre kapatma yöntemleri ağda harcanan toplam enerjiyi azaltmasına rağmen



(a)



(b)

Şekil 5.1 : Hücre kapatma yöntemi uygulanan düşük trafik yoğunluklu heterojen bir ağ. (a) hücre kapatma uygulanmadan önceki ağın durumu (b) uygulandıktan sonraki ağın durumu.

sabit bir güç kaynağına bağlı olmayan UT'lerin pil ömrünü de azaltmaktadır. Bu çalışmada ise amaç bütün ağın enerji verimliliğinin yanında UT'lerin harcadığı enerjiyi de göz önünde bulunduran optimum hücre kapatma (CSO: Cell Switch Off) algoritması geliştirmektir. Heterojen ağlar göz önünde bulundurulmaktadır ve heterojenlik hem BS'lerde hem de trafik yükünün dağılımında olmak üzere iki taraflı olarak ele alınmaktadır. Ayrıca, DL/UL güç kontrol algoritmaları ile basit bir girişim modeli de önerilmektedir.

5.1 Sistem Modeli ve Problem Tanımı

Sunu ve istemin (supply-demand) heterojen varsayıldığı oldukça genel bir ağ modeli ele alınmaktadır. Yani BS'lerin farklı özelliklere sahip olup heterojen olarak yerleştirildiği ve trafik yoğunluğunun heterojen olarak dağıldığı düşünülmekte, bu tür ağlar HetHetNet olarak adlandırılmaktadır [71]. BS'ler makro ve piko olmak üzere iki çeşit olabilmekte ve makro BS'ler altıgen hücre şekli temel alınarak belirgin (deterministic) olarak yerleştirilmekte iken piko BS'ler rastlantısal olarak yerleştirilmektedir. Hücre kapatma işlemi ağın anlık durumuna göre yapılmakta ve kapatılacak BS'lere anlık trafik bilgisi temel alınarak karar verilmektedir. Ağdaki UT'lerin sürekli veri alıp verdiği varsayılmaktadır. Açık olan BS'lerin soğutma sistemi, antenler gibi iletimden bağımsız olarak güç tüketimine neden olan unsurlar BS'nin toplam güç tüketiminin çoğunluğunu oluşturmaktadır [45]. Bundan dolayı ağın toplam güç tüketimi kabaca etkin olan BS sayısına doğrusal olarak bağlı olduğu varsayılmaktadır. Bilgisayar benzetimleri sırasında kullanılan bazı değişkenler Çizelge 5.1'de verilmektedir.

LTE (Long Term Evolution) ağları temel alınmaktadır ve bu ağlarda frekans bandı ayrık olarak kullanıcılara tahsis edilmektedir. LTE standartlarında bir kaynak bloğu (RB: Resource block) 180 kHz bant genişliğine sahip olmakta ve her RB yalnızca bir kullanıcıya atanmaktadır. Her UT için aynı veri hızı gereksinimi olduğu ve UT tarafından istenen hız ağ tarafından sağlanamazsa o UT'nin servis dışı kaldığı varsayılmaktadır. Her UT'nin DL ve UL için ayrı ayrı hız gereksinimleri olduğu düşünülmektedir ve bunlardan birisi dahi karşılanamazsa o UT sistem tarafından

Çizelge 5.1 : Değişkenlerin tanımları.

Değişken	Tanımı
R_{dl}	DL için istenen veri hızı
R_{ul}	UL için istenen veri hızı
A	Etkin BS'lerin kümesi
D	Engellenmemiş UT'lerin kümesi
S_m	BS m e bağlı olan engellenmemiş UT'lerin kümesi
P_{BS}	Bir BS'nin maksimum iletim gücü
B_{BS}	Bir BS için toplam bant genişliği
B_{rb}	Bir RB'nin bant genişliği
α	Erim genişletme taraflılık değeri (RE bias value)
K	Bir BS'nin RB sayısı
N	UT'lerin sayısı
M	BS'lerin sayısı
N_A	Etkin BS'lerin sayısı
$B_{m,i}^D$	DL için BS m de UT i ye ayrılan bant genişliği
$B_{m,i}^U$	UL için BS m 'de UT i ye ayrılan bant genişliği
$k_{m,i}^D$	DL için BS m de UT i ye ayrılan RB sayısı
$k_{m,i}^U$	DL için BS m de UT i ye ayrılan RB sayısı
$P_{m,i}^D$	BS m 'nin UT i için iletim gücü
B_m^D	DL için BS m nin UT'lere ayırdığı toplam bant genişliği
B_m^U	UL için BS m nin UT'lere ayırdığı toplam bant genişliği
P_m^D	BS m nin toplam iletim gücü
P_S	UT'lerin toplam iletim gücü
$PL(d_{m,i})$	BS m ile UT i arasındaki yol kaybı
P_i^U	UT i nin iletim gücü
$P_{\max}^U$	Bir UT'nin maksimum iletim gücü
I_i^D	DL için UT i nin uğradığı girişim
I_i^U	UL için UT i nin uğradığı girişim
N_f	Alıcı gürültü eşdeğeri
N_0	Gürültünün güç spektral yoğunluğu
n	Yol kaybı sabiti

engellenmektedir. UT i için DL ulaşılabilen en yüksek veri hızı [45]

$$R_{m,i}^D = B_{m,i}^D \log \left(1 + \frac{P_{m,i}^D / PL(d_{m,i})}{I_i^D + N_0 N_f B_{m,i}^D} \right), \quad (5.1)$$

biçiminde verilmektedir. Burada $B_{m,i}^D = B_{rb} k_{m,i}^D$ eşitliği ile verilmektedir ve yol kaybı terimi olan $PL(d_{m,i})$ kanalın uzun dönem istatistikleri olan yol kaybı ve log-normal gölgelemenin etkilerini içermektedir. Yol kaybı $PL(d_{m,i}) = c + 10n \log(d_{m,i}) + X_\sigma$ biçiminde yazılmaktadır ve burada c vericiden 1 m uzaklıktaki güç kaybını, X_σ ortalaması 0 standart sapması σ (dB olarak tanımlanmaktadır) olan karmaşık Gauss rastlantı değişkeni olup gölgelemenin etkisini ifade etmektedir. Bir UT'nin ulaşılabilen en yüksek DL veri hızı istenen hızdan (R_{dl}) düşük olduğunda, yani $R_{m,i}^D < R_{dl}$

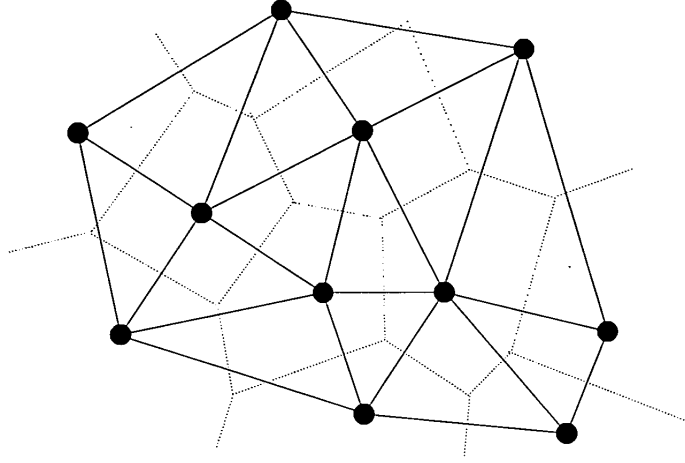
olduğunda UT servis dışı kaldığı için engellenmektedir. UT i için UL ulaşılabilen en yüksek veri hızı [45]

$$R_{m,i}^U = B_{m,i}^U \log \left(1 + \frac{P_i^U / \text{PL}(d_{m,i})}{I_i^U + N_0 N_f B_{m,i}^U} \right) \quad (5.2)$$

biçiminde verilmektedir. DL durumunda olduğu gibi UL için de $R_{m,i}^U < R_{ul}$ durumu ortaya çıktığında UT servis dışı kaldığı için engellenmektedir.

Genellikle UT-BS eşleştirmeleri DL tarafındaki ölçüm sonuçları temel alınarak yapılmaktadır. Homojen ağlarda UT-BS eşleştirmesi yaygın olarak UT'nin aldığı işaret gücüne göre yapılmaktadır ama heterojen ağlarda bu yaklaşım ciddi bir takım sorunları da beraberinde getirmektedir. Çünkü makro BS'ler piko BS'lerden daha yüksek bir iletim gücüne sahiptir ve bundan dolayı piko BS'lerin kapsama alanı dardır. Bir UT, piko BS'ye yakın olmasına rağmen makro BS'den daha güçlü bir işaret aldığı için makro BS'ye bağlanmaktadır. Ancak bu kullanıcı daha uzakta olan makro BS'ye veri iletmek için daha yüksek bir güçle iletmesi gerekmektedir. Bundan dolayı piko BS'ye yakın olduğu halde makro BS'ye bağlanan UT'ler yüksek güçle iletim yapmak zorunda kalmaları nedeni ile piko BS'ye bağlanan UT'lerin UL iletimi için ciddi bir girişim oluşturmakta ve bu UT'ler için servis kalitesini önemli ölçüde düşürmektedir. Hem bu sözü edilen UL girişim sorununu aşmak hem de heterojen ağlarda etkin veri hızını artırmak adına önerilen basit ama etkili bir teknik erim genişletme (RE: range expansion) tekniğidir [72]. Bu tekniğe göre piko BS'lerden alınan işaretlerin güçleri, RE'nin taraflılık değeri (bias value) adı verilen 1'den büyük belirli bir katsayı ile çarpılmakta ve bundan sonra UT'ler aldıkları işaretler içinde en yüksek taraflı (biased) işaret gücüne sahip BS'ye bağlanmaktadır. Piko BS'lere yapılan bu pozitif ayrımcılık sayesinde piko BS'lerin kapsama alanı genişlemekte ve yukarıda sözü edilen UL girişim sorunu belirli ölçüde azalmaktadır. RE'nin taraflılık değeri (α) birkaç dB'den başlayarak 20 dB'ye kadar çıkabilmektedir ve bu çalışmadaki bilgisayar benzetimlerinde $\alpha = 10$ dB olarak alınmaktadır.

Hücre kapatma yöntemleri trafik yükünün uzaysal dağılımı ile yakından ilgilidir. BS'lerin heterojen olduğu düşünülmeyle birlikte UT'lerin konumlarının da heterojen olarak dağıldığı varsayılmaktadır. Bundan dolayı önerilen hücre kapatma yöntem başarımının trafik yükünün farklı heterojenlik düzeylerinde incelenmesi gerekmektedir. [71] heterojen uzaysal trafiğin modellenmesi ile ilgili bir yöntem



Şekil 5.2 : Delaunay üçgenleme ile Voronoi hücrelemenin gösterimi (daireler UT'leri, kesikli çizgi Voronoi hücre duvarlarını ve düz çizgi Delaunay üçgen kenarlarını göstermektedir).

önermekte ve bu yöntem trafiğin istatistiksel olarak ayarlanmasına olanak tanımaktadır. [71]'de trafiğin heterojenlik düzeyi çeşitlilik sabiti (CoV: Coefficient of Variations) olarak adlandırılan tek bir değişken ile gösterilmektedir. Çeşitlilik sabiti

$$\text{CoV} = \sigma_T / \mu_T \quad (5.3)$$

biçiminde tanımlanmaktadır. Burada T , trafiğin ölçüsünü, σ_T , T 'nin standart sapmasını ve μ_T , T 'nin ortalamasını göstermektedir. Trafik ölçüsünün nasıl tanımlanacağı ile ilgili farklı yaklaşımlar olmakla birlikte bu tezde trafik ölçüsü olarak UT'lerin Delaunay kenarlarının ortalama uzunluğu kullanılmaktadır. Delaunay üçgenleme yöntemi bir uzaydaki noktaların birbiri ile ilişkisini tanımlamak için kullanılan bir yöntemidir ve Voronoi hücreleme ile önemli ortak noktaları vardır [71]. Şekil 5.2'de Delaunay üçgenleme ile Voronoi hücreleme yöntemleri beraber gösterilmektedir. Her bir UT'den komşu UT'lere doğrusal çizgilerin çizilmesi ile Delaunay üçgenleme elde edilmektedir. Dolayısıyla her bir UT için ortalama Delaunay kenar uzunluğu, o UT'nin komşu UT'lerine olan uzaklığının ortalamasıdır. UT'lerin tamamen rastlantısal dağılımı durumu referans olarak alınmakta ve CoV'nin tamamen rastlantısal dağılıma göre normalize edilmiş değeri kullanılmaktadır. Yani normalize $\text{CoV} = 1$ olması trafiğin tamamen rastlantısal dağıldığını göstermekte ve normalize CoV arttıkça heterojenliğin de arttığı anlaşılmaktadır.

5.2 Güç Kontrol Algoritması

Hücresele ağlarda DL ve UL için güç kontrolleri genellikle birbirinden bağımsız olarak yapılmaktadır. Öncelikle DL tarafı için güç kontrolünün (PC: Power Control) nasıl yapılacağı incelenecektir. PC problemi ile kaynak paylaşımı (kaynak bloğu (RB: Resource Block) ve güç paylaşımı) problemi aynı problemi ifade etmektedir çünkü RB paylaşımı olmadan PC problemini tanımlamak düşünülemez. Optimum PC problemi

$$\begin{aligned} & \sum_{m \in A} P_m^D \text{ yi minimize et} \\ \text{koşullar : } & P_m^D \leq B_{BS}, \quad \forall m \in A, \\ & k_m^D \leq K, \quad \forall m \in A, \\ & R_{m,i}^D \geq R_D, \quad \forall m \in A, \\ & P_m^D \leq B_{BS}, \quad \forall m \in A, \forall i \in D, \\ & P_b^D \leq \text{sabit}, \end{aligned} \quad (5.4)$$

biçiminde yazılmaktadır. Burada P_b^D , DL hız gereksiniminin karşılanamaması sonucu UT'nin engellenme olasılığıdır. (5.4) dışbükey optimizasyon problemi sınıfına girmemesinin yanında makul süreler içerisinde çözülmesi de olası değildir. Bundan dolayı, öncelikle bütün ağ için PC problemini tek seferde çözmeye çalışmak yerine hücre hücre tanımlamanın problemi basitleştireceği düşünülmektedir. Bu yaklaşımda, tek zamanda tek hücre (hücre m) ele alınmaktadır ve bu hücre için optimum PC problemi

$$\begin{aligned} & P_m^D \text{ yi minimize et} \\ \text{koşullar : } & P_m^D \leq B_{BS}, \\ & k_m^D \leq K, \\ & R_{m,i}^D \geq R_D, \quad \forall i \in S_m. \end{aligned} \quad (5.5)$$

biçiminde yazılmaktadır. Ancak hala bu problem dışbükey değildir ve değişkenler için tanımlanan bütün aralığı tek tek test ederek optimum sonucu bulmak pratik bir yaklaşım değildir. Hücre kapatma ile literatürde bu tür problemler için sezgisel algoritmaların önerilmesi yolu benimsenmektedir. Bu tezde de, (5.5)'teki PC problemini çözmek için sıralı (sequential) ve yinelemeli (iterative) sezgisel bir algoritma önerilmektedir.

Önerilen sezgisel algoritmanın çalışma yapısını anlatan akış diyagramı Şekil 5.3'te ve sözde kodu (pseudo-code) Algoritma 1'de verilmektedir. Sözde kod, bir algoritmanın yapısının ve çalışma mantığının ayrıntılara girmeden anlatımıdır. Algoritmanın başlangıç durumuna getirilmesi bütün güçlerin sıfıra eşitlenmesi ve RB atamalarının sıfırlanması ile yapılmaktadır (Satır 1). Daha sonra söz edilen RE (erim genişletme) tekniği yardımı ile BS-UT eşleştirmeleri yapılmaktadır (Satır 2). İlk yinelemede

(iteration) bütün hücreler için girişimin olmadığı varsayılmakta ve buna göre kaynak paylaşımı (RB ve güç) yapılmaktadır. Her bir yinelemede şu adımlar izlenmektedir:

1. Bir önceki yinelemede elde edilen güç paylaşımını temel alarak her kullanıcı için girişim hesaplanmaktadır (Satır 4).
2. Güncellenen girişime bağlı olarak kaynak paylaşımına karar verilmektedir (ayrıntılar aşağıda verilecektir).
3. Ağdaki bütün BS'lerin iletim gücünün ortalamasının belirli bir değere yakınsayıp yakınsamadığı kontrol edilmekte ve yakınsamış ise algoritma sonlandırılmaktadır (Satır 27-28). Yakınsama, yinelemeler arasında farkın azalması ile belirlenmektedir. Örneğin toplam iletim gücü iki yineleme arasında %3'ten daha az değişmiş ise yakınsadığı düşünülmektedir.

İkinci adımda söz edilen kaynak paylaşımı her yinelemede her hücre için ayrı ayrı ele alınmaktadır (Algoritma 1'deki 'Loop 2'). Örneğin BS m için kaynak paylaşımı şu şekilde yapılmaktadır: Başlangıç olarak her UT için yalnızca birer tane RB atanmaktadır ve sonrasında RB'ler UT'lere birer birer atanmaktadır. Sıradaki RB (5.5) optimizasyon problemindeki amaç işlevini (objective function) en fazla azaltan UT'ye atanmaktadır. Yeni bir RB atanması yapıldıktan sonra ilgili UT için belirlenmiş olan güç de güncellenmektedir (Satır 15). BS m 'deki bütün RB'ler UT'lere uygun bir biçimde paylaştırıldıktan sonra, BS m 'nin toplam iletim gücünün izin verilen maksimum iletim gücünden fazla olup olmadığı kontrol edilmektedir (Satır 17) ve eğer fazla ise en düşük alınan işaret gücüne sahip UT engellenmektedir (Satır 20). Bu durumda BS m için RB paylaşımı baştan başlatılarak engellenmemiş UT'ler için yeniden yapılmaktadır (Satır 22).

Hücresele ağlarda kaynak paylaşımı girişimin yönetilmesinden bağımsız olarak düşünülemez. Hücreler arası girişim özellikle heterojen ağlarda önemli bir problem olarak ele alınmakta ve araştırma grupları tarafından yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Optimum girişim yönetimi, burada çalışılan ağ modeli gibi karmaşık yapıdaki ağlarda zor bir problem olarak ortaya çıkmaktadır ve bundan dolayı bu çalışmanın merkezinde yer almayan optimum girişim yönetimi konusu çalışmanın dışında tutulmaktadır. Ancak PC algoritması girişim yönetimi ile yakından ilgili olduğu için basit ve

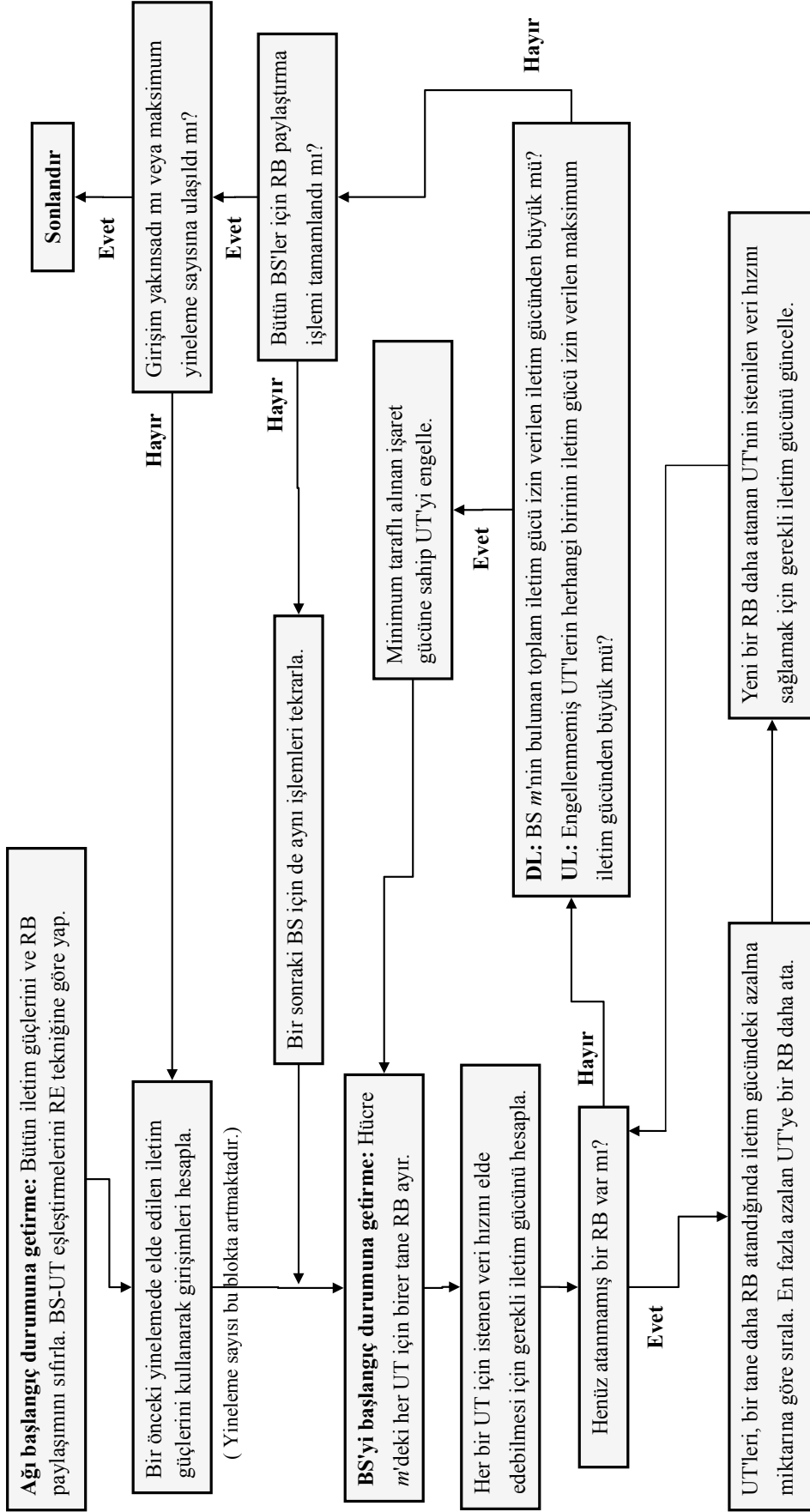
uygulanabilir bir girişim modeli önerilmektedir. Burada rastlantısal bir serpiştiricinin (interleaver) yardımıyla rastlantısal planlama (random scheduling) yapılmaktadır (Satır 27). Buna göre bir BS'deki UT'lere kaç tane RB atanacağı saptandıktan sonra RB'lerin sırası tamamen rastlantısal olarak değiştirilmektedir. Bu sayede komşu hücrelerdeki UT'ler ancak rastlantısal olarak denk gelen RB'lerde birbirlerine girişime neden olmaktadır.

Algoritma 1 DL güç kontrol (PC) algoritması.

Girdiler: BS m nin UT'lerinin aldığı işaret güçleri

Çıktılar: $k_{m,i}^D, P_{m,i}^D \quad \forall m \in A, \forall i \in D$

- 1: **Başlangıç:** $k_{m,i}^D = 0$ ve $P_{m,i}^D = 0 \quad \forall m \in A, \forall i \in D$
 - 2: BS-UT eşleştirmelerini RE tekniğini temel alarak yap
 - 3: **Loop 1** (yinelemeler)
 - 4: Bir önceki yinelemede elde edilen $P_{m,i}^D$ lere bağlı olarak her UT için girişimleri hesapla
 - 5: **Loop 2** ($\forall m \in A$ için kaynak paylaşımı)
 - 6: $k_{m,i}^D = 1, \forall i \in S_m$
 - 7: **Loop 3** (BS m için kaynak paylaşımı)
 - 8: $P_{m,i}^D, \forall i \in S_m$ hesapla
 - 9: $k_m^D = \sum_{i \in S_m} k_{m,i}^D$
 - 10: **if** ($k_m^D < K$) **then**
 - 11: $\hat{k}_{m,i}^D = k_{m,i}^D + 1, \forall i \in S_m$
 - 12: $\hat{k}_{m,i}^D$ lere bağlı olarak $\hat{P}_{m,i}^D, \forall i \in S_m$ hesapla
 - 13: i_{sel} için $k_{m,i}^D = \hat{k}_{m,i}^D$
 - 14: i_{sel} için $P_{m,i}^D = \hat{P}_{m,i}^D$
 - 15: **else**
 - 16: **if** ($P_m^D \leq P_{BS}$) **then**
 - 17: **break Loop 3**
 - 18: **else**
 - 19: Minimum taraflı alınan işaret gücüne sahip UT'yi (i_b) engelle
 - 20: $S_m = S_m - \{i_b\}$.
 - 21: **Başlangıca dön:** $k_{m,i}^D = 1, \forall i \in S_m$
 - 22: **end**
 - 23: **end**
 - 24: **End Loop 3**
 - 25: **End Loop 2**
 - 26: RB'leri rastlantısal bir serpiştiriciden geçir
 - 27: **if** ($\sum_{m \in A} P_m^D$ yakınsarsa veya maksimum yineleme sayısına ulaşırsa) **then**
 - 28: **break Loop 1**
 - 29: **end**
 - 30: **End Loop 1**
-



Şekil 5.3 : Güç kontrol (PC) algoritmasının akış diyagramı.

Şekil 5.3'te verilen akış diyagramı DL ve UL için PC algoritmasını açıklamaktadır. DL ve UL'nin PC algoritmaları arasındaki fark kullanılan güç kısıtından kaynaklanmaktadır. DL'de BS'nin izin verilen maksimum iletim gücü kısıt olarak ele alınmaktayken, UL'de UT'lerin maksimum iletim gücü kısıt olarak karşımıza çıkmaktadır. Akış diyagramında, sağ alttan ikinci blok DL ile UL için kullanılan güç kısıtlarını ayrı ayrı göstermektedir. Benzer şekilde Algoritma 1 DL PC algoritmasının sözde kodudur ve güç kısıtının (Satır 17) UL PC algoritması için değiştirilmesi gerekmektedir. UL PC algoritmasının DL PC algoritmasından elde edilmesi açık olduğu için UL PC algoritmasının sözde kodu verilmemektedir.

5.3 Sezgisel Hücre Kapatma Algoritması

İstenen servis kalitesini sağlamak kaydıyla mümkün olan en fazla sayıdaki BS'nin kapatılması istenmektedir. Aynı zamanda önerilen algoritmanın UT'lerin pil ömürlerini ve dolayısıyla iletim güçlerini göz önünde bulundurması gerekmektedir. Burada, ağda tüketilen toplam güç ile UT'lerin iletim güçleri arasında bir ödünleşim (trade-off) vardır. Ağdaki BS sayısının azaltılması ile UT'lerin toplam iletim güçlerinin nasıl etkilendiğinin incelenmesi ve en az etkilenmelerini sağlayacak algoritmaların geliştirilmesi bu çalışmanın öncelikli amacıdır.

BS'lerin açık (etkin) veya kapalı olmak üzere iki durumu vardır ve makro BS'lerin her zaman açık kalması, piko BS'lerin ise açık veya kapalı olabilmesi öngörülmektedir. Piko BS'ler için açık/kapalı durumlarından birisi seçilerek oluşabilecek dizilim veya birleşim (kombinasyon) sayısı oldukça yüksek bir sayıdır. M piko BS sayısını göstermek üzere oluşabilecek birleşim sayısı 2^M dir ve bu yüzden bu sayıdaki birleşimin tek tek incelenmesi uygulanabilirlik bakımından olası değildir. Bundan dolayı, bu çalışmada hızlı ve basit özelliklere sahip, "UT-farkındalıklı hücre kapatma (CSO)" adı verilen sezgisel bir algoritma önerilmektedir. Bu algoritma, literatürde "hücre-zumlama (cell-zooming)" ([34]) olarak bilinen algoritma gibi belirli bir kıstasa göre BS'leri birer birer kapatmaktadır. Başka bir deyişle her adımda açık BS sayısı kadar durumu incelemesi gerektiği için en fazla $M(M+1)/2$ farklı birleşimi test etmesi gerekmektedir. Bu yüzden, sezgisel algoritmalar optimum sonuç vermeseler de uygulanabilirliği açısından yaygın olarak kullanılmaktadır.

Önerilen algoritma, hücre-zumlama algoritması ile benzer biçimde çalışmaktadır. Hücre-zumlama algoritması BS'leri trafik yüklerine göre sıralamakta ve en az trafik yüküne sahip olandan başlayarak kapatmaktadır. Burada önerilen algoritmanın temel farkı sıralama kistası olarak trafik yükü yerine bir BS kapatıldığında UT'lerin toplam iletim gücünün ne kadar artacağı bilgisinin kullanılmasıdır. Altının çizilmesi gereken bir nokta, hücre-zumlama algoritmasının önerildiği [34]'te homojen ağların düşünülmesi, girişimin ihmal edilmesi, UL tarafının göz önünde bulundurulmaması gibi nedenlerle bu tezde önerilen algoritmanın hücre-zumlama algoritmasından önemli farkları vardır.

Bir BS kapatıldığında ona bağlı olan UT'lere komşu BS'ler tarafından servis götürülmekte ve her bir UT aldığı en yüksek taraflı işaret gücüne sahip BS'ye bağlanmaktadır. UT ile komşu BS arasındaki yol kaybının önceki duruma göre fazla olması nedeni ile UT'nin iletim gücünü artırması gerekmektedir. UT'lerin toplam iletim güçlerindeki artış $\Delta P_{S,m} = P_S - P_{S,m}$ biçiminde verilmektedir. Burada $P_S = \sum_i^N P_i^U$ UT'lerin o anki toplam iletim gücü ve $P_{S,m}$, BS m kapatıldığında UT'lerin toplam güçleridir. Önerilen sezgisel algoritma sıralama ölçütü olarak $\Delta P_{S,m}$ yi kullanmaktadır ve kapatma işlemine minimum $\Delta P_{S,m}$ ye sahip olan BS'den başlamaktadır.

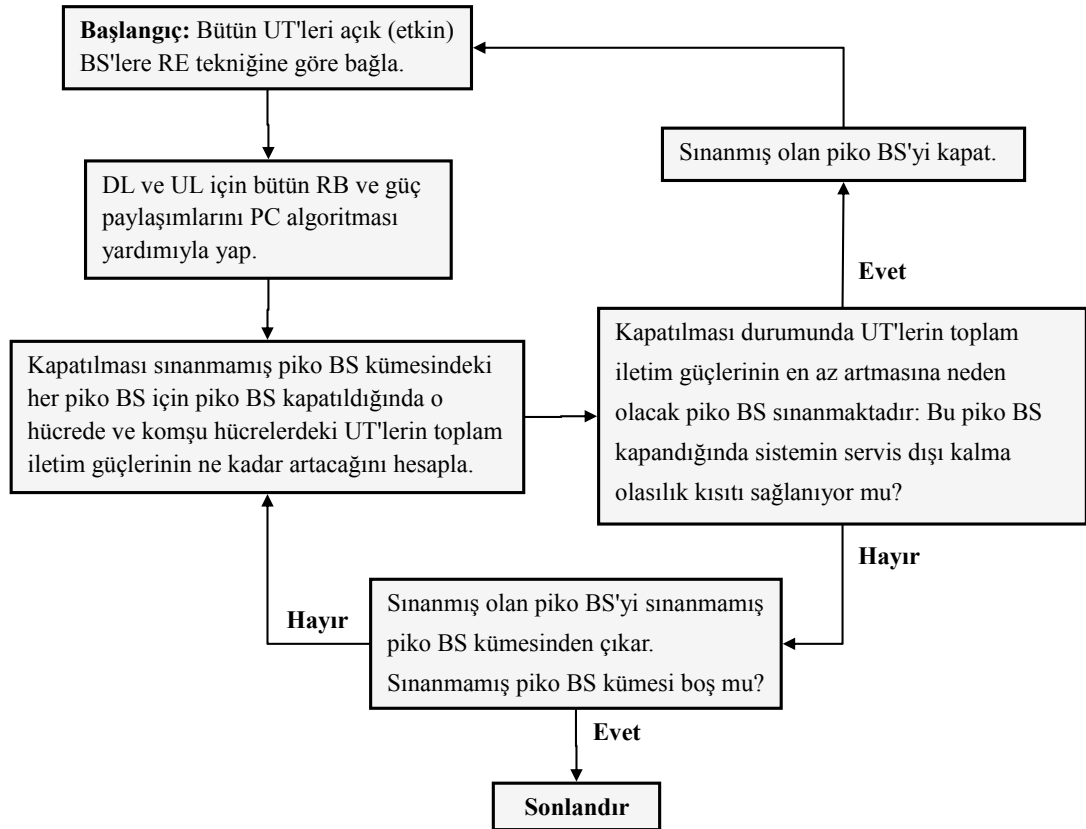
Önerilen hücre kapatma algoritmasının çalışabilmesi için bazı ek işaretlerin iletimine gereksinim vardır. Örneğin, UT'lerin ve BS'lerin konum bilgisinin hücre kapatmaya karar verecek merkez istasyon tarafından bilindiği varsayılmaktadır. Bundan dolayı, ağın durumuna ilişkin bilginin belirli periyotlarda merkezi istasyon tarafından toplanması gerekmektedir. Sonrasında, hangi BS'lerin kapatılacağına önerilen sezgisel algoritma tarafından karar verilmekte ve bütün BS'ler hangi BS'lerin kapatılacağına ilişkin bilgilendirilmektedir. Son olarak da kapatılacak hücrelerin UT'leri komşu BS'lere hücre kapatma işlemi başlamadan önce aktarılmaktadır.

UT-farkındalıklı CSO algoritmasının geliştirilebilmesi için bazı yeni değişkenlerin tanımlanması gerekmektedir:

- $\mathbf{X} = [x_{m,i}]_{N \times N_A}$, burada $x_{m,i} \in \{0,1\}$ ve $x_{m,i}$ BS m ile UT i birbirine bağlı olduklarında 1 değerini alan, diğer durumda 0 olan bir değişkendir.

- $\mathbf{W} = [w_{m,i}^D]_{N \times N_A}$ olup $w_{m,i}^D$ BS m tarafından gönderilen işaretler için UT i tarafından taraflı alınan işaret gücüdür.
- $\mathbf{B}^D = [B_{m,i}^D]_{N \times N_A}$ DL için paylaşırlan bant genişliklerini göstermektedir.
- $\mathbf{B}^U = [B_{m,i}^U]_{N \times N_A}$ UL için paylaşırlan bant genişliklerini göstermektedir.
- $\mathbf{P}^D = [P_{m,i}^D]_{N \times N_A}$ DL için BS'lerin UT'lere ayrılan iletim güçlerini göstermektedir.
- $\mathbf{P}^U = [P_i^U]_{N \times 1}$ UT'lerin güç seviyelerini göstermektedir.
- $\mathbf{P}_{dif} = [\Delta P_{S,m}]_{1 \times N_A}$ olup $\Delta P_{S,m}$ BS m kapatıldığında bütün UT'lerin toplam iletim güçlerindeki artışı göstermektedir.

Önerilen UT-farkındalıklı CSO algoritması için sözde kod Algoritma 2'de ve akış diyagramı da Şekil 5.4'te verilmektedir..



Şekil 5.4 : Önerilen sezgisel UT-farkındalıklı CSO algoritmanın akış diyagramı.

Algoritma 2 UT-farkındalıklı CSO algoritması.

Girdiler: W **Çıktılar:** X, B^D, B^U, P^D, P^U

```
1:  $X \leftarrow 0$ 
2:  $P_{dif} \leftarrow 0$ 
3:  $T \leftarrow$  Bütün piko BS'lerin oluşturduğu kümedir.
4: Her bir UT  $i$  yi en yüksek  $w_{m,i}^D$  ye sahip BS  $m$ 'ye eşleştir.
5:  $X$ 'i güncelle.
6: PC algoritmaları (Algoritma 1) yardımı ile  $B^D, P^D, B^U$  ve  $P^U$  terimlerini bul.
7: while  $T \neq \emptyset$  do
8:   for Her bir BS  $j \in T$  do
9:     BS  $j$  nin kapatıldığını varsay.
10:     $S_j$  deki UT'leri komşu BS'lerden en yüksek taraflı alınan işaret gücüne sahip olanlar ile eşleştir.
11:    PC algoritmaları (Algoritma 1) yardımı ile  $B^D, P^D, B^U$  ve  $P^U$  terimlerini bul.
12:    UT'lerin toplam iletim güçlerinin ( $P_S$ ) hesapla.
13:  end
14:   $P_{dif}$  terimini güncelle.
15:  En küçük  $P_{dif}$  değerine sahip BS  $m$ 'yi seç.
16:   $S_m$  deki UT'leri komşu BS'lerden en yüksek taraflı alınan işaret gücüne sahip olanlar ile eşleştir.
17:  if (Servis dışı kalma olasılık kısıtı sağlandı) then
18:    BS  $m$  yi kapa.
19:     $X$ 'i güncelle.
20:    PC algoritmaları (Algoritma 1) yardımı ile  $B^D, P^D, B^U$  ve  $P^U$  terimlerini güncelle.
21:     $A = A - \{m\}$ .
22:     $T = T - \{m\}$ .
23:  else
24:     $T = T - \{m\}$ .
25:  end
26: end
```

5.4 Başarım Değerlendirmesi

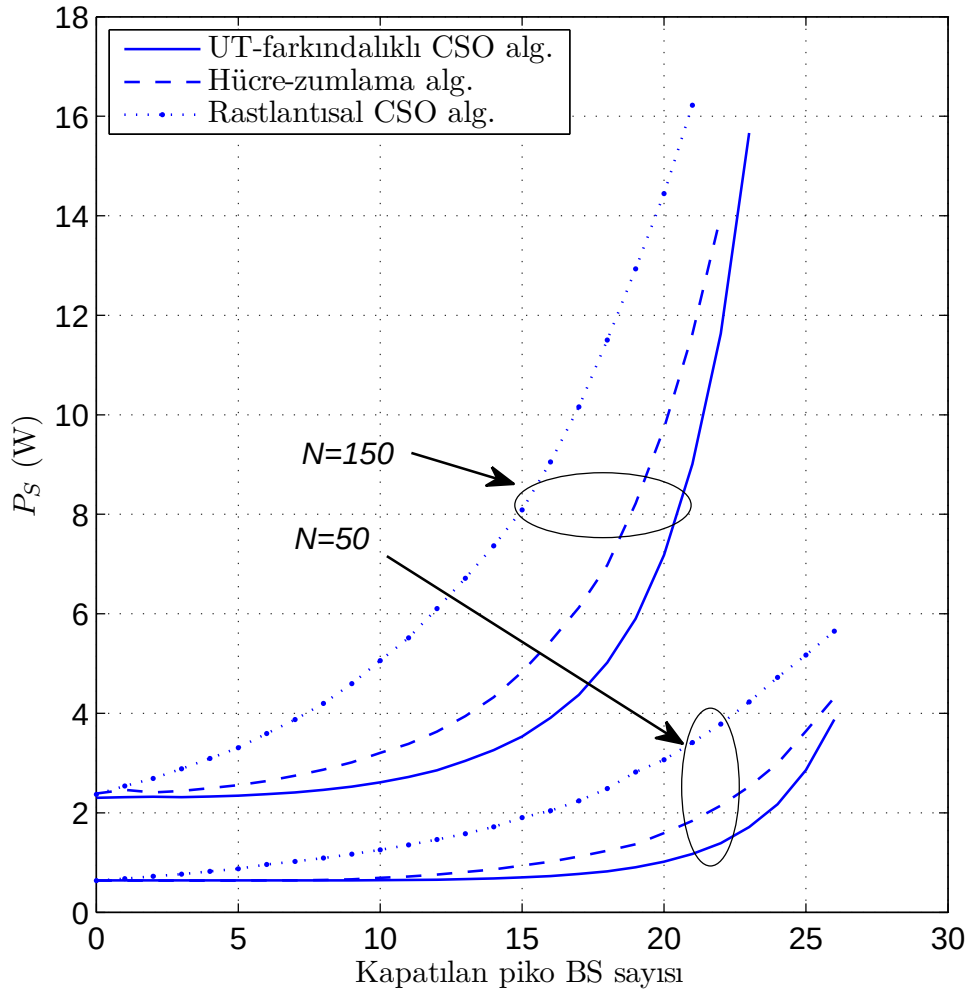
Bilgisayar benzetimleri sırasında kullanılan sistem değişkenleri Çizelge 5.2’de verilmektedir. Buradaki değişken değerleri [39] ve [45] makalelerinden alınmıştır ve bu değerler LTE standartları ile tutarlıdır.

Çizelge 5.2 : Sistem değişkenleri.

Değişken	Değişkenin değeri
BS’nin toplam bant genişliği (B_{BS})	10 MHz
Makro BS’nin maksimum iletim gücü	20 W
Piko BS’nin maksimum iletim gücü (P_{BS})	1 W
UT’nin maksimum iletim gücü (P_{max}^U)	250 mW
Yol kaybı modeli	$30 + 36.7 \log(d) + X_\sigma$
X_σ ’nin standart sapması	8 dB
UT’nin DL veri hızı (R_{dl})	500 kbps
UT’nin UL veri hızı (R_{ul})	300 kbps
Termal gürültü (N_0)	-174 dBm/Hz
Gürültü sabiti (N_f)	10 dB
BS’ler arası uzaklık	500 m
BS ile UT arasındaki minimum uzaklık	10 m
Makro BS’lerin sayısı	4
Piko BS’lerin sayısı (M)	20, 30, 40
UT’lerin sayısı (N)	50, 100, 150
İzin verilen maksimum toplam servis dışı kalma olasılığı	%2

Şekil 5.5’te normalize CoV, 1’e eşit olduğunda kapatılan piko BS sayısına bağlı olarak UT’lerin toplam iletim gücü’nün (P_S) değişimi UT-farkındalıklı CSO algoritması için incelenmektedir. Başarım karşılaştırmalarında iki referans algoritma ele alınmaktadır: hücre-zumlama ve rastlantısal CSO algoritması [37]. Rastlantısal CSO algoritmasında trafik yoğunluğu için bir eşik değeri belirlenmekte ve trafik yoğunluğu bu eşik değerinin altında kalan BS’ler tamamen rastlantısal bir sıra ile kapatılmaktadır. Bu yüzden oldukça basit ve uygulanabilir bir CSO algoritmasıdır. Bilgisayar benzetimleri sırasında trafik yoğunluğu için eşik değeri maksimum yoğunluğun %50’si olarak alınmaktadır.

Burada önemli bir nokta şudur ki CSO algoritmaları için BS kapatabilme kapasitesi, yani istenen servis kalitesini sağlamak kaydıyla kapatılabilecek maksimum BS sayısı, önemli bir başarım göstergesi olmasına rağmen, gerçek sistemlerde maksimum sayıda BS kapatmak uygulama açısından istenen bir durum değildir. Çünkü burada ele alınan üç CSO algoritmasında da hücre-kapatma işleminin belirli periyotlarda yapılması,



Şekil 5.5 : Kapatılan piko BS sayısına bağlı olarak UT'lerin toplam iletim güçlerinin (P_S) karşılaştırması (CoV = 1).

örneğin saatte bir veya iki kez, öngörülmektedir. Eğer maksimum sayıda BS kapatılırsa, bu periyotlar arasında istenebilecek ek bir veri trafiğinin karşılanması olası olmayacak ve yeni eklenen UT'lerin engellenmesi söz konusu olacaktır. Bu yüzden bu çalışmada her algoritma için maksimum kapatabileceği BS sayısının belirli bir oranının, örneğin %80'inin, kapatıldığı durumdaki UT güç tüketimleri temel alınarak karşılaştırmalar yapılmaktadır.

Şekil 5.5'te gözlemlenebileceği gibi BS kapatma kapasiteleri açısından üç algoritma da birbirine yakın başarımlara sahip olmasına rağmen, P_S tasarrufu açısından UT-farkındalıklı CSO algoritması karşılaştırılan her iki algoritmadan çok daha üstündür. Örneğin UT sayısı 50 iken, maksimum kapatabildikleri BS sayısının yaklaşık %80'i olan 20 piko BS kapatıldığında, P_S bakımından UT-farkındalıklı CSO

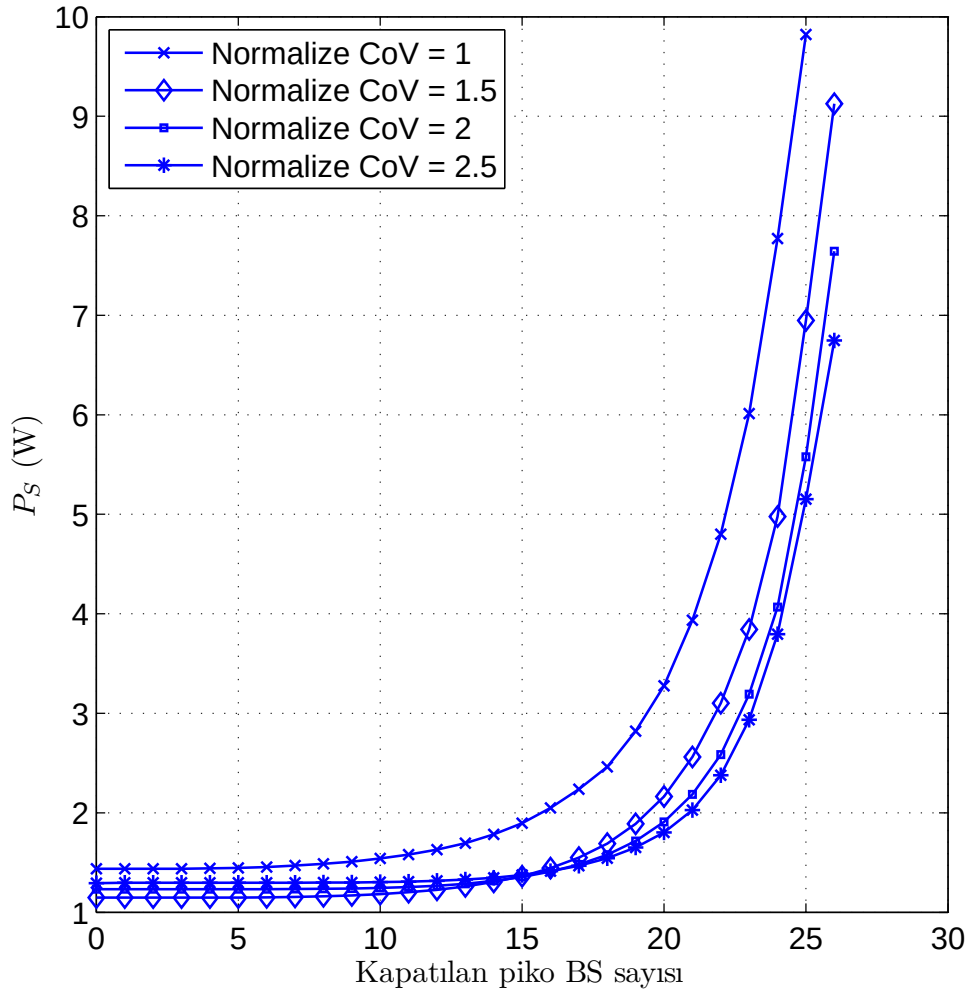
algoritması hücre-zumlama algoritmasından %45, rastlantısal CSO algoritmasından %70 daha düşük değerlere sahiptir. Aynı şekilde UT sayısı 150 iken, maksimum kapatabildikleri BS sayısının yaklaşık %80'i olan 18 piko BS kapatıldığında, bu oranlar sırasıyla %30 ve %60'dır. Önerilen algoritmanın bu başarıyı elde etmesinin en önemli nedeni, algoritmanın hücelere ilişkin anlık trafik bilgisinin yanında hücrelerin kapatılması durumunda UT'lerin iletim güçlerinin nasıl etkileneceğinin de hücre kapatma kararları için bir değişken olarak kullanılmasıdır. Başka bir deyişle, bir hücrenin kapatılması durumunda UT'lerin güçlerinin ne olacağına yönelik geleceğe ait bilgi kullanılmaktadır. Hücre-zumlama ve rastlantısal CSO algoritmalarında ise yalnızca o andaki trafik bilgisi kullanılmakta ve bu bilgiye göre karar verilmektedir. Hücre-zumlama algoritmasının rastlantısal CSO algoritmasından daha yüksek başarıma sahip olması nedeni ile tezin bu bölümünün devamında karşılaştırmalar hücre-zumlama algoritması temel alınarak yapılacaktır.

Şekil 5.6'da önerilen UT-farkındalıklı CSO algoritmasının, trafiğin heterojenlik seviyesinin (CoV) artmasıyla, P_S tasarrufu açısından başarımının da arttığı gözlemlenmektedir. Bundan daha önemlisi, Şekil 5.7'de görülebileceği gibi CoV'nin artmasıyla önerilen algoritmanın hücre-zumlama algoritmasına kıyasla P_S tasarruf başarımı daha da artmaktadır. Şekil 5.7'de, UT-farkındalıklı CSO ile hücre-zumlama algoritmalarının P_S tasarruflarını karşılaştırmak için "karşılaştırmalı UL güç kazancı (%)" tanımı yapılmaktadır. Karşılaştırmalı UL güç kazancı, BS kapatma kapasitelerinin yaklaşık %80'i oranında piko BS kapatıldığında,

$$\text{Karşılaştırmalı UL güç kazancı} = \frac{P_S (\text{hücre-zumlama}) - P_S (\text{UT-farkındalıklı CSO})}{P_S (\text{hücre-zumlama})}$$

biçiminde tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle, önerilen algoritmanın hücre-zumlama algoritmasına göre oransal olarak P_S 'den ne kadar tasarruf sağladığını göstermektedir. $N = 50$ iken ve CoV, 1'den 2.5'e artarken önerilen algoritmanın karşılaştırmalı UL güç kazancı da %25'ten %33'e artmaktadır. Aynı şekilde, $N = 100$ iken %25'ten %33'e ve $N = 150$ iken de %35'ten %44'e artmaktadır. Şekil 5.7'den çıkarılabilecek önemli bir sonuç hem UT sayısı hem de trafiğin heterojenlik seviyesi artarken UT-farkındalıklı CSO algoritmasının hücre-zumlama algoritmasına göre karşılaştırmalı UL güç kazancı da önemli ölçüde artmaktadır.

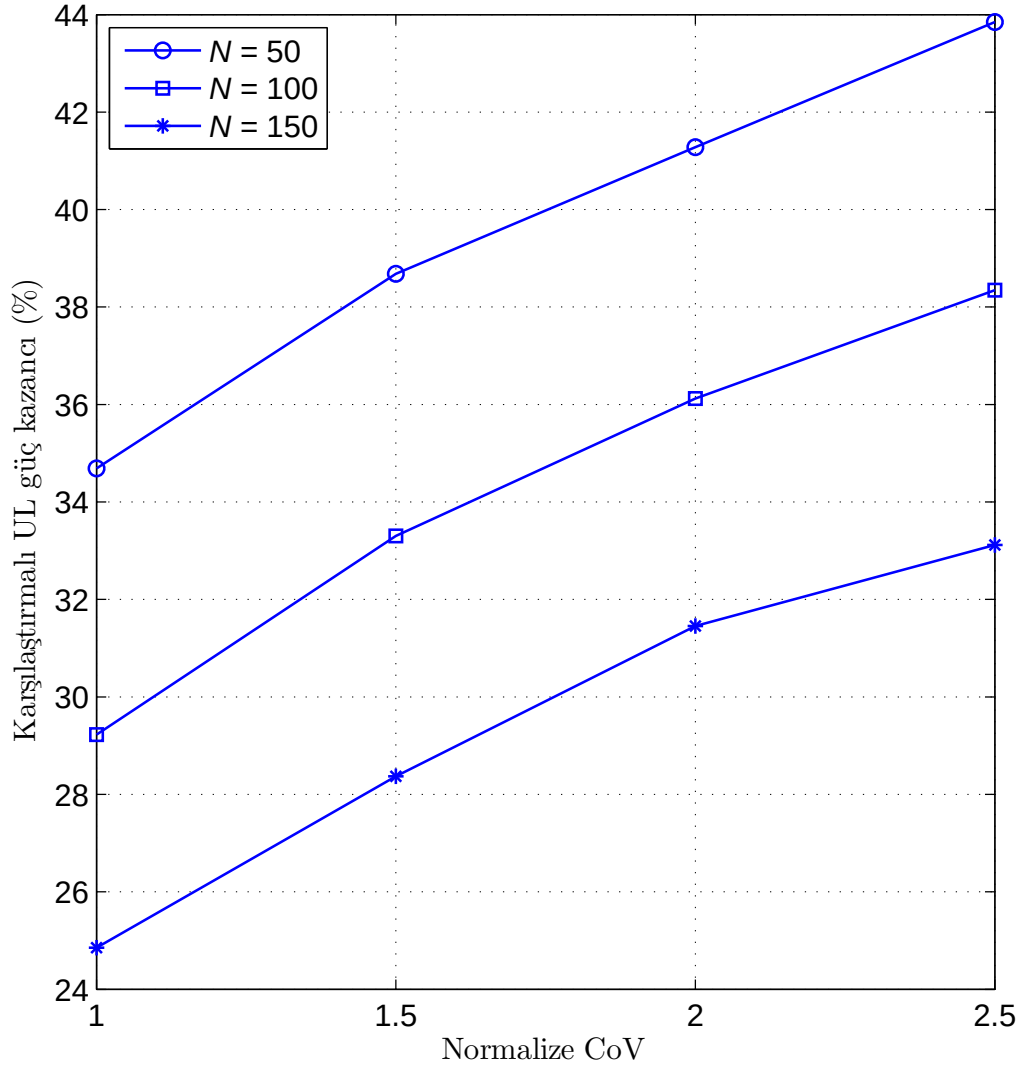
Önerilen algoritmanın karşılaştırmalı UL güç kazancı, piko BS sayısına bağlı olarak Şekil 5.8 ve 5.9'da, sırasıyla CoV = 1 ve CoV = 2.5 değerleri için gösterilmektedir.



Şekil 5.6 : UT-farkındalıklı CSO algoritması için farklı heterojenlik düzeylerinde kapatılan piko BS sayısına bağlı P_S ($N = 100$).

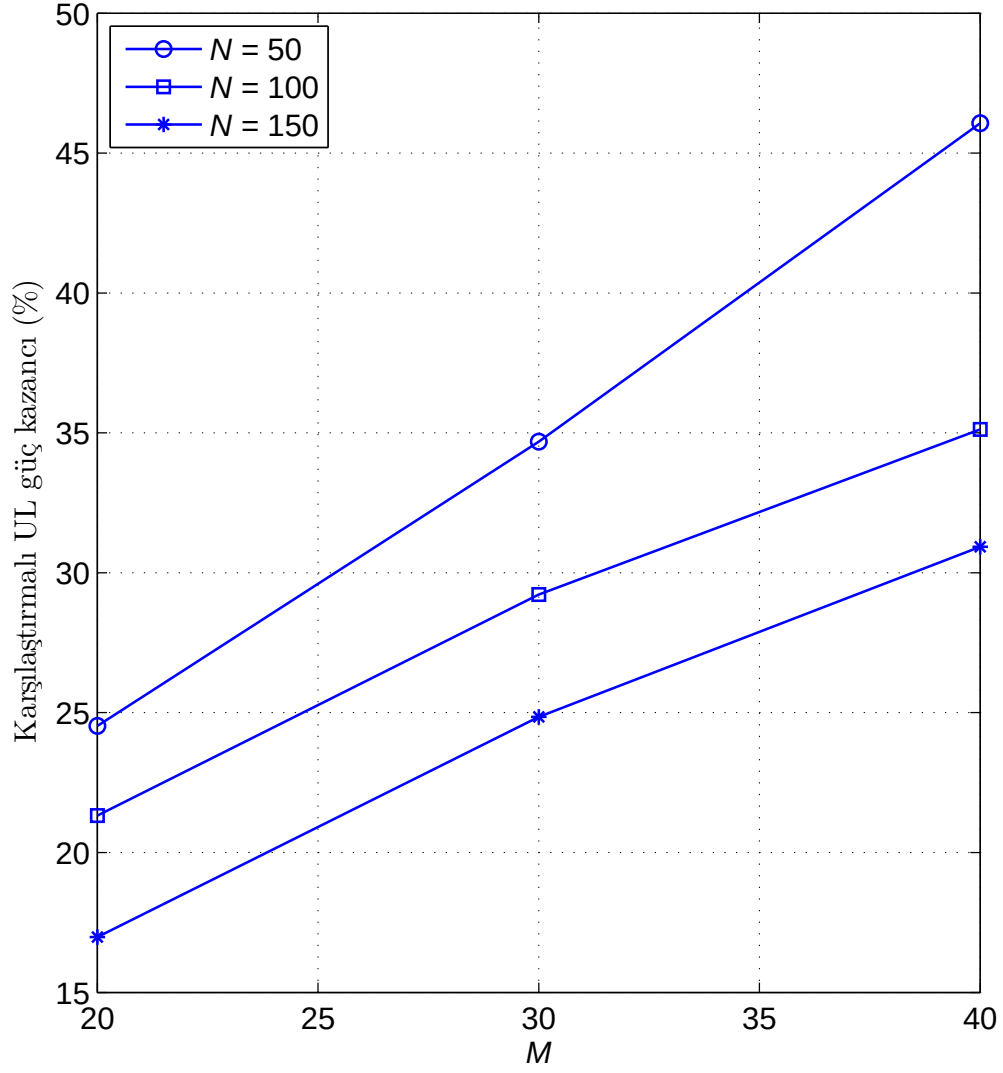
Genel olarak bakıldığında piko BS sayısındaki artış karşılaştırmalı UL güç kazancını da artırmaktadır. Örneğin $\text{CoV} = 1$ olduğunda, piko BS sayısı 20 iken UT sayısına bağlı olarak %17-25 karşılaştırmalı UL güç kazancı elde edilmesine karşın piko BS sayısı 40 iken bu oran %31-45'e çıkmaktadır. Aynı şekilde, $\text{CoV} = 2.5$ olduğunda, UT-farkındalıklı CSO algoritmasının karşılaştırmalı UL güç kazancı, UT sayısına bağlı olarak piko BS sayısı 20 iken %28-33 ve 40 iken %46-60 arasında olmaktadır. Sonuç olarak, piko BS sayısındaki artış karşılaştırmalı güç kazancını da artırmaktadır ve gerçek sistemlerde BS sayısının fazla olması nedeni ile önerilen algoritma daha da avantajlı hale gelmektedir.

Son olarak ise UT-farkındalıklı CSO algoritması hücre-kapatma kapasitesi, yani kapatabileceği maksimum piko BS sayısı açısından Şekil 5.10'da incelenmektedir.

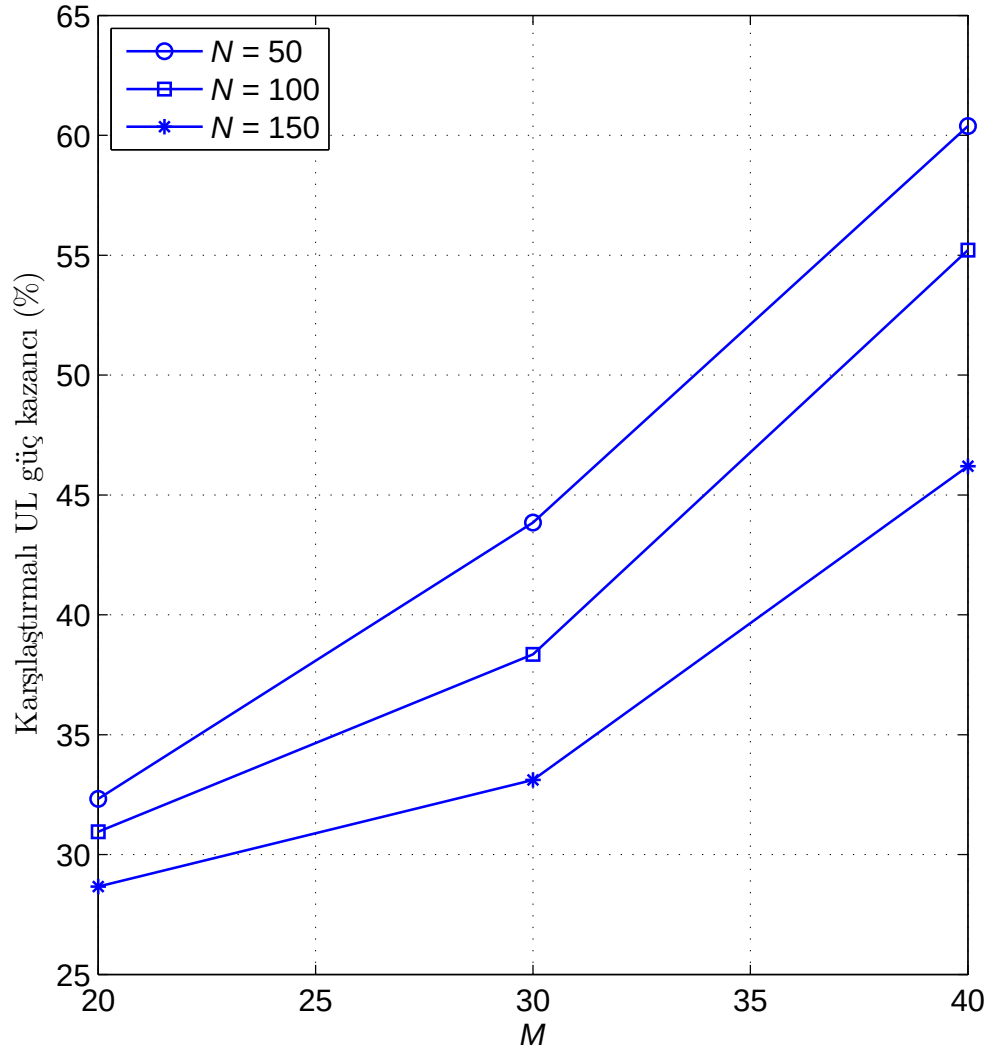


Şekil 5.7 : UT-farkındalıklı CSO algoritmasının hücre-zumlaması algoritmasında göre karşılaştırmalı UL güç kazancının CoV ile ilişkisinin farklı N değerleri için değişimi ($M = 30$).

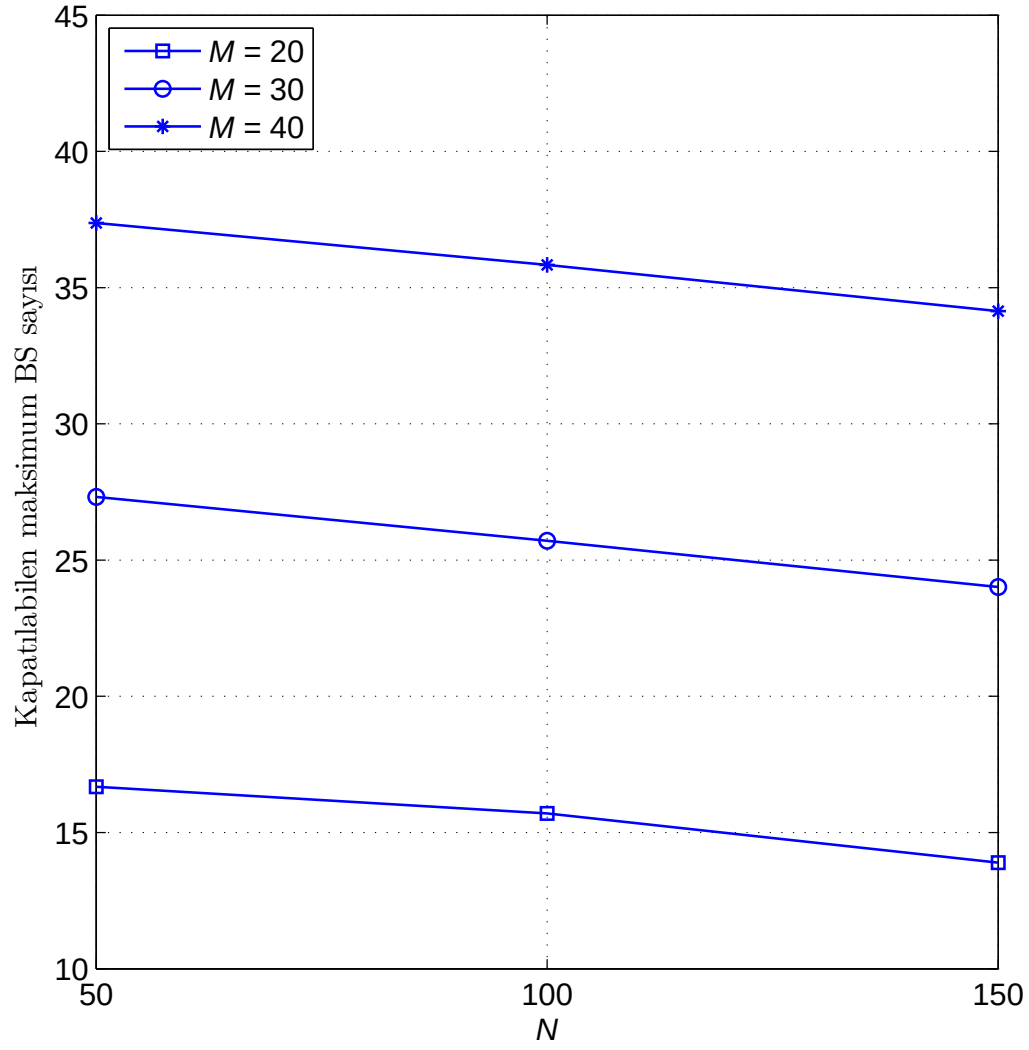
Trafik yoğunluğunun düşük olduğu durumlarda piko BS'lerin büyük çoğunluğunun kapatılabildiği gözlemlenmektedir. Örneğin, $N = 50$ iken piko BS'lerden ortalama olarak yaklaşık 3 tanesinin açık olması yeterlidir ve $N = 150$ iken bu sayı yaklaşık 6'ya çıkmaktadır. Burada son durumda açık kalan piko BS sayısı başlangıç durumundaki piko BS sayısından çok fazla etkilenmektedir. Yani $N = 150$ iken $M = 20$ olduğunda ortalama 6.2 ve $M = 40$ olduğunda ortalama 5.9 piko BS son durumda açık kalmaktadır. Ancak Şekil 5.8 ve 5.9'dan görülebileceği gibi piko BS sayısının fazla olması UT güç tasarrufu açısından önemlidir çünkü piko BS sayısının fazla olması olası hücre kapatma birleşimlerinin sayısını artırmakta ve bu da daha iyi bir birleşimin seçilme olasılığını artırmaktadır.



Şekil 5.8 : UT-farkındalıklı CSO algoritmasının hücre-zumlama algoritmasına göre karşılaştırmalı UL güç kazancının M ile ilişkisinin farklı N değerleri için değişimi ($\text{CoV} = 1$).



Şekil 5.9 : UT-farkındalıklı CSO algoritmasının hücre-zumlama algoritmasına göre karşılaştırmalı UL güç kazancının M ile ilişkisinin farklı N değerleri için değişimi (CoV = 2.5).



Şekil 5.10 : Farklı M ve N değerleri için UT-farkındalıklı CSO algoritmasının kapatabileceği maksimum BS sayısı.

6. SONUÇ

Bu tezde telsiz ağlarda enerji verimliliğini (EE) artırmak için ikisi röle ağlarında ve birisi de hücresel ağlarda olmak üzere 3 farklı yöntem önerilmiştir. Önerilen ilk yöntem olan enerji verimlilikli röle seçme yöntemi rölelerin gezgin olduğu ve rastlantısal dağıldığı geniş ölçekli ağlar için oldukça uyumlu bir yöntemidir. Burada rölelerin saptanması, rölelere zaman aralıklarının atanması, röle seçimi ve veri iletimi aşamaları olmak üzere bütün aşamalarda, devrelerde harcanan enerji, kontrol paketlerinin iletimi için harcanan enerji ve veri iletimi için harcanan enerji gibi bütün enerji tüketim kaynakları hesaba katılmış ve bu sayede ayrıntılı ve gerçekçi bir güç tüketim modeli ele alınmıştır. Geniş ölçekli ağlarda EE'yi artırmak adına yalnızca içerisindeki rölelerin etkin olduğu ve röle seçimine katıldığı bir etkin röle alanı (ERA) tanımlanmıştır. Bu sayede röle seçimine konu olan röle sayısı kısıtlanmış ve rölelerle ilgili kanal bilgisinin elde edilmesi, kaynak atamaları için gerekli kontrol paket iletimi gibi röle sayısına bağlı enerji tüketiminde tasarruf sağlanmıştır. Aynı zamanda ERA'nın dışındaki rölelerin düşük güç tüketimi için uyku moduna geçmelerinin sağlanması ile de enerji verimliliği artırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Elde edilen önemli bir sonuç, röle sayısının yüksek olduğu ağlarda röle seçimi için devrelerde tüketilen enerji ve röle seçimi sırasında gereksinim duyulan ek işaret yükünden kaynaklı enerjinin toplam tüketilen enerji içerisinde önemli bir yüzdeye sahip olduğunun gözlemlenmesidir. Bu nedenle bu sözü edilen enerjilerin ihmal edilmesi durumunda elde edilen sonuçların doğru olmayacağı anlaşılmıştır.
- Bunun yanında, devrelerde harcanan enerji göz önünde bulundurulduğunda, ERA'nın tanımlanmasının enerji verimliliğine sağladığı önemli katkı gözlemlenmiştir. Kaynak-hedef arası uzaklığa bağlı olarak EE'yi maksimum yapan optimum ERA büyüklüğü, dolayısıyla optimum ortalama etkin röle sayısı bulunmuştur. Bulunan optimum ortalama etkin röle sayısının düşük olması (yaklaşık 3-4) ve optimum değeri aştığında EE'nin hızlı bir şekilde düştüğünün

gözlemlenmesi ile geniş ölçekli ağlarda EE açısından ERA tanımlanarak etkin röle sayısını kısıtlanmasının önemi daha iyi anlaşılmaktadır.

- EE'nin veri hızına bağlı değişimi gözlemlenmiş ve EE'yi maksimum yapan veri hızı kaynak-hedef arası uzaklığa bağlı olarak bulunmuştur.
- Önerilen yöntem için etkin veri hızı analizleri yapılmış ve sistem değişkenleri EE'yi maksimum yapacak şekilde belirlendiğinde etkin veri hızının bundan nasıl etkilendiği gözlemlenmiştir. Önerilen yöntem iki referans yöntemle karşılaştırılmış ve hem EE hem de etkin veri hızı açısından çok daha yüksek başarıma sahip olduğu gösterilmiştir. Önerilen yöntemin referans yöntem olan Aloha-temelli röle seçme yöntemiyle karşılaştırıldığında enerji bakımından %10 daha verimli ve aynı zamanda %150 daha yüksek etkin veri hızına sahip olduğu bilgisayar benzetimleri ile ortaya konmuştur.

Tezde ikinci olarak, iki atlamalı ve iki röleli ağlar için enerji verimliliğini artıracak bir iletim yöntemi önerilmiştir. DF tekniğiyle çalışan iki rölenin kendi aralarında iletişim kurabildiği varsayılmış ve bu sayede hedefe tek bir rölenin paketi iletilmesinden her iki röleden birden gönderilerek çok-yollu çeşitleme kazancı sağlanmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Kaynak-röle, röleler arası ve röle-hedef arasındaki iletim için veri hızları ayrı ayrı tanımlanmış ve enerji verimliliğini maksimum yapan veri hızları bulunmuştur.
- EE'yi ve etkin veri hızını maksimum yapan röle konumları bulunmuştur.
- Literatürde aynı ağ yapısı için önerilmiş olan ardışık iletim (SR) yöntemiyle karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin hem EE hem de etkin veri hızı açısından üstün olduğu gösterilmiştir.
- Bunun yanında, önerilen yöntemin başarımının rölenin konumundaki değişikliklerden SR yöntemine kıyasla daha az etkilendiği gösterilmiştir. Çünkü röleler optimum konumlarından uzaklaştığında önerilen yöntemin SR yöntemine göre EE ve etkin veri hızı kazançlarının artmakta olduğu bilgisayar benzetimleri ile gözlemlenmiştir.

Bu tezde önerilen son yöntem ise hücresel ağlarda EE'yi artırmaya yönelik olarak kullanıcı farkındalıklı bir hücre kapatma (veya BS kapatma) algoritması önerilmiştir. Hücre kapatma yöntemleri ağda harcanan toplam enerjiyi azaltmasına rağmen sabit bir güç kaynağına bağlı olmayan UT'lerin pil ömrünü de azaltmaktadır. Ancak hücre kapatma ile ilgili literatürde UT'lerin ortalama güç tüketimini başarımlı ölçütü olarak ele alan bir çalışma yoktur. Bu çalışmada ise bütün ağın enerji verimliliğinin yanında UT'lerin harcadığı enerjiyi de göz önünde bulunduran bir hücre kapatma algoritması geliştirilmiştir. Heterojen ağlar göz önünde bulundurulmuş ve heterojenlik hem BS'lerde hem de trafik yükünün dağılımında olmak üzere iki taraflı olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Anlık trafik bilgisine bağlı olarak iletişimin DL ve UL taraflarını beraberce ele alan literatürdeki ilk hücre kapatma algoritması önerilmiştir.
- DL/UL güç kontrol algoritmaları ile basit bir girişim modeli de önerilmiştir.
- Heterojenlik seviyesindeki değişime göre önerilen algoritmanın hücre kapatma kapasitesi ve toplam UT güç tüketim analizleri yapılmıştır. Heterojenlik arttıkça hücre kapatma kapasitesinin arttığı ve toplam UT güç tüketiminin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Önerilen algoritma literatürdeki hücre zumlama algoritması ile karşılaştırılmış sistem değişkenlerine bağlı olarak aynı sayıda BS kapatıldığında toplam UT güç tüketiminde %30 ile %60 arasında tasarruf sağlanabildiği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Chilamkurti, N., Z.S. ve Mentiplay, F.** (2009). Green networking for major components of information communication technology systems, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009.
- [2] **Chen, Y., Z.S. ve Xu, S.** (2011). Fundamental trade-offs on green wireless networks, *IEEE Communication Magazine*, 49(6), 30–37.
- [3] **Li, G.Y., X.Z. ve Xiong, C.** (2011). Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues, *IEEE Wirel. Commun.*, 18(6), 28–35.
- [4] **Ajmone Marsan, M., C.L.C.D. ve Meo, M.** (2013). On the effectiveness of single and multiple base station sleep modes in cellular networks, *Elsevier Computer Networks*, 57(17), 3276–3290.
- [5] **Humar, I., G.X.X.L.J.M.C.M. ve Zhang, J.** (2011). Rethinking energy efficiency models of cellular networks with embodied energy, *IEEE Network*, 25(2), 40–49.
- [6] **Son, K. ve Krishnamachari, B.** (2012). SpeedBalance: speed-scaling-aware optimal load balancing for green cellular networks, *IEEE INFOCOM*, Orlando, USA.
- [7] **Paul, U., S.A.B.M. ve Das, S.** (2011). Understanding traffic dynamics in cellular data networks, *IEEE INFOCOM*, Shanghai, China.
- [8] **Miao, G., H.N.L.Y. ve Bormann, D.** (2008). Energy-efficient design in wireless OFDMA, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Beijing, China.
- [9] **Feng, D., J.C. ve Li, G.** (2013). A survey of energy-efficient wireless communications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1), 167–178.
- [10] **Madan, R., M.N.B.M.A. ve Zhang, J.** (2008). Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 7(8), 3013–3025.
- [11] **Klaiqi, B., C.X. ve Zhang, J.** (2016). Energy-efficient and low signaling overhead cooperative relaying with proactive relay subset selection, *IEEE Trans. Commun.*, 64(3), 1001–1015.
- [12] **Bletsas, A., K.A.R.D.P. ve Lippman, A.** (2006). A simple cooperative diversity method based on network path selection, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 24(3), 659–672.

- [13] **Zhou, Z., Z.S.C.J. ve Cui, S.** (2008). Energy-efficient cooperative communication based on power control and selective single-relay in wireless sensor networks, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 7(8), 3066–3078.
- [14] **Xiao, Y. ve Cimini, L.J.** (2011). Energy efficiency of distributed cooperative relaying, *IEEE Milcom*, Baltimore, MD, USA.
- [15] **Amin, O. ve Lampe, L.** (2012). Opportunistic energy efficient cooperative communication, *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 1(5), 412–415.
- [16] **Sheng, Z., F.J.L.C.L.V.L.X. ve Leung, K.** (2015). Energy efficient relay selection for cooperative relaying in wireless multimedia networks, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 64(99), 1156–1170.
- [17] **Huang, R., F.C.Z.T. ve Wang, W.** (2011). Energy-efficient relay selection and power allocation scheme in AF relay networks with bidirectional asymmetric traffic, *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC '11)*, Brest, France.
- [18] **Marchenko, N.** (2013). Resource-efficient relay selection in cooperative wireless networks, *Doktora Tezi*, Alpen-Adria-Universität Klagenfurt, Klagenfurt, Austria.
- [19] **Etezadi, F., Z.K.G.A. ve Affes, S.** (2012). A survey of energy-efficient wireless communications, *Decentralized relay selection schemes in uniformly distributed wireless sensor networks*, 11(3), 938–951.
- [20] **Zhou, Z., Z.S.C.S. ve Cui, J.** (2008). Energy-efficient cooperative communication in a clustered wireless sensor network, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, 57(6), 3618–3628.
- [21] **Li, B., L.H.W.W.Y.Q. ve Liu, H.** (2013). Performance analysis and optimization for energy-efficient cooperative transmission in random wireless sensor network, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 12(9), 4647–4657.
- [22] **Lim, G. ve Cimini, L.J.** (2013). Energy-efficient cooperative beamforming in clustered wireless networks, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 12(3), 1376–1385.
- [23] **Habibi, J., G.A. ve Aghdam, A.** (2015). Optimal cooperative wireless transmission with limited channel state information, *IEEE Trans. Commun.*, 63(12), 4768–4783.
- [24] **Li, B., L.H.W.W.H.Z. ve Yin, Q.** (2013). Energy-effective relay selection by utilizing spacial diversity for random wireless sensor networks, *IEEE Commun. Letters*, 17(10), 1972–1975.
- [25] **Ouyang, F., G.J.G.F. ve Hou, J.** (2015). Random access based blind relay selection in large-scale relay networks, *IEEE Commun. Letters*, 19(2), 255–258.
- [26] **Cui, S., G.A.J. ve Bahai, A.** (2005). Energy-constrained modulation optimization, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 4(5), 2349–2360.

- [27] **Miao, G., H.N. ve Li, G.** (2010). Energy-efficient link adaptation in frequency-selective channels, *IEEE Trans. Commun.*, 58(2), 545–554.
- [28] **Isheden, C., C.Z.J.E. ve Fettweis, G.** (2012). Framework for link-level energy efficiency optimization with informed transmitter, *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 11(8), 2946–2957.
- [29] **Li, C., S.S.H.Z.J. ve Letaief, K.B.** (2012). Maximizing energy efficiency in wireless networks with a minimum average throughput requirement, *IEEE Wireless Communications and Network Conf. (WCNC)*, Shanghai, China.
- [30] **Cui, S., G.A. ve Bahai, A.** (2004). Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO in sensor networks, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 22(6), 1089–1098.
- [31] **Heliot, F., I.M.A. ve Tafazolli, R.** (2012). Energy-efficient power allocation for point-to-point MIMO systems over the rayleigh fading channel, *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 1(4), 304–307.
- [32] **Li, C., Z.W.P. ve Yang, L.** (2015). Optimal energy to spectral-efficiency trade-off in cooperative networks, *Wireless Personal Communications*, 80(3), 1–20.
- [33] **Bae, C. ve Stark, W.** (2009). End-to-end energy-bandwidth trade-off in multihop wireless networks, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 55(9), 4051–4066.
- [34] **Niu, Z., W.Y.G.J. ve Yang, Z.** (2010). Cell zooming for cost-efficient green cellular networks, *IEEE Commun. Magazine*, 48(11), 74–79.
- [35] **Alaca, F., B.S.A. ve Yanikomeroglu, H.** (2012). A genetic algorithm based cell switch-off scheme for energy saving in dense cell deployments, *IEEE Globecom Workshops*, Anaheim, USA.
- [36] **Suarez, L.A., N.L. ve Bonnin, J.M.** (2012). Analysis of the overall energy savings achieved by green cell-breathing mechanisms, *Sustainable Internet and ICT for Sustainability (SustainIT)*, Pisa, Italy.
- [37] **Micallef, G., M.P. ve Scheck, H.O.** (2010). Cell size breathing and possibilities to introduce cell sleep mode, *European Wireless 2010*, Lucca, Italy.
- [38] **Oh, E., S.K. ve Krishnamachari, B.** (2013). Dynamic Base Station Switching-On/Off Strategies for Green Cellular Networks, *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 12(5), 2126–2136.
- [39] **Bousia, A., A.A.A.L. ve Verikoukis, C.** (2012). ‘Green’ distance-aware base station sleeping algorithm in LTE-Advanced, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, Canada.
- [40] **Kang, T., S.X. ve Zhang, T.** (2012). Base station switching based dynamic energy saving algorithm for cellular networks, *3rd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC 2012)*, Beijing, China.

- [41] **Turyagyenda, C., A.B.K. ve Albeirut, N.** (2013). A novel sleep mode operation for energy efficient LTE cellular networks: A sum product algorithm implementation, *7th International Conference on Next Generation Mobile Apps, Services and Technologies (NGMAST)*, Prague, Czech Republic.
- [42] **Beitalmal, T. ve Yanikomeroglu, H.** (2014). A set cover based algorithm for cell switch-off with different cell sorting criteria, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, Australia.
- [43] **Ajmone Marsan, M., C.L.C.D. ve Meo, M.** (2009). Optimal energy savings in cellular access networks, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Dresden, Germany.
- [44] **Bousia, A., K.E.A.L. ve Verikoukis, C.** (2012). Energy efficient base station maximization switch off scheme for LTE-advanced, *17th IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, Barcelona, Spain.
- [45] **Morosi, S., P.P. ve Del Re, E.** (2013). Improving cellular network energy efficiency by joint management of sleep mode and transmission power, *24th Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications (TIWDC) on "Green ICT"*, Genoa, Italy.
- [46] **Gonzalez G. D., Yanikomeroglu, H.G.L.M. ve Boque, S.R.** (2014). A novel multiobjective framework for cell switch-off in dense networks, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, Australia.
- [47] **Kumar, A. ve Rosenberg, C.** (2015). Energy and throughput trade-offs in cellular networks using base station switching, *IEEE Trans. Mobile Computing*, 15(2), 364–376.
- [48] **Peng, J., H.P. ve Xue, K.** (2014). Stochastic analysis of optimal base station energy saving in cellular networks with sleep mode, *IEEE Commun. Letters*, 18(4), 612–615.
- [49] **Sklar, B.,** (2001). Digital Communications, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 2. sürüm.
- [50] **Rappaport, T.,** (1996). Wireless Communications: Principles and Practice, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- [51] **Goldsmith, A.,** (2005). Wireless Communications, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- [52] **Vucetic, B. ve Yuan, J.,** (2003). Space-Time Coding, John Wiley & Sons, Inc., Chichester, U.K.
- [53] **Alamouti, S.M.** (1998). A simple transmit diversity technique for wireless communications, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1(8), 1451–1458.
- [54] **Hasna, M. ve Alouini, M.** (2003). End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh fading channels, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2(6), 1126–1131.

- [55] **Laneman, J. N., T.D.N.C. ve Wornell, G.W.** (2004). Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 51(12), 3062–3080.
- [56] **Herhold, P., Z.E. ve Fettweis, G.** (2004). A simple cooperative extension to wireless relaying, *International Zurich Seminar on Communications*, Zurich, Switzerland.
- [57] **Boyer, J., F.D.D. ve Yanikomeroglu, H.** (2004). Multihop diversity in wireless relaying channels, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 52(10), 1820–1830.
- [58] **Aydın, I. ve Aygölü, U.** (2015). Performance analysis of a multihop relay network using distributed Alamouti code, *Wireless Networks*, 21(1), 217–226.
- [59] **Laneman, J.N. ve Wornell, G.W.** (2003). Distributed space time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 49(10), 2451–2425.
- [60] **Scutari, G. ve Barbarossa, S.** (2005). Distributed space–time coding for regenerative relay networks, *IEEE Trans. Inform. Theory*, 4(5), 2387–2399.
- [61] **Rankov, B. ve Wittneben, A.** (2007). Spectral efficiency protocols for half-duplex fading relay channels, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 25(2), 379–389.
- [62] **Miao, G., H.N.L.Y. ve Swami, A.** (2009). Cross-layer optimization for energy-efficient wireless communications: a survey, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 9(4), 529–542.
- [63] **Lim, G. ve Cimini, L.J.** (2012). Energy-efficient best-select relaying in wireless cooperative networks, *IEEE Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, Princeton, NJ, USA.
- [64] **Alves, H., S.R.D. ve Fraidenraich, G.** (2014). Outage, throughput and energy efficiency analysis of some half and full duplex cooperative relaying schemes, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 25(11), 1114–1125.
- [65] **RF Transceiver Si4463 Data Sheet**, <http://www.silabs.com>, alındığı tarih: 24.12.2015.
- [66] **Ahmed, I., N.A.M.D.S.S.R. ve Mallik, R.K.** (2012). Relay subset selection and fair power allocation for best and partial relay selection in generic noise and interference, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 1(5), 1828–1839.
- [67] **Krikidis, I., T.J.M.S. ve Goertz, N.** (2008). Amplify-and-forward with partial relay selection, *IEEE Commun. Letters*, 12(4), 235–237.
- [68] **Ding, H., G.J. ve Jiang, Z.** (2010). Asymptotic performance analysis of amplify-and-forward with partial relay selection in Rician fading, *IET Electron. Lett.*, 46(3), 248–250.

- [69] **Nadarajah, S. ve Kotz, S.** (2007). Programs in R for computing truncated t distributions, *Quality and Reliability Engineering International*, 23(2), 273–278.
- [70] **Forbes, C., E.M. ve Hastings, N.**, (2010). Statistical Distributions, Erlang Distribution, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 4. sürüm.
- [71] **Mirahsan, M., S.R. ve Yanikomeroglu, H.** (2015). HetHetNets: Heterogeneous traffic distribution in heterogeneous wireless cellular networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Recent Advances in Heterogeneous Cellular Networks*, 33(10), 2252–2265.
- [72] **Guvenc, I., J.M.R.D.I.K.B. ve Watanabe, F.** (2011). Range expansion and inter-cell interference coordination (ICIC) for picocell networks, *IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC-Fall)*, San Francisco, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: İbrahim AYDIN

Doğum Tarihi ve Yeri: 14.07.1983 Niğde

E-Posta: iaydin@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2006, İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Y. Lisans:** 2010, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Telekomünikasyon Mühendisliği Programı.

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2011-2012 Araştırma Görevlisi - Beykent Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü.
- 2012-2015 Araştırma Görevlisi - Sakarya Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü.
- 2015-Devam Araştırma Görevlisi - İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Aydın, İ.**, Aygölü, Ü., 2016. A New Energy-Efficient Relay Selection Technique for Large-Scale Randomly Distributed Wireless Networks, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* dergisinde yayınlanmak üzere Kasım 2016 tarihinde kabul edildi.
- **Aydın, İ.**, Aygölü, Ü., 2016. An Energy-Efficient Relaying Technique for Two-Hop Diamond Relay Networks, Hakem yorumlarına dayanarak düzeltilmiş versiyonu ikinci kez incelenmek üzere Kasım 2016'da *IET Communications* dergisine gönderildi.
- **Aydın, İ.**, Aygölü, Ü., 2016. Energy-efficient link adaptation for distributed space time block code in wireless relay networks, *Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP)*, Temmuz 21-23, 2016, Konya, Türkiye.
- **Aydın, İ.**, Yanikomeroglu, H., Aygölü, Ü., 2015. User-aware cell switch-off algorithms, *11th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Ağustos 24-28, 2015, Dubrovnik, Hırvatistan.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Aydın, İ.**, Aygölü, Ü., 2015. Performance analysis of a multihop relay network using distributed Alamouti code, *Wireless Networks*, 21(1), 217–226.
- **Aydın, İ.**, Aygölü, Ü., 2009. Çok Atlamalı Telsiz Ağlar İçin Art Arda Bağlanmış Dağıtılmış Alamouti Uzay-Zaman Kodu, *Haberleşme Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu (HABTEKUS'09)*, Aralık 9-11, 2009, İstanbul, Türkiye.