

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**UZUN VADELİ EVRİM TEMELLİ HETEROJEN HÜCRESEL  
AĞLARDA GİRİŞİM YÖNETİMİ VE EN İYİ RÖLE SEÇİMİ**

**ETHEM SÖYLEMEZ**

**KOCAELİ 2017**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**UZUN VADELİ EVRİM TEMELLİ HETEROJEN HÜCRESEL**  
**AĞLARDA GİRİŞİM YÖNETİMİ VE EN İYİ RÖLE SEÇİMİ**

**ETHEM SÖYLEMEZ**

**Yrd.Doç.Dr. Sultan ALDIRMAZ ÇOLAK**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**  
**Yrd.Doç.Dr. Sıtkı ÖZTÜRK**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**  
**Yrd.Doç.Dr. Gökçen ÇETİNEL**  
**Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi**



**Tezin Savunulduğu Tarih: 03.07.2017**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, heterojen hücreli ağlarda FAP erişim noktası tarafından girişime maruz kalan bir MBS kullanıcısının, diğer MBS kullanıcılarının desteğiyle söz konusu bu girişimi gidermesi ele alınmıştır. Diğer kullanıcılar röle görevi üstlenerek, kurban durumundaki MBS kullanıcısına yardımcı olmaktadır. MBS kullanıcısına en faydalı olacak kullanıcı en iyi röle seçimi ile belirlenmektedir.

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmamın başından sonuna kadar her türlü desteği benden esirgemeyen, beni motive eden ve cesaretlendiren, her türlü soruma en kısa zamanda cevap veren tez danışmanım Yrd.Doç.Dr. Sultan ALDIRMAZ ÇOLAK hocama minnettarım.

Lisans öğrenimim süresince ve yüksek lisans öğrenimimin başlangıcında tecrübelerini bana aktaran ve araştırma kültürünü kazandıran kıymetli hocam Doç.Dr. İlker BAYRAM'a teşekkürlerimi sunarım.

Bilime ve bilgiye değer veren, çalışanlarını akademik kariyer yapmaya teşvik eden ve bu konuda her türlü desteği sağlayan ülkemizin gözde kurumu TÜBİTAK'a ve gerekli izinleri veren yöneticilerim Ramazan CENGİZ ve Taner ARUK'a içtenlikle teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim boyunca burs vererek maddi destek sağlayan devletime ve bu bursun kaynağı olan millete minnettarım.

Eğitim hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen ailemin bütün fertlerine şükranlarımı sunar, eğitimimde emeği geçen bütün öğretmenlerime minnettarım.

Yüksek lisan öğrenimim boyunca ve tez hazırlama aşamasında beni yüreklendiren ve kendisiyle paylaşmam gereken zamandan feragat eden eşime ve kendisiyle yeterince ilgilenemediğim kızıma teşekkür ederim.

Haziran – 2017

Ethem SÖYLEMEZ

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ÖZET .....	x
ABSTRACT .....	xi
GİRİŞ .....	1
1. GEZGİN HABERLEŞME SİSTEMLERİ .....	4
1.1. Uzun Vadeli Evrim (LTE) Teknolojisi .....	5
1.2. Femto Erişim Noktaları .....	8
1.3. Cihazdan Cihaza Haberleşme .....	9
1.4. LTE’de Girişim Yönetimi .....	10
1.4.1. Girişim engelleme teknikleri .....	11
1.4.2. Girişim giderme teknikleri .....	12
2. KANAL PARAMETRELERİ VE SÖNÜMLEME MODELLERİ .....	15
2.1. Kanal Parametreleri .....	15
2.1.1. Geçikme yayılımı .....	15
2.1.2. Uyumluluk bant genişliği .....	16
2.1.3. Uyumluluk süresi .....	16
2.1.4. Doppler yayılması .....	17
2.2. Sömümlenme Çeşitleri .....	17
2.2.1. Frekans seçici olmayan sömümlenme .....	17
2.2.2. Frekans seçici sömümlenme .....	17
2.2.3. Hızlı sömümlenme .....	18
2.2.4. Yavaş sömümlenme .....	18
2.3. Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü Kanal .....	19
2.4. Sömümlenmeli Kanal Modelleri .....	20
2.4.1. Rayleigh sömümlenmeli kanal .....	20
2.4.2. Rician sömümlenmeli kanal .....	21
2.4.3. Nakagami-m sömümlenmeli kanal .....	23
3. İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME .....	24
3.1. Röleli Haberleşmede Aktarma Yöntemleri .....	25
3.1.1. Kuvvetlendir ve aktar (AF) .....	25
3.1.2. Çöz ve aktar (DF) .....	26
3.2. Alıcıda Birleştirme Yöntemleri .....	26
3.2.1. En büyük oran birleştirmesi .....	27
3.2.2. Eşit kazanç birleştirmesi .....	29
3.2.3. Seçmeli birleştirme .....	29
4. BENZETİM SONUÇLARI .....	32
4.1. Optimum Güç Paylaşımı .....	32
4.1.1. Çöz ve aktar (DF) .....	33
4.1.2. DF için optimum güç seçimi .....	34

4.1.3. Kuvvetlendir ve aktar (AF) .....	35
4.1.4. AF için optimum güç seçimi .....	36
4.1.5. Bilgisayar benzetimi .....	36
4.2. Röleli Haberleşme Modeli ve En İyi Röle Seçimi .....	38
4.2.1. Sistem modeli .....	38
4.2.2. Performans analizi .....	39
4.2.3. Nümerik sonuçlar .....	45
4.3. Röle Açısının Değiştirilmesine Bağlı Performans Analizi .....	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	56
KAYNAKLAR .....	58
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	62
ÖZGEÇMİŞ .....	63



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Heterojen hücreli ağın mimarisi .....	8
Şekil 1.2.	FAP ağ mimarisi .....	9
Şekil 2.1.	Gauss dağılımının $o_{yf}$ 'si, $bdf$ 'si ve AWGN güç spektral fonksiyonu .....	20
Şekil 2.2.	Rayleigh kanalın $\sigma$ bileşenine göre dağılımının $o_{yf}$ 'si .....	21
Şekil 2.3.	Rician kanalın $K$ bileşenine göre dağılımının $o_{yf}$ 'si .....	22
Şekil 2.4.	Nakagami kanalın $m$ bileşenine göre dağılımının $o_{yf}$ 'si .....	23
Şekil 3.1.	Röleli haberleşme diyagramı .....	25
Şekil 3.2.	Röleli haberleşmede kuvvetlendir ve aktar yöntemi .....	25
Şekil 3.3.	Röleli haberleşmede çöz ve aktar yöntemi .....	26
Şekil 3.4.	En büyük oran birleştirme yönteminin blok diyagramı .....	28
Şekil 3.5.	Seçmeli birleştirme yönteminin blok diyagramı .....	30
Şekil 3.6.	Alıcıda birleştirme yöntemleri sonucundan elde edilen SNR değerlerinin karşılaştırılması .....	31
Şekil 4.1.	AF haberleşmede BER'in toplam güç-gürültü oranına ( $P/N_0$ ) göre değişimi .....	37
Şekil 4.2.	Sistem modeli .....	38
Şekil 4.3.	Kurban ve Röle'deki $x_m$ ve $x_f$ sinyallerine ait güç .....	40
Şekil 4.4.	Kurban'ın Röle kullanmadan $x_m$ sinyalini çözme diyagramı .....	41
Şekil 4.5.	Kurban'ın Röle desteğiyle $x_m$ sinyalini çözme diyagramı .....	42
Şekil 4.6.	Röle <sub>i</sub> -Kurban ve Röle <sub>i</sub> -FAP arası uzaklıklar eşit alındığında kurbanın $x_m$ verisini çözme başarımının gerekli spektral verimliliğe göre değişimi .....	47
Şekil 4.7.	Farklı mesafeler için kurbanın $x_m$ verisini çözme başarımının gerekli spektral verimliliğe göre değişimi .....	48
Şekil 4.8.	Tablo 4.3'te Durum 1 için rölelerin seçilme yüzdesi .....	49
Şekil 4.9.	Tablo 4.3'te Durum 2 için rölelerin seçilme yüzdesi .....	50
Şekil 4.10.	Tablo 4.1'te Durum 3 için rölelerin seçilme yüzdesi .....	50
Şekil 4.11.	Tablo 4.3'te Durum 4 için rölelerin seçilme yüzdesi .....	52
Şekil 4.12.	Kaynak-Röle-Hedef arasındaki açının değişimine bağlı Kurban'ın $x_m$ sinyalini çözme başarısı .....	54

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Gezgin haberleşme teknolojilerinin özellikleri.....	5
Tablo 1.2. Heterojen hücreli ağdaki farklı elemanların özellikleri.....	7
Tablo 4.1. Röleli haberleşmede aktarma protokolleri.....	32
Tablo 4.2. Benzetimde kullanılan parametre seti.....	45
Tablo 4.3. Birimler arasındaki mesafeler.....	46
Tablo 4.4. Farklı mesafeler için rölelerin seçilme yüzdeleri.....	48
Tablo 4.5. En iyi rölenin (EİR), üç farklı rölenin ve sadece girişim gidermenin (IC) kullanıldığı durumlarda farklı spektral verimlilik değerlerine (bit/s/Hz) göre başarı olasılıkları (%).....	53

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$a_1$	: Kaynaktan hedefe gelen sinyalin MRC ağırlıklandırma katsayısı
$a_2$	: Röleden hedefe gelen sinyalin MRC ağırlıklandırma katsayısı
$d_{f,k}$	: FAP'ın kurbanına olan mesafesi (m)
$d_{m,r_i}$	: MBS'nin rölelere olan mesafesi (m)
$d_{m,k}$	: MBS'nin kurbanına olan mesafesi (m)
$d_{r1,f}$	: Röle 1'in FAP'a olan mesafesi (m)
$d_{r1,k}$	: Röle 1'in kurbanına olan mesafesi (m)
$d_{r2,f}$	: Röle 2'nin FAP'a olan mesafesi (m)
$d_{r2,k}$	: Röle 2'nin kurbanına olan mesafesi (m)
$d_{r3,f}$	: Röle 3'ün FAP'a olan mesafesi (m)
$d_{r3,k}$	: Röle 3'ün kurbanına olan mesafesi (m)
$f_c$	: Taşıyıcı frekans (MHz)
$h$	: Kanal zayıflaması
$h_{r_i,k}$	: Röleler ve kurban arasındaki kanal kat sayısı
$h_a$	: MBS anten yüksekliği (m)
$h_{f,r_i}$	: FAP ve röleler arasındaki kanal kat sayısı
$h_{f,k}$	: FAP ve kurban arasındaki kanal kat sayısı
$h_{k,h}$	: Kaynak hedef arasındaki sönmüleme katsayısı
$h_{k,r}$	: Kaynak röle arasındaki sönmüleme katsayısı
$h_{m,r_i}$	: MBS ve röleler arasındaki kanal kat sayısı
$h_{m,k}$	: MBS ve kurban arasındaki kanal kat sayısı
$h_{r,h}$	: Röle hedef arasındaki sönmüleme katsayısı
$n$	: Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü
$N_{r_i}$	: Rölelere ait kanalın gürültü gücü (dBm)
$n_{r_i}$	: Rölelere ait kanalın toplamsal beyaz Gauss gürültüsü
$n_{k,h}$	: Kaynak hedef arasındaki toplamsal beyaz Gauss gürültüsü
$n_{k,r}$	: Kaynak röle arasındaki toplamsal beyaz Gauss gürültüsü
$n_k$	: Kurbanına ait kanalın toplamsal beyaz Gauss gürültüsü
$n_{r,h}$	: Röle hedef arasındaki toplamsal beyaz Gauss gürültüsü
$N_0$	: Toplamsal beyaz Gauss gürültüsünün gürültü gücü
$N_k$	: Kurbanına ait kanalın gürültü gücü (dBm)
$P$	: Alınan sinyalin gücü
$P_{r_i}$	: Rölelerin iletim gücü (dBm)
$P_1$	: Kaynağın iletim gücü (dBm)
$P_2$	: Rölenin iletim gücü (dBm)
$P_f$	: FAP'ın iletim gücü (dBm)
$P_m$	: MBS'nin iletim gücü (dBm)
$r$	: Birleştirici tarafından alınan sinyal
$R_{y_{k,IC}}^{[x_m]}$	: $y_{k,IC}$ sinyalinin içindeki $x_m$ sinyaline ait spektral verimlilik



$R_{y_k}^{[x_f]}$	: $y_k$ sinyalinin içindeki $x_f$ sinyaline ait spektral verimlilik değeri
$p_Z(z)$	: Rayleigh kanalın olasılık yoğunluk fonksiyonu
$s$	: Kaynak tarafından gönderilen sinyal
$w$	: Ağırlıklandırma katsayıları
$w_f$	: Kurbandaki $x_f$ 'in spektral verimliliğinin karşılaştırıldığı eşik değeri
$w_m$	: Kurbandaki $x_m$ 'in spektral verimliliğinin karşılaştırıldığı eşik değeri
$x_f$	: FAP'tan alınan sinyal
$x_m$	: MBS'den alınan sinyal
$y_{ab,IC}$	: En iyi röleden gelen ve girişimden arındırılan sinyal
$y_{ab}$	: Kurban tarafından seçilen en iyi röle sinyali
$y_{a_i}$	: Kurbanın röleden aldığı AF sinyali
$y_{r_i}$	: Röleler tarafından alınan sinyal
$y_{k,h}$	: Hedefin kaynaktan aldığı sinyal
$y_{k,IC}$	: Girişimden arındırılmış kurbandaki sinyal
$y_{k,r}$	: Rölenin kaynaktan aldığı sinyal
$y_k$	: Kurban tarafından alınan sinyal
$y_{r,h}$	: Hedefin röleden aldığı sinyal
$\gamma_{a_i,k}$	: Röleler (AF)-Kurban linkine ilişkin ani SNR değeri
$\gamma_{y_{ab,IC}}^{[x_m]}$	: $y_{ab, IC}$ sinyalinin içindeki $x_m$ sinyaline ait SINR değeri
$\gamma_{y_{ab}}^{[x_f]}$	: $y_{ab}$ sinyalinin içindeki $x_f$ sinyaline ait SINR değeri
$\gamma_{y_{k,IC}}^{[x_m]}$	: $y_{k,IC}$ sinyalinin içindeki $x_m$ sinyaline ait SINR değeri
$\gamma_{y_k}^{[x_f]}$	: $y_k$ sinyalinin içindeki $x_f$ sinyaline ait SINR değeri
$\gamma_b$	: SNR değerlerine göre seçilmiş en iyi röle
$\gamma_{f,r_i}$	: FAP-Röleler linkine ilişkin ani SNR değeri
$\gamma_{f,k}$	: FAP-Kurban linkine ilişkin ani SNR değeri
$\gamma_{m,k}$	: MBS-Kurban linkine ilişkin ani SNR değeri
$\gamma_{m,r_i}$	: MBS-Röleler linkine ilişkin ani SNR değeri
$\delta_{k,r}$	: Kaynak röle arasındaki kanal katsayısının varyansı
$\delta_{r,h}$	: Röle hedef arasındaki kanal katsayısının varyansı
$\sigma^2$	: Rayleigh kanala ait $\text{oyf}$ 'nin varyansı

### Kısaltmalar

3GPP	: 3rd Generation Partnership Project (3. Nesil Ortaklık Projesi)
AF	: Amplify and Forward (Kuvvetlendir ve Aktar)
AMPS	: Advanced Mobile Phone System (Gelişmiş Gezgin Telefon Sistemi)
AWGN	: Additive White Gaussian Noise (Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü)
BS	: Base Station (Baz İstasyonu)
CDMA	: Code Division Multiple Access (Kod Bölmeli Çoklu Erişim)
CS	: Compress and Forward (Sıkıştır ve Aktar)
CSG	: Closed Subscriber Group (Kapalı Abone Grubu)
D2D	: Device-to-Device (Cihazdan Cihaza)
DF	: Decode and Forward (Çöz ve Aktar)
DIM	: Distributed Interference Management (Dağıtılmış Girişim Yönetimi)

EDGE	: Enhanced Data rates for GSM Evolution (GSM Evrimi İçin Geliştirilmiş Veri oranlar)
EGC	: Equal Gain Combining (Eşit Kazançlı Birleştirici)
eICIC	: Enhanced ICIC (Geliştirilmiş ICIC)
EİR	: En İyi Röle
E-UTRAN	: Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (Gelişmiş UMTS Karasal Erişim Ağı)
FAP	: Femto Access Point (Femto Erişim Noktası)
FDD	: Frequency Division Duplex (Eş zamanlı çift yönlü frekans bölmesi)
FDMA	: Frequency Division Multiple Access (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
FFR	: Fractional Frequency Reuse (Kesirli Frekans Yeniden Kullanımı)
GPRS	: General Packet Radio Service (Genel Paket Radyo Servisi)
GSM	: Global System for Mobile Communications (Mobil İletişim İçin Küresel Sistem)
HCN	: Heterogeneous Cellular Network (Heterojen Hücresel Ağlar)
HSDPA	: High Speed Downlink Packet Access (Yüksek Hızlı Paket İndirme Erişimi)
HSPA	: High Speed Packet Access (Yüksek Hızda Paket Erişimi)
HSUPA	: High Speed Uplink Packet Access (Yüksek Hızlı Paket Yükleme Erişimi)
IA	: Interference Avoidance (Girişim Engelleme)
IC	: Interference Cancellation (Girişim Giderme)
ICIC	: Inter-Cell Interference Coordination (Hücreler Arası Girişim Koordinasyonu)
IF	: Interference Forwarding (Girişim Aktarma)
LPN	: Low Power Nodes (Düşük Güç Dğümleri)
LTE	: Long Term Evolution (Uzun Vadeli Evrim)
LTE-A	: LTE- Advanced (Gelişmiş LTE)
MBS	: Macro Base Station (Makro Baz İstasyonu)
MIMO	: Multiple-Input and Multiple-Output (Çoklu Giriş ve Çoklu Çıkış)
MM	: Maximum-Minimum (Maksimum-Minimum)
MRC	: Maximal-Ratio Combining (En Büyük Oran Birleştirici)
NMT	: Nordic Mobile Telephone (İskandinav Gezgin Telefon)
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Dikey Frekans Bölmeli Çoklama)
OFDMA	: Orthogonal Frequency Division Multiple Access (Dikey Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
OSG	: Open Subscriber Group (Açık Abone Grubu)
QAM	: Quadrature amplitude modulation (Dörtlü Genlik Modülasyonu)
RN	: Relay Node (Röle Dğüümü)
RRHs	: Remote Radio Heads (Uzak radyo başlıkları)
SC	: Selective Combining (Seçmeli Birleştirme)
SC-FDMA	: Single Carrier FDMA (Tek Taşıyıcılı FDMA)
SINR	: Signal-to-Interference-plus Noise Ratio (İşaret Girişim Artı Gürültü Oranı)
SNR	: Signal-to-Noise Ratio (İşaret Gürültü Oranı)
SV	: Spektral Verimlilik
TACS	: Total Access Communication Systems (Toplam Erişim Haberleşme Sistemi)

- TDD : Time Division Duplex (Eş zamanlı çift yönlü zaman bölmesi)  
TDMA : Time Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)  
UMTS : Universal Mobile Telecommunications System (Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi)  
WCDMA : Wideband CDMA (Geniş bant CDMA)



## UZUN VADELİ EVRİM TEMELLİ HETEROJEN HÜCRESEL AĞLARDA GİRİŞİM YÖNETİMİ VE EN İYİ RÖLE SEÇİMİ

### ÖZET

Bu çalışmada, heterojen hücresel ağlarda (Heterogeneous Cellular Network, HCN) girişime maruz kalan kullanıcıların bu girişimi gidermek için başka kullanıcılardan destek aldığı durum ele alınmıştır. Destek veren kullanıcı, kuvvetlendir-aktar (Amplify-and-Forward, AF) yöntemini kullanarak girişime maruz kalan, kurban durumundaki kullanıcıya girişim aktarması (Interference Forwarding, IF) yapar. Diğer kullanıcıların röle olarak kullanıldığı bu haberleşme yapısında en iyi röle seçimi 3 farklı algoritmaya göre yapılmış ve başarımları karşılaştırılmıştır.

Makro baz istasyonunun (Macro Base Station, MBS), Femto erişim noktası (Femto Access Point, FAP) nedeniyle girişime maruz kalan bir kullanıcısı Kurban olarak modellenmiş, ona yakın 3 MBS hücre kullanıcısı ise girişim aktarmayı sağlamak için Röle olarak kullanılmıştır. Kurban'ın girişimi gidermesi için girişim sinyali ve arzulanan sinyalin güçleri arasındaki farkın büyük olması gerekmektedir. Rölelerin girişimi Kurban'a aktarmasıyla bu fark sağlanmaktadır.

İstasyonlar-kullanıcılar ve kullanıcılar-kullanıcılar arasındaki linkler ilişkisiz Rayleigh kanalı olarak modellenmiştir. En iyi röle seçimi mesafeye ve kısa süreli kanal sönümlemesine bağlı olarak yapılmıştır. MATLAB kullanılarak bilgisayar benzetimi ile hedeflenen spektral verimliliğe karşı başarı oranı gözlemlenmiştir.

Röleli haberleşmede kaynak-röle arasında optimum güç paylaşımı yapılmış ve sonuç bilgisayar benzetimiyle verilmiştir. Ayrıca rölenin açısı değiştirilerek açığa bağlı başarı oranı incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Girişim Aktarma, Heterojen Hücresel Ağ, Kurban, Kuvvetlendir-Aktar, Röle Seçimi.

# **INTERFERENCE MANAGEMENT AND BEST RELAY SELECTION IN LONG TERM EVOLUTION BASED HETEROGENEOUS CELLULAR NETWORKS**

## **ABSTRACT**

In this study, users who are exposed to interference in Heterogeneous Cellular Networks are considered to be supported by other users to recover from this interference. The supporting user makes an Interference Forwarding (IF) to the victim user who is exposed to the interference using the Amplify-and-Forward (AF) method. The best relay selection was made according to 3 different algorithms and its performances were compared in this communication structure where other users are used as relays.

A Macro Base Station user is modeled as a Victim exposed to the interference due to the Femto Access Point network, and 3 MBS users close to it are used as a relay to provide interference forwarding. The difference strength between the interference signal and the desired signal for the victim to initiate must be great. This difference is achieved by relaying the interference to the victim

The links between stations-users and users-users are designed as an unrelated Rayleigh channel model. The best relay selection is made based on distance and small scale channel fading. Computer simulations using MATLAB showed a success rate against the spectral efficiency targeted.

Optimal power sharing between the source and the relay is performed in the relay communication and the result is given by computer simulation. In addition, the angle-related success rate is examined by changing the angle of the relay.

**Keywords:** Interference Forwarding, Heterogeneous Cellular Network, Victim, Amplify-and-Forward, Relay Selection.

## GİRİŞ

Son yıllarda bir yandan mobil cihazların sayıları hızla artmakta, diğer yandan kullanıcılar yüksek miktardaki verilere yüksek hızda erişmek istemektedir. Hizmet sağlayıcılar bu talepleri karşılamak için çeşitli arayışlar içindedir. Bu talebi karşılamak için ilk çözüm baz istasyonlarının (Base Station, BS) sayısını arttırmak olsa da kullanıcı sayısı, enerji altyapısı, yer ve coğrafi koşullar göz önüne alınınca bu çözüm hem pahalı olmakta, hem de kullanıcı ihtiyaçlarını istenen seviyede karşılayamamaktadır.

BS sayısını artırma yerine kullanıcı ihtiyacına göre düşük/yüksek güç kullanan, farklı kapsama alanlarına sahip BS'lerin kullanılması daha verimli olmaktadır. BS'lerin iletim güçlerinin farklılaştırılmasıyla kapsama alanları dolayısıyla hücre boyutları değiştirilmiş olup heterojen hücreli ağ kavramı ortaya çıkmıştır. Heterojen ağlar, şemsiye olarak adlandırılan ve geniş kapsama alanına sahip olan makro baz istasyonu (Macro Base Station, MBS) ve düşük güç düğümü (Low Power Nodes, LPN) olarak nitelendirilen MBS'ye göre daha düşük kapsama alanına sahip hücreli yapılardan oluşmaktadır. Mikro, piko veya femto baz istasyonları LPN'ye örnek olarak gösterilebilir [1].

Femto erişim noktası (Femto Access Point, FAP) ile özellikle ev, alışveriş merkezi, vb. kapalı alanlardaki kullanıcıların trafiği internet üzerinden aktarılabilir. FAP düşük güce sahip olduğu için 10-50m aralığında kısıtlı kapsama alanı sunar [2]. FAP'lar kullanıcıların erişim tiplerine göre üç gruba ayrılırlar. Açık abone grup (Open Subscriber Group, OSG) yapısına sahip FAP'lara kullanıcılar izinsiz olarak erişebiliyorken, kapalı abone grup (Closed Subscriber Group, CSG) yapısındakilerden sadece abone olan kullanıcıların ve hibrit yapısındakilere belli bir kapasiteye kadar abone olmayan kullanıcıların da erişimine izin verilir [2, 3].

FAP'lar, kullanım açısından düşük güç ihtiyacı, kurulum için kolay bulunabilen yer, tak-çalıştır çalışma mantığı gibi avantajlarıyla hizmet sağlayıcılar ve yüksek veri oranı, düşük batarya tüketimi gibi özellikleriyle kullanıcılar için birçok kolaylık

sağlamalarının yanında, aynı spektrumu kullanmaları durumunda birbirleriyle ve MBS'ler ile girişime sebebiyet vermektedirler.

Kullanıcıların maruz kaldığı bu girişim problemini çözmek için [4-6]'da çeşitli yöntemler önerilmiştir. Seong vd. yaptığı çalışmada FAP tarafından girişime maruz kalan MBS kullanıcısının aldığı sinyalden ilk olarak girişimin giderilmesi (Interference Cancellation, IC) gerçekleşmiş, daha sonra ise istenen sinyalin kestirimi bir rölenin yardımı ile yapılmıştır [7].

Alıcıda girişimin giderilmesi için girişim sinyalinin güçlü olarak alınması gerekmektedir. Bunun için röle görevi yapan kullanıcıların birbirleriyle olan haberleşmesinden (Device-to-Device, D2D) faydalanılır. D2D haberleşme yapısı iki mobil cihazın BS'ye ihtiyaç duymadan kendi aralarında haberleşebilme temeline dayanmaktadır [5-7]. Bu haberleşme yapısı 3. Nesil Ortaklık Projesi (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) tarafından sürüm (release) 12'de Uzun Vadeli Evrim'e (Long Term Evolution, LTE) dâhil edilmiştir [6, 8].

Hücre sel haberleşme sistemlerinde küçük ölçekli sönümlenme etkisinin giderilmesi ve bit hata olasılığının iyileştirilmesi için farklı çeşitleme teknikleri kullanılmaktadır [9]. Çeşitleme tekniklerinin genel amacı, iletilmek istenen sinyalin birbirinden bağımsız kanallar üzerinden gönderilmesi ile sönümlenme etkisini azalmaktır [9]. Alıcı farklı çeşitleme teknikleri ile kendisine gelen sinyalleri en büyük oran birleştirici (Maximal-Ratio Combining, MRC), eşit kazançlı birleştirici (Equal Gain Combining, EGC) ve seçmeli birleştirici (Selective Combining, SC) gibi yöntemleri kullanarak birleştirir.

Başka kullanıcıların röle olarak kullanıldığı çeşitleme yöntemine işbirlikli haberleşme denir [7, 10]. Röleli sistemlerde aktarma işlevi için kuvvetlendir ve aktar (Amplify and Forward, AF) ile çöz ve aktar (Decode and Forward, DF) yöntemleri literatürde sıklıkla kullanılmaktadır [10, 11]. AF'de röle kendisine gelen sinyalin sadece gücünü arttırırken, DF'de röle sinyali önce çözer (gürültüden arındırır) ve daha sonra alıcıya aktarır. [7, 10] çalışmalarında, birden fazla rölenin kullanıldığı işbirlikli haberleşme sistemlerinde en iyi rölenin seçimi ile ilgili çeşitli yöntemler önerilmiştir. Ayrıca birden fazla antene sahip tek rölenin anten sayısına bağlı

performansı da [12]'de ele alınmıştır. Anten sayısının artmasıyla sistemin kesinti performansında iyileşme olduğu belirtilmiştir.

[7]'de yapılan çalışmada MBS'nin bir kullanıcısı Kurban diğer bir kullanıcısı ise Röle olarak modellenmiştir. Röle FAP'tan aldığı sinyali AF ile Kurban'a aktararak Kurban'ın girişim sinyalini daha güçlü almasını sağlamaktadır. Kurban aldığı sinyalleri MRC yöntemiyle birleştirmekte ardından güçlü olan girişim sinyalini gidermektedir. Daha sonra istenen sinyal elde edilmektedir. Bu çalışmada, [7]'de önerilen sistem ele alınmış ve tek röle kullanımı yerine 3 farklı rölenin içinden en iyi röle seçilmesi durumu farklı röle seçim yöntemleri altında incelenmiştir.

Bölüm 1'de 4. Nesil haberleşme sistemi olan LTE, FAP ve D2D haberleşme sistemleri incelenmiştir. Ayrıca heterojen hücreli ağlarda (Heterogeneous Cellular Network, HCN) girişim yönetimi incelenmiştir. Bölüm 2'de telsiz iletişim kanallarının parametreleri, sönümlenme çeşitleri ve sönümlenmeli kanal modelleri verilmiştir. Bölüm 3'te işbirlikli haberleşme sistemi tanıtılmakta ve kullanılan aktarma yöntemleri ve alıcıda birleştirme yöntemleri üzerinde durulmuştur. Bölüm 4'te ise benzetim sonuçları verilmiştir. Burada en iyi röle seçimi ve aktarma yöntemlerinde röleler arasında ve röle-kaynak arasında optimum güç paylaşımı incelenmiştir. Son olarak Bölüm 5'te sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.



## 1. GEZGİN HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Anlamalı bilgiyi bir yerden bir yere aktarıırken kabloya ihtiyaç duymadan iletim ortamı olarak hava, su ve boşluk gibi ortamları kullanan haberleşme sistemine kablosuz haberleşme denir. Gezgin haberleşme sistemleri ise iletim ortamı olarak kablo kullanılmalarının yanında sabit bir konumda bulunmak zorunda da değildirler. Günümüze kadar gezgin haberleşme sistemleri büyük bir gelişme göstermiş ve mobil cihazların kullanımı oldukça artmıştır.

Heinrich Rudolph Hertz'in, 1800'lü yılların sonunda elektromanyetik dalgaları keşfetmesiyle kablosuz haberleşme başlamıştır. 1901 yılında ise Guglielmo Marconi radyo dalgalarını kullanarak kablosuz telgraf ile Atlantik Okyanusu'nun karşısına mesaj göndermeyi başarmıştır. 1920'de radyo telgraf ve radyo telefonlar kullanılmaya başlanmıştır. 1946 yılında ABD'nin St. Louis şehrinde yüksek frekanslarda çalışan telefonlarla iletişim sağlanmıştır. Günümüzde kullanılan hücreli haberleşmenin temelleri 1947'lerde Bell laboratuvarlarında yapılan çalışmalarla atılmıştır. İlk cep telefonu üretimi Dr. Martin Cooper'in tasarımı ile Motorola firması tarafından 1970'li yıllarda gerçekleştirilmiştir [9].

1970'lerde başlayan gezgin haberleşme sistemlerinin gelişimi 1990'larda hız kazanmıştır. Kablosuz teknolojinin hızlı gelişimine paralel olarak eski kablo yığınlarında azalma olmuş ve kablosuz bilgisayarların, yazıcıların, cep telefonlarının ve çağrı cihazlarının kullanımında artma olmuştur.

Temel olarak ses hizmeti sunan 1. Nesil gezgin haberleşme sistemleri 1980'lerde kullanılmaya başlanmıştır. Analog haberleşme standardını kullanan 1. Nesil gezgin haberleşmenin aksine sayısal haberleşme standardını kullanan 2. Nesil gezgin haberleşme 1990'larda kullanılmaya başlanmıştır. 3. Nesil gezgin haberleşme sistemleri araçlarda hareket halindeki kullanıcılarda 144kbps, yayalarda 384kbps ve kapalı alanlarda 2Mbps'ye kadar veri hızı sunmaktadır. Kullanılan yüksek veri hızı görüntülü görüşme imkânı sağlamaktadır. İnternet Protokolü (Internet Protocol, IP) tabanlı haberleşme standardını kullanan 4. Nesil gezgin haberleşme sistemi Uzun

Vadeli Evrim (Long Term Evolution, LTE) olarak adlandırılmaktadır [13]. Tablo 1.1’de 1. Nesil’den 4. Nesil’e kadar olan gezgin haberleşme teknolojilerinin bazı özellikleri sunulmaktadır [13].

Tablo 1.1. Gezgin haberleşme teknolojilerinin özellikleri [13]

	1. Nesil	2. Nesil (2G)	3. Nesil (3G)	4. Nesil (4G)
<b>Sistemin özellikleri</b>	Analog haberleşme	Sayısal haberleşme	Sayısal geniş bant haberleşme	IP tabanlı haberleşme
<b>Servis özellikleri</b>	Ses hizmeti	Ses, veri, SMS, MMS ve internet hizmeti	Görüntülü konuşma, gezgin TV, yüksek hızlarda internet	Yüksek tanımlı video akışı ve gezgin TV
<b>Erişim teknikleri</b>	FDMA	CDMA, TDMA	CDMA, TDMA, FDMA,	OFDMA, SC-FDMA
<b>Veri hızı</b>	5-9kbps	GSM: 9,6kbps, GPRS: 35-371kbps, EDGE: 384kbps	WCDMA: 0,384 - 2Mbps, HSDPA: 0,348 - 14Mbps, HSUPA:5,7 - 14Mbps, HSPA+:22-168Mbps	LTE: >100-300Mbps, LTE-A: 0,5 - 1Gbps
<b>Frekans bandı</b>	900MHz	900-1800MHz	1,8 – 2,6GHz	2 – 8GHz
<b>Kullanılan haberleşme standartları</b>	Analog	GSM, GPRS, EDGE	UMTS, WCDMA, CDMA2000	IPv6
<b>Kullanılan teknoloji standartları</b>	NMT, AMPS, TACS	GSM (TDMA)	UMTS, HSPA	MIMO, OFDMA, SC-FDMA
<b>Desteklenen haberleşme standartları</b>	Sadece ses hizmeti	Aynı anda ses veya veri hizmeti	Aynı anda ses ve veri hizmeti	Aynı anda ses ve veri hizmeti,
<b>Anahtarlam a teknikleri</b>	Devre anahtarlamalı	Devre anahtarlamalı	Devre ve paket anahtarlamalı	Sadece paket anahtarlamalı

### 1.1. Uzun Vadeli Evrim (LTE) Teknolojisi

2004 yılında WCDMA’nın yaygınlaşmasıyla beraber 3GPP, bu teknolojinin veri oranı ve spektral verimliliğinin gelecekteki uygulamalar için yeterli olmayacağını düşünerek 4. Nesil çalışmalarına başlamıştır. Bu çalışmayla hem hava ara yüzü (air interface) hem de çekirdek ağında değişim kararı alınmıştır. Anten teknolojisi olarak çok giriş çok çıkış (Multi Input Multi Output, MIMO), hava ara yüzü olarak dikgen frekans bölüşümlü çoklama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)

modülasyonu ve erişim tekniği olarak dikgen frekans bölüşümlü çoklamalı erişim (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA), çekirdek ağı olarak da paket anahtarlamalı ağın önerildiği bu standart, 3GPP Uzun Vadeli Evrim olarak adlandırılmıştır [14].

LTE veya gelişmiş UMTS Karasal Erişim Ağı (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN) yüksek spektral verimlilik, yüksek veri oranı, frekans ve bant genişliğinde esnekliğe ihtiyaç duymaktadır. LTE’de spektrum olarak 1,4, 3, 5, 10, 15, 20MHz frekans bantları kullanılmaktadır. LTE hem zaman bölmeli çift yönlü (Time Division Duplex, TDD) hem de frekans bölmeli çift yönlü (Frequency Division Duplex, FDD) teknolojilerini destekleyecek şekilde geliştirilmiştir. Anten teknolojisi olarak MIMO ve anten sayısının 4x4, modülasyon derecesinin 64QAM olduğu durumda veri indirme hızı 300Mbps’ye kadar çıkmaktadır [15].

Veri indirme hızının 100Mbps, yükleme hızının 50Mbps olduğu durumda bant genişliği 20MHz için spektral verimlilik, indirme için 5bit/s/Hz, yükleme için ise 2,5bit/s/Hz olarak hesaplanmaktadır [14].

LTE’de ulaşılan bu yüksek veri oranının yanında 3GPP sürüm 10’da açıkladığı Gelişmiş Uzun Vadeli Evrim (Long Term Evolution- Advanced, LTE) teknolojisiyle Gbps seviyelerine çıkmayı hedeflemektedir [6]. Sürüm 8’de en fazla 16bit/s/Hz olan spektral verimlilik sürüm10’da 30bit/s/Hz’e çıkarılmıştır [16]. LTE-A’da getirilen yenilik şebeke bütünleşmesi (carrier aggregation) ve röle düğümünün (Relay Node, RN) kullanımı olmuştur. Şebeke bütünleştirme, LTE ağların radyo frekans bantlarını birleştirip tek bir tane olarak davranmasını sağlayarak hız ve ağ kapasitesini arttıran özelliğidir [17]. Röle düğümleri, LTE-A’nın hücre kenarlarında kapasitesini ve kapsama alanını geliştiren düşük güçlü baz istasyonlarıdır [16]. LTE ve LTE-A standartlarında veri indirmek için OFDMA, veri yüklemek için ise SC-FDMA erişim teknikleri kullanılmaktadır [5, 6, 19].

LTE teknolojisinin kapsama alanını, spektral verimliliğini ve taşınan veri oranını geliştirmek amacıyla kullanılan başka bir teknoloji de Heterojen Hücreli Ağların kullanılmasıdır [18]. Bu ağ mimarisinde yüksek güce sahip MBS ağına, daha düşük güce ve kapsama alanına sahip düşük güç düğümü adı verilen istasyonlar

yerleştirilerek kapsama alanı ve veri oranı arttırılır. Bu istasyonlar mikro, piko ve femtolardan biri olabilmektedir.

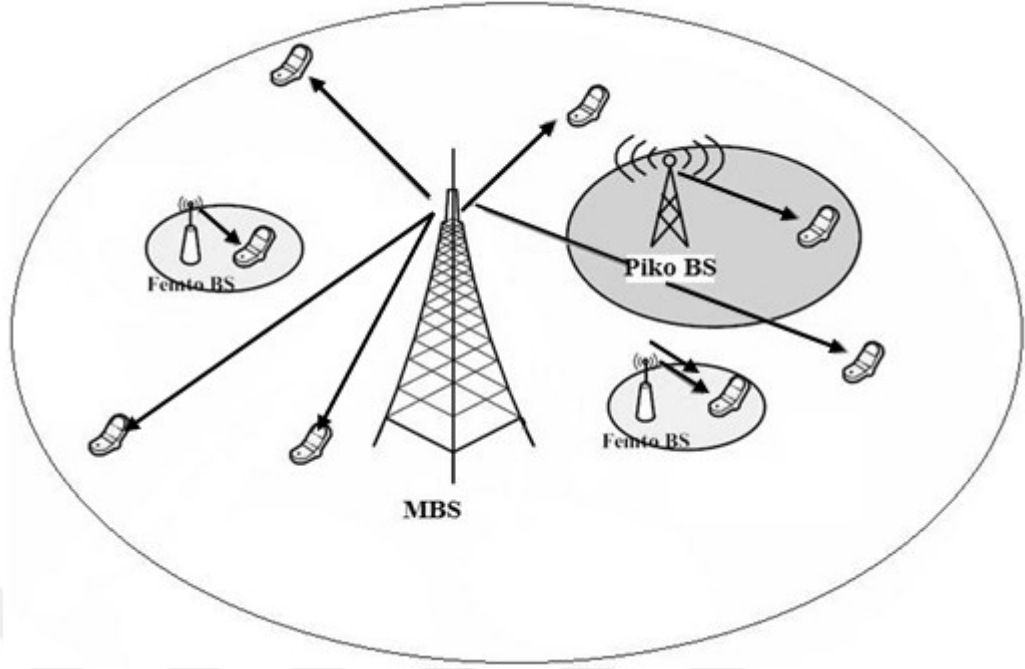
Tablo 1.2’de bir HCN’de yer alabilecek elemanlar ve özellikleri görülmektedir. Geliştirilmiş NodeBs (Enhanced Node-B, eNBs) olarak da adlandırılan MBS’ye kapsama alanındaki herkes erişebilir. Pikolar MBS’ler ile aynı erişim ara yüzünü ve taşıma tipini kullanırlar. Femto düşük maliyetli, düşük güç kullanımlı ve taşıma altyapısı olarak abonelerin internetini kullanırlar. Röleler operatörler tarafından yerleştirilen ve verileri son kullanıcıdan-istasyona ve istasyondan-son kullanıcıya iletilmesini sağlarlar. Uzak radyo başlıkları (Remote Radio Heads, RRHs) yüksek güçlü ve hafif ağırlıklı antenler olup MBS’nin dışına monte edilirler. Genelde MBS’ye bir fiber kabloyla bağlanırlar. Bazı elektronik devreleri RRHs’ye taşımak kayıpları azaltır [20].

Tablo 1.2. Heterojen hücresel ağdaki farklı elemanların özellikleri [20]

<b>Düğüm Tipi</b>	<b>İletim Gücü</b>	<b>Kapsama Alanı</b>	<b>Taşıma Tipi</b>
Makro hücre	46dBm	Birkaç kilometre	S1 ara yüzü
Piko Hücre	23-30dBm	< 300m	X2 ara yüzü
Femto Hücre	< 23dBm	< 50m	İnternet IP
Röle	30dBm	300m	Kablosuz
RRH	46dBm	Birkaç kilometre	Fiber

LTE’nin verimliliğini arttırmak için kullanılan bir başka teknoloji de cihazdan cihaza haberleşmedir. Bu haberleşme yapısında herhangi bir istasyona ihtiyaç duyulmadan birbirlerine yakın cihazlar doğrudan kendi aralarında haberleşebilmektedir [6]. Böylece mobil cihazlar istasyonlara erişmek zorunda kalmadıkları için güç tasarrufu sağlanır. D2D LTE’nin bir alt sistemi olarak ele alınır [19]. Şekil 1.1’de heterojen hücresel ağ yapısına örnek bir mimari görülmektedir.

Heterojen hücresel ağların sağladığı bu avantajlarının yanında LPN ve MBS aynı spektrumu kullandıkları için hücre içi ve hücreler arası girişim meydana gelebilmektedir. 3GPP, sürüm 8’de LTE’de girişimin yönetilmesi ve giderilmesi için hücreler arası girişim koordinasyonu (Inter-Cell Interference Coordination, ICIC) tanımlamıştır. Sürüm 10’da ise LTE-A için geliştirilmiş hücreler arası girişim (Enhanced ICIC, eICIC) tanımı yapılmıştır [20].



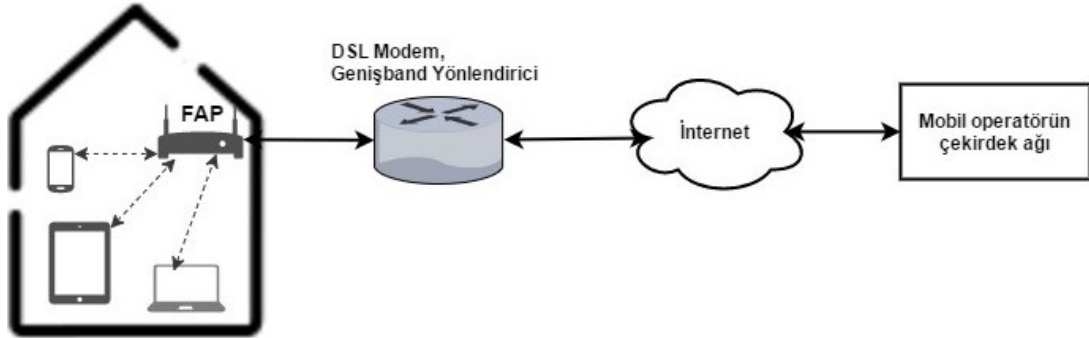
Şekil 1.1. Heterojen hücresel ağın mimarisi

## 1.2. Femto Erişim Noktaları

Hücresel haberleşme sistemlerinde operatörlerin karşılaştığı bir zorluk da kapalı alanlardaki kullanıcılara yüksek kalitede hizmetin sunulamamasıdır. Sesli konuşmaların %50'si ve veri trafiğinin %70'i kapalı alanlarda gerçekleşir [20]. Gelecekte özellikle gezgin cihazlarda veri trafiğinde bu oranın artması beklenmektedir. Kapsama alanını, taşınan veri oranını ve kapasiteyi arttırmak için, kablosuz haberleşmede hücre boyutu ve iletim gücü azaltılabilir. Bu amaçla kapalı alanlarda daha düşük iletim gücüne (10-100mW) ve daha dar kapsama alanına (10-20m) sahip FAP'lar, MBS'nin kapsama alanlarının içine yerleştirilir. Küçük aralıklarla, aynı frekansın tekrar tekrar kullanılması ile spektral verimlilik artırılır. Böylece müşterilere yüksek kalitede ve yüksek veri oranı hizmeti sunulmaktadır. Ayrıca kısa mesafeden dolayı FAP'a bağlanan cihazlar daha az güç tüketerek batarya ömründen tasarruf ederler [21, 22].

FAP, 3GPP tarafından sürüm 8'den beri WCDMA'de (UMTS) Home Node B (HNB), LTE'de (OFDMA) ise Home e Node B (H(e)NB) olarak standartlaştırılmıştır. FAP'lar operatörler tarafından kapalı alanlara yerleştirilebildikleri gibi aboneler tarafından da konumlandırılabilirler. Şekil 1.2'de FAP'ın ağ mimarisi görülmektedir.

Kapalı alana konumlandırılan FAP abonelerin geniş bant internet alt yapısı üzerinden operatörün çekirdek (core) ağına bağlanmaktadır.



Şekil 1.2. FAP ağ mimarisi

FAP'lar kullanıcıların erişim izinlerine göre üç gruba ayrılırlar. Kapsama alanındaki bütün kullanıcıları erişebildiği FAP açık abone grubu (Open Subscriber Group, OSG), sadece abone olan kullanıcıların erişebildikleri kapalı abone grubu (Closed Subscriber Group, CSG) ve öncelik abonelerin olmak üzere kapasitenin kaldırabileceği kadar abone olmayan kullanıcıların da erişebildikleri hibrit olarak adlandırılırlar [3, 4, 21, 22].

Kapalı gruplar genelde 2-4 kullanıcının desteklediği ev gibi kapalı alanlarda kullanılırlar. Açık gruplar alışveriş merkezi, havaalanı gibi yerlerde, hibrit gruplar ise küçük işyerlerinde ve kuruluşlarda kullanılmaktadır [22, 23].

### 1.3. Cihazdan Cihaza Haberleşme

Gezgin haberleşme cihazları bir baz istasyonu üzerinden birbirleriyle haberleşiyorken, cihazdan cihaza haberleşme sisteminde ise birbirlerine yakın mesafedeki iki cihaz istasyona ihtiyaç duymadan birbirleriyle haberleşebilmektedir. Cihazlar etraflarındaki diğer cihazları keşfetmek için kendi bilgilerini içeren bir yayımı (broadcast) belli aralıklarla yayarlar [5, 6, 24].

Kullanıcılar, D2D haberleşmesinde hücreli sistemlerle aynı kaynakları (spektrumu) kullanırlar. D2D haberleşme yapısı, 3GPP tarafından sürüm 12'de standartlaştırılmıştır [6, 8]. Bu sistemde aynı frekans kaynakları yeniden kullanılarak spektrum verimliliği artırılır, cihazlar birbirlerine yakın oldukları için haberleşmedeki gecikme azalır ve enerji kullanımını azaltılarak veri hızı artırılır.

[6]'da yapılan çalışmada D2D haberleşmesi iki alt kategoriye ayrılmıştır. LTE-A ağındaki diğer hücrel kullanıcılarla aynı lisanslı spektrum bandının kullanıldığı yapı bant-içi (In-Band), lisanssız ISM (Industrial, Scientific, Medical) bandının kullanıldığı yapı ise bant dışı (Out-Band) olarak adlandırılmıştır. Bant içi D2D iki alt kategoriye ayrılmıştır. Destek (underlay, non-orthogonal) kategorisinde D2D kullanıcıları ve hücrel kullanıcılar eNB tarafından sağlanan aynı kanalı eşzamanlı olarak kullanırken örtüşme kategorisinde (overlay, ortogonal) ise D2D cihazlara eNB tarafından hücrel banttan ayrı kanallar tahsis edilmiştir.

#### **1.4. LTE'de Girişim Yönetimi**

Gezgin haberleşme sistemlerinde aynı spektrumun hücrel kullanıcılar ile FAP'lar tarafından veya hücrel kullanıcılar ile D2D kullanıcıları tarafından paylaşılması girişime neden olur. Aynı ağ katmanındaki cihazlar arasında meydana gelen girişim eş katman (co-tier) veya hücre içi girişim olarak adlandırılır. Farklı ağ katmanındaki cihazlar arasında meydana gelen girişim ise çapraz katman (cross-tier) veya hücreler arası girişim olarak adlandırılır [4, 6, 19, 22].

Kullanıcıların istasyon seçme kararı, alınan referans sinyalin gücüne (Reference Signal Received Power, RSRP) göre verilir [18]. Bu durumda FAP'ın kapsama alanına giren bir MBS kullanıcısı FAP sinyali daha güçlü olduğu için ona bağlanmak isteyecektir. Eğer FAP açık abone grubu olarak modellenmiş ise kullanıcı bağlanabilir ancak FAP'ın kapalı abone grubu veya kapasitesi dolmuş hibrit grupta olduğu durumda kullanıcı bağlanamaz ve gelen sinyal girişime sebep olur. Çapraz katman girişimde MBS kullanıcısı indirme (downlink) yaparken FAP (açık abone grubu) tarafından girişime maruz kalır. Eş katmanlı girişimde veri yüklemede (uplink) kullanıcı, veri indirmede ise FAP girişime sebep olmaktadır. Girişim nedenleri aşağıda gösterildiği gibi sıralanabilir;

- 1) Plansız konumlandırma: FAP'lar kullanıcılar tarafından kullanılacakları yerlere rastgele yerleştirilir, sonradan yerleri değiştirilebilir, açılıp kapatılabilir. Böylece operatörler FAP'ların yerini ve sayısını kontrol etme imkânından yoksun kalır.
- 2) Kapalı grup abonelik: FAP'a yaklaşan MBS kullanıcısı FAP'a bağlanamadığı için onun girişimine maruz kalır.

- 3) Düşümler arasındaki güç farkı: MBS'nin gücü LPN'lerden daha yüksek olduğu için girişim oluşur.
- 4) Kapsama alanının artırılması: FAP'ların veya rölelerin kapsama alanlarının genişletilmesi girişime sebep olur.
- 5) Daha önce D2D haberleşme yapısında bant dışı kategorisinde lisanssız ISM bandının kullanıldığı belirtilmişti. Bu durumda Wi-Fi ve Bluetooth da aynı bandı kullandığı için sistemler arası girişim meydana gelir [6].

#### 1.4.1. Girişim engelleme teknikleri

HCN'de girişimi engellemek amacıyla çeşitli girişim engelleme yöntemleri önerilmiştir [3, 4, 6, 22]. Bunlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

- 1) Güç kontrolü: FAP'ın gücü optimize edilerek MBS'nin kullanıcıları korunur. [25]'te yapılan çalışmada optimum güç için Denklem (1.1) önerilmiştir.

$$P_{TX} = \max(P_{TX, \min}, \min(P_{TX, \max}, P_{RX} + P_L - \gamma)) \quad (1.1)$$

$P_{RX}$  en iyi değere sahip MBS'nin gücünü,  $P_L$  yol kaybını,  $\gamma$  hedeflenen minimum kapsama alanını göstermektedir. Başka bir yaklaşıma göre ise FAP, MBS kullanıcılarının bilgisini MBS'den alır ve gücünü ona göre ayarlar. D2D haberleşme yapısında ise haberleşecek cihazların birbirlerine yeteri yakınlıkta ve MBS ile MBS kullanıcılarına yeteri uzaklıkta oldukları durumlarda güç kontrolü metodu kullanılır.

- 2) Spektrum yönetimi: FAP'ları yöneten operatörler spektrumunu ikiye ayırır. Bir kısmını FAP tehdidi altında olan kullanıcılarına tahsis eder, diğer kısmını ise FAP ve MBS kullanıcılarının ortak kullanımına tahsis eder. Bu yöntem ile veri göndermede çapraz girişim engellenir. D2D haberleşmesinde birbiriyle haberleşen kullanıcı gruplarına veya kullanıcıların her birine ayrı spektrum tahsis edilerek kullanıcılar arası girişim de engellenmiş olur.
- 3) FAP'ların sınıflandırılması: FAP'lar coğrafi yerleşimlerine göre sınıflandırılır. Aralarında belli bir sınırın altında mesafe olanlar farklı sınıflara ayrılırlar. FAP'lar ve MBS'ler arasında dinamik bir frekans paylaşımı yapılır. Bu yöntemde veri indirmede çapraz ve eş girişim engellenir.
- 4) İşbirlikli frekans planlama: FAP MBS'den kullanıcılarının (Macro User Equipment, MUE) planlama bilgisini alır. Bu bilgilerle spektrumun



kullanılmayan kısmını belirler ve kendi kullanıcılarına tahsis eder. Bu yöntemde veri indirmede ve veri göndermede çapraz ve eş girişim engellenir.

- 5) Kesirli Frekans Yeniden Kullanımı (Fractional Frequency Reuse, FFR) ve Kaynak Ayırma: Temel olarak frekans spektrumu alt bantlara ayrılır. MBS ve FAP kullanıcılarına ayrılan spektrum çakışmadığı için girişim engellenir. Veri indirmede çapraz ve eş girişim engellenir.
- 6) Kapalı abone grubu yapısı girişime neden olduğu için hibrit durumu önerilir, bu durumda kapasitenin kaldırabileceği kadar dışardan kullanıcının FAP'a bağlanmasına izin verilir.
- 7) Güç kontrolü ve Radyo Kaynaklarının tahsis edilmesinin bileşimi: D2D haberleşme sisteminde MBS önce hücrel kullanıcılar için kanal tahsisi yapar, daha sonra D2D için kanal tahsis eder. Eğer hala talep varsa bu sefer daha önce hücrel kullanıcılar için tahsis ettiği kanalları D2D için yeniden tahsis eder. MBS daha sonra D2D'nin iletim gücünü ayarlar.
- 8) MIMO: D2D haberleşmede iletim gücü alıcıya doğru maksimum yapılırken diğer yönlerde minimum yapılır.

#### **1.4.2. Girişim giderme teknikleri**

Bir önceki başlıkta vurgulandığı gibi temel hedef HCN'de girişimi engellemek olmakla beraber oluşan girişimleri giderme alanında da birçok akademik çalışma yapılmaktadır. [4]'te girişim giderme teknikleri şu şekilde ele alınmıştır. Ardışık girişim gidermede (Successive Interference Cancellation, SIC) önce alınan en güçlü sinyalden başlanarak her seferinde bir kullanıcıdan gelen sinyal taranır ve bu işlem en zayıf sinyale kadar devam eder. Paralel girişim giderme (Parallel Interference Cancellation, PIC) tüm kullanıcılardan alınan sinyaller aynı anda taranırlar. Çok kademeli PIC (Multistage Parallel Interference Cancellation, MPIC) girişim giderme de ise önce bir grup kullanıcı paralel taranıp girişim giderilir. Daha sonra başka bir grup alınır. Çok kullanıcılı algılama (Multiuser Detection, MUD) yönteminde ise kanal durum bilgisi göz önüne alınarak alınan sinyaller arasından en olası olan seçilir. Girişim giderme metotları girişim sinyalinin karakteristik özelliklerini ve anten dizisini bilmek zorunda oldukları için kullanıcılardan ziyade baz istasyonlarında gerçekleştirilirler.

[3]'te yapılan çalışmada girişim sinyalinin arzulanan sinyalden daha güçlü olduğu varsayılarak aşağıda belirtilen adımlar uygulanarak önce girişim sinyali giderilmiş ardından arzulanan sinyal elde edilmiştir. Tek bir FAP'ın MBS kullanıcılarında girişime sebep olduğu durumda iki adımlı MRC kullanılmış. Bu durumda önce MRC sonra SIC uygulanmış ve son olarak yine MRC uygulanmış. İki FAP'ın olduğu durumda ise üç adımlı MRC kullanılmıştır. Sırasıyla MRC1-SIC-MRC2-SIC uygulanmıştır.

[26]'da MBS'nin kullanıcısı kurban olarak seçilip MBS'ye ait bir kullanıcı röle görevi görerek bu kurbanı yardım etmektedir. Röle ve MBS arasındaki SNR'ın MBS ve Kurban arasındakinden büyük olduğu varsayılıyor. Röle istasyonu, alıcının istediği sinyali çözmek için ihtiyaç duyduğu girişime ilişkin bilgiyi alıcıya aktarır.

[24]'de yapılan çalışmada bir MBS kullanıcısının 2 tane D2D kullanıcısında girişime maruz kaldığı kabul edilmiştir. Bu girişimi gidermek için bu iki D2D kullanıcısı başka bir D2D kullanıcısını röle olarak kullanmışlardır. İlk fazda röle iki kullanıcıdan ve MBS kullanıcısından aldığı sinyali ikinci fazda D2D kullanıcılarına aktarmıştır. Kendi sinyalini bilen kullanıcılar, MBS kullanıcısının sinyalinin güçlü ve zayıf olduğu durumlarda diğer kullanıcının sinyalini çözmeye çalışmışlardır. Kesilme olasılığı üzerinden performans analizi yapılmıştır.

[27]'deki çalışmada 5G için önerilen dikgen olmayan çoklu erişim tekniği (Nonorthogonal Multiple Access, NOMA) ele alınmış, bu teknikle dikgen çoklu erişime (Orthogonal Multiple Access, OMA) göre spektral verimlilik ve sistem veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Söz konusu çalışmada, baz istasyonları mobil kullanıcılarla AF ile Nakagami-m sönümlenmeli kanal üzerinden haberleşmektedir. NOMA güç-bölgesi ve kod-bölgesi olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Kaynak hedefle doğrudan haberleşmemektedir ve çalışma veri indirme (downlink, DL) üzerine kurgulanmıştır. İlk zaman diliminde kaynak bilgiyi röleye gönderip ikinci zaman diliminde ise röle bilgiyi kullanıcılara gönderir. Güç paylaşımı katsayısı NOMA'dan dolayı eşit olmayıp  $a_1 > a_2 > \dots > a_m$  ve  $a_1 + a_2 + \dots + a_m = 1$  şeklinde alınır. Bütün kullanıcılarda girişimi gidermek için SIC yöntemi kullanılmıştır, m. kullanıcıdaki j kullanıcısının j < m sinyalleri çözülerek silinmiş ve j > m sinyalleri gürültü olarak değerlendirilmiştir.

$$R_{j \rightarrow m} = \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{RD_{j \rightarrow m}}) \quad (1.2)$$

$$R_{j \rightarrow m} \geq \tilde{R}_j = \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_j) \quad (1.3)$$

olduğu sürece girişim silme işlemi devam etmekte,  $\tilde{R}_j$  hedeflenen veri oranını  $\gamma_j$  ise j. kullanıcının hedeflenen sinyal-girişim artı gürültü oranını (Signal-to-Interference-plus Noise Ratio, SINR) değerini göstermektedir.

$$R_m = \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{RD_{j \rightarrow m}}) \quad (1.4)$$

olduğu durumda ise istenen sinyalin alındığı varsayılmıştır [27].

## 2. KANAL PARAMETRELERİ VE SÖNÜMLEME MODELLERİ

Kablosuz haberleşme sistemlerinde verici tarafından gönderilen sinyal, iletim ortamı olarak havayı kullanarak alıcıya ulaşır. İletim ortamı için bir kablo kullanılmadığından dolayı sinyal yani elektromanyetik dalga ortamdaki engeller (binalar, ağaçlar, coğrafi engeller) nedeniyle yansiyabilir, kırılabilir veya saçılabilir. Bunun yanında alıcının vericiyi doğrudan gördüğü direk görüş yolu (Line of Sight, LoS) olarak adlandırılan bir yol da bulunmayabilir. Elektromanyetik dalga alıcıya birçok yoldan yansiyarak geldiğinde, alıcıda alınan sinyal, birçok farklı yoldan gelen sinyallerin toplamından oluşmaktadır. Bu sinyallerin zayıflamadan dolayı genlikleri, gecikmeden dolayı ise fazları farklılık göstermektedir. Toplam sinyalde meydana gelen bu bozulma sönmüleme (fading) olarak adlandırılmaktadır.

### 2.1. Kanal Parametreleri

İletim ortamında bir yol izleyen ve sönmülemeye uğrayan sinyallerin kullandığı kanalların sınıflandırılabilmesi için bazı parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametreler; gecikme yayılımı, uyumluluk bant genişliği, uyumluluk süresi ve Doppler yayılması olarak verilir [14, 28, 29].

#### 2.1.1. Gecikme yayılımı

Çok yollu kanal üzerinden alıcıya ulaşan sinyalin gücü tek bir değerden ziyade belli bir zaman aralığına yayıldığı için toplamsal olarak ifade edilebilir. Sinyalin N tane yoldan alıcıya ulaştığı varsayılarak k. kanala ilişkin güç  $g_k$  ve gecikme  $\tau_k$  ile gösterilmek üzere ağırlaştırılmış ortalama gecikme,

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{k=1}^N g_k \tau_k}{\sum_{k=1}^N g_k} \quad (2.1)$$

olarak ifade edilir. Denklem (2.1) kullanılarak gecikme yayılımı,

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\overline{\tau^2} - \bar{\tau}^2} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki karesel beklenen değer  $\overline{\tau^2}$ ,

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_{k=1}^N g_k \tau_k^2}{\sum_{k=1}^N g_k} \quad (2.3)$$

ile ifade edilir [28, 29].

### 2.1.2. Uyumluluk bant genişliği

Uyumluluk bant genişliği ( $B_c$ ), tüm sinyallerin hemen hemen aynı kazanç ve doğrusal fazla geçebildikleri kanal bandının genişliği demektir. Uyumlu bandın içindeki sinyallerin genlik değerleri arasında güçlü bir ilişki vardır. Eğer kanaldan geçen iki sinyalin frekansları arasındaki fark uyumluluk bant genişliği ( $B_c$ )'den büyük ise bu sinyaller kanaldan oldukça farklı etkilenirler. Frekans ilişki fonksiyonu 0,9'a eşit ise,

$$B_c \approx \frac{1}{50\sigma_{\tau}} \quad (2.4)$$

olarak tanımlanır. Bu değer 0,5'e eşit olması durumu ise,

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_{\tau}} \quad (2.5)$$

denklemleriyle gösterilir [28, 29].

### 2.1.3. Uyumluluk süresi

Uyumluluk süresi ( $T_c$ ), alınan iki sinyalin genlikleri arasında güçlü bir ilişkinin olduğu ve sinyaldeki bozulmanın fark edilebileceği zaman süresi olarak tanımlanabilir. Uyumluluk bant genişliğinde olduğu gibi zaman ilişki fonksiyonu 0,5 için uyumluluk süresi,

$$T_c = \frac{9}{16\pi f_m} \quad (2.6)$$

olarak gösterilir. Buradaki  $f_m$  maksimum Doppler kaymasını gösterir [28, 29].

#### 2.1.4. Doppler yayılması

Doppler yayılması  $B_D$ , gezgin birimlerin hareketiyle veya kanaldaki cisimlerin yer değiştirmesiyle meydana gelen spektral genişlemenin bir ölçüsü olarak tanımlanır. Alıcıdaki sinyalin toplam bant genişliği Denklem (2.7)'de ifade edildiği gibidir.

$$f = f_c \pm f_d \quad (2.7)$$

Burada  $f_c$  temel bant sinyalin bant genişliğini  $f_d$  ise Doppler kaymasını gösterir [28,29].

### 2.2. Sönümlenme Çeşitleri

#### 2.2.1. Frekans seçici olmayan sönümlenme

Bir telsiz radyo kanalının, iletilen sinyalin bant genişliğinden daha geniş bir bant üzerinde sabit kazanç ve doğrusal faza sahip olduğu durum frekans seçici olmayan (frequency nonselective), düz (flat) sönümlenme olarak tanımlanır. Bu modelde iletilen sinyalin spektral özellikleri alıcıda aynen korunur. Kanal parametreleri göz önüne alınarak Denklem (2.8 ve 2.9) verilebilir.

$$B_c \gg B_s \quad (2.8)$$

veya,

$$\sigma_\tau \ll T_s \quad (2.9)$$

[28, 29]. Burada  $B_s$  sinyal bant genişliğini ve  $T_s$  simge periyodunu göstermektedir.

#### 2.2.2. Frekans seçici sönümlenme

Kanalının, iletilen sinyalin bant genişliğinden daha dar bir bant üzerinde sabit kazanç ve doğrusal faza sahip olduğu durum frekans seçici (frequency selective) sönümlenme olarak tanımlanır. Bu özellikteki kanallarda alıcıya ulaşan sinyal gönderilen sinyalin sönümlenmeye uğrayan (zayıflamış) çeşitli kopyalarından oluşmaktadır. İşaretin zaman bölgesinde dağılması sebebiyle simgeler arası girişim

meydana gelebilmektedir. Kanal parametreleri cinsinden Denklem (2.10 ve 2.11) elde edilmektedir [28, 29].

$$B_c < B_s \quad (2.10)$$

veya,

$$\sigma_\tau > T_s. \quad (2.11)$$

### 2.2.3. Hızlı sönümlenme

Kanalın uyumluluk süresinin, simge süresinden daha küçük olduğu durumda meydana gelen sönümlenmeye hızlı sönümlenme (fast fading) denir. Frekans bölmesine bakıldığında sinyalin bant genişliği Doppler yayılmasından daha küçüktür. Bunun için,

$$T_s > T_c \quad (2.12)$$

veya,

$$B_s < B_d \quad (2.13)$$

denklemlerinin sağlanması gerekir [28, 29].

### 2.2.4. Yavaş sönümlenme

Yavaş sönümlenmede (slow fading), simge süresi kanalın uyumluluk süresinden çok kısadır. Frekans bölmesinde bakıldığında sinyalin bant genişliği Doppler yayılmasından çok daha geniştir. Bunun için,

$$T_s \ll T_c \quad (2.14)$$

veya,

$$B_s \gg B_d \quad (2.15)$$

denklemlerinin sağlanması gerekir [28, 29].

### 2.3. Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü Kanal

Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (Additive White Gaussian Noise, AWGN), alıcıdaki ısı gürültüsünün sebep olduğu ve haberleşme sistemlerinde en sık rastlanılan bozucu etkidir. Beklenen değer  $\mu$  ve varyans  $\sigma^2$  olmak üzere Gauss gürültüsünün olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf),

$$f_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), -\infty < z < \infty \quad (2.16)$$

şeklinde verilir. Beyaz Gauss gürültüsünün birikimsel dağılım fonksiyonu (bdf) ise,

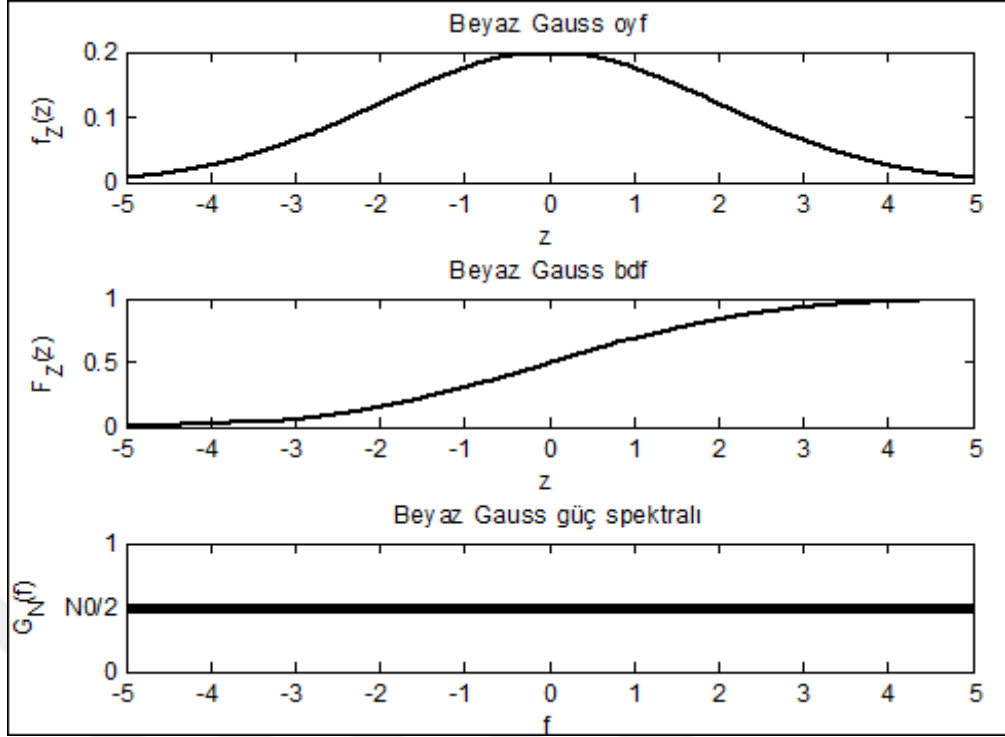
$$F_Z(z) = \int_{-\infty}^z f_Z(z) dz = 1 - Q\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right) \quad (2.17)$$

olarak verilir. Burada  $Q(\cdot)$  fonksiyonu,

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) du \quad (2.18)$$

denklemlerle ifade edilir [28]. Şekil 2.1’de Gauss dağılımının oyf, bdf ve güç spektral yoğunluğu fonksiyonu görülmektedir. Beklenen değer 0, standart sapma 2 ve gürültü gücü 1 alınmıştır. Güç spektral yoğunluğu bütün frekanslar için sabit  $\left(\frac{N_0}{2}\right)$  olduğu için AWGN kanal ideal kanaldır. Ayrıca oyf fonksiyonuna bakıldığında ortalama maksimum değer yakalanırken ortalamadan uzaklaştıkça değer azalmaktadır.





Şekil 2.1. Gauss dağılımının oyf'si, bdf'si ve AWGN güç spektral fonksiyonu

## 2.4. Sömülemeli Kanal Modelleri

### 2.4.1. Rayleigh sömülemeli kanal

Alıcı verici arasında LoS olmadığı durumlarda, iletilen sinyal çevredeki cisimlerden yansıyarak alıcıya ulaşabilmektedir, bu tip kanallar Rayleigh sömülemeli kanal olarak modellenirler. İki tane bağımsız Gauss gürültüsü sinyalinin zarflarının toplamının Rayleigh dağılımı özelliği gösterdiği bilinmektedir [28]. Bir sistemin performansı değerlendirilirken en kötü durum göz önüne alındığı için haberleşme sistemlerinin hata başarımları Rayleigh kanal üzerinden yapılır [29]. Kanalın olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf),

$$f_Z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right), 0 \leq z < \infty \quad (2.19)$$

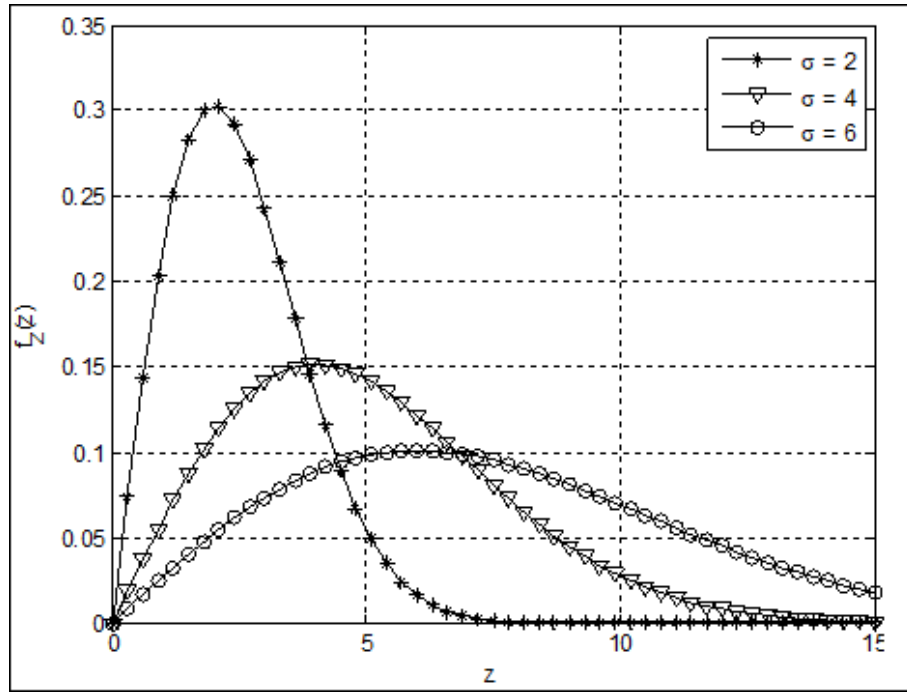
olarak verilir.  $\sigma^2$  Rayleigh dağılımını oluşturan dik Gauss bileşenlerinin varyansını göstermektedir. Bu dağılımın beklenen değeri  $E[Z] = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma$ , ortalama gücü  $E[Z^2] = 2\sigma^2$  olmak üzere varyansı,

$$\sigma_Z^2 = E[Z^2] - (E[Z])^2 = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\sigma^2 \quad (2.20)$$

olarak hesaplanır. Şekil 2.2’de çeşitli  $\sigma$  değerleri için Rayleigh dağılımının oyf’si görülmektedir.  $\sigma$  değeri arttıkça sönümlenmenin yavaşladığı görülmektedir. Rayleigh dağılımının birikimsel dağılım fonksiyonu ise,

$$F_Z(z) = \int_0^z \frac{u}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right) du = 1 - \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.21)$$

denklemleriyle verilir [28, 29].



Şekil 2.2. Rayleigh kanalın  $\sigma$  bileşenine göre dağılımının oyf’si

#### 2.4.2. Rician sönümlenmeli kanal

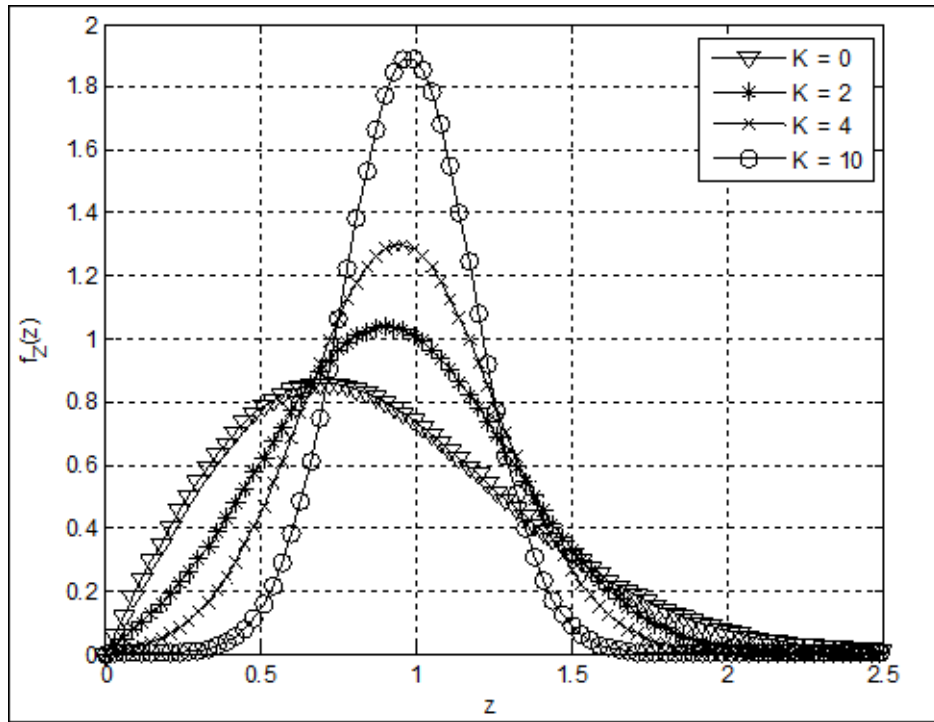
Rayleigh dağılımı için alıcı vericinin birbirini doğrudan görmediği söylenmişti. Rician sönümlenmeli kanallarda ise alıcı verici arasında LoS bulunmakta ve alıcıya ulaşan sinyal yansıyor gelen ve doğrudan gelen sinyallerin toplamı şeklinde olup Rician dağılımı göstermektedir [28, 29]. Bu dağılımın oyf’si,

$$f_Z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{zs}{\sigma^2}\right), 0 \leq z \leq \infty \quad (2.22)$$

şeklinde verilmektedir. Burada  $I_0(\cdot)$  birinci türden sıfırıncı dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonunu ve  $s$  parametresi doğrudan alınan sinyalin zarf bileşenini göstermektedir. Rician dağılımı doğrudan alınan sinyalin gücünün yansıyarak gelen sinyallerin güçlerine oranı olarak verilen  $K = \frac{s^2}{2\sigma^2}$  bileşeniyle de tanımlanır.  $K$ 'ya bağlı Rician dağılımının oyf'si,

$$f_Z(z) = 2z(1+K) \exp\left(-K - z^2(1+K)\right) I_0\left(2z\sqrt{K(1+K)}\right), 0 \leq z \leq \infty \quad (2.23)$$

denklemleriyle verilir.



Şekil 2.3. Rician kanalın K bileşenine göre dağılımının oyf'si

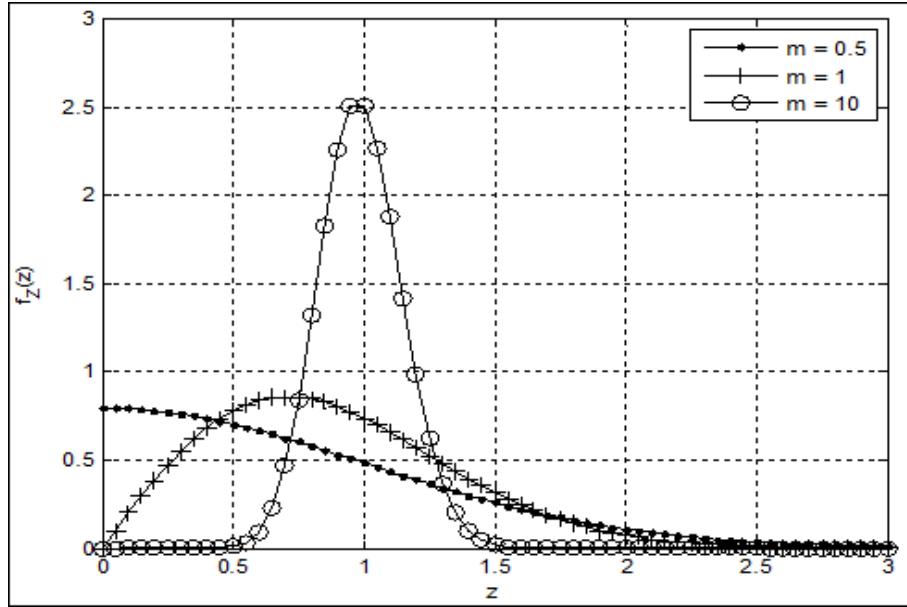
$K$  değeri arttıkça Şekil 2.3'te görüldüğü gibi Gauss dağılımına yaklaştığı görülmektedir. Teorik olarak da  $K \rightarrow \infty$  iken AWGN kanal ve  $K = 0$  dB iken Rayleigh dağılımlı kanal elde edilir.

### 2.4.3. Nakagami-m sönümlemeli kanal

Nakagami-m dağılımı, Rayleigh ve Rician dağılımlarını kapsayan daha geniş bir dağılımdır. Bu dağılımın oyf'si merkezi ki-kare dağılımının temelini oluşturmaktadır [30]. Nakagami-m deki m değeri, 0,5 ile  $\infty$  arasında değişip dağılımın sönümleme parametresidir. Nakagami dağılımın oyf'si,

$$f_Z(z) = \frac{2m^m z^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mz^2}{\Omega}\right), 0 \leq z < \infty \quad (2.24)$$

şeklinde ifade edilir. Burada Gamma fonksiyonu  $\Gamma(m) = \int_0^\infty u^{m-1} \exp(-u) du$  olarak tanımlanır. Burada  $\Omega = E[Z^2]$ , karesel beklenen değeri gösterir [14, 30].



Şekil 2.4. Nakagami kanalın m bileşenine göre dağılımının oyf'si

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi m 0,5 değerini aldığımda tek yönlü Gauss dağılımı ve m 1 değerini aldığımda ise Rayleigh dağılımı elde edilmektedir.  $m \rightarrow \infty$  giderken Nakagami kanalın AWGN kanala yakınsadığı görülmektedir. Bu durum Rician sönümlemeli kanalda da gözlemlenmişti. Buradan hareketle Rician parametresiyle Nakagami parametresi arasında Denklem (2.25)'te verilen ilişki kurulmuştur [30].

$$K = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}} \quad (2.25)$$

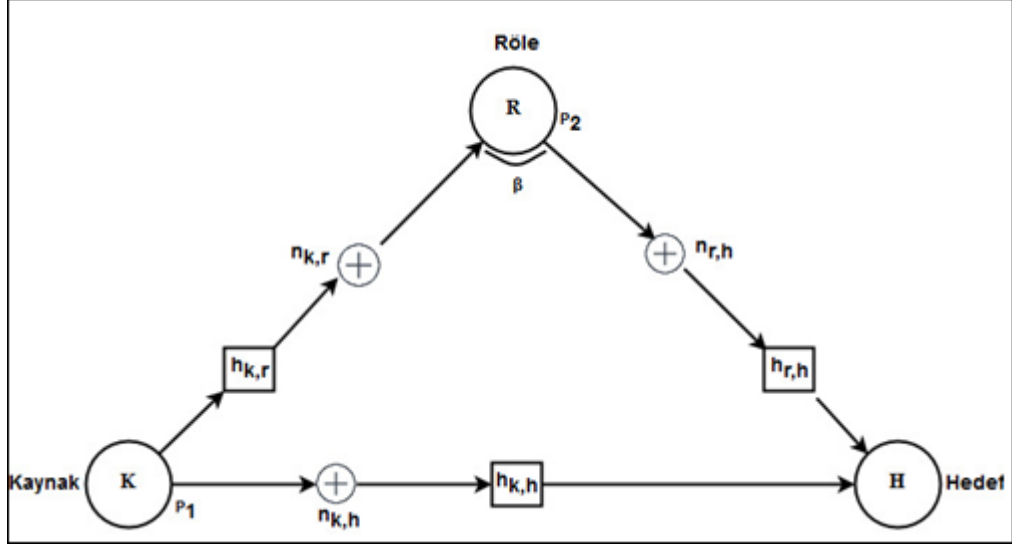
### 3. İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME

Vericiden iletilen sinyal, elektromanyetik dalganın yapısı ve iletim ortamı gereği alıcıya birçok yoldan farklı sönümlenme değerleri ve farklı gecikme değerleri ile ulaşabilmektedir. Alıcıda sinyalin doğru alınması için LoS olması şartı da yeterli olmayabilir, örneğin mesafe çok fazla ise sinyal hedefe ulaşmadan sönümleyebilir. Ortamdaki bozucu etkiler göz önüne alınarak sinyallerin hedefe birçok yoldan iletilmesiyle haberleşmenin sağlanma olasılığı arttırılmaya çalışılır.

Sinyalin farklı yollardan gönderilmesi MIMO anten sistemlerinin kullanılmasıyla iletim çeşitlemesi yapılarak sağlanabilir. Alıcı-verici üzerinde birden çok anten bulunduğu için aynı anda birden fazla kanalla veri alınıp gönderilebilir.

MIMO sistemlerinin yerine röle kullanılması da iletim çeşitlemesi sağlanmaktadır. Kaynak sinyalini hem doğrudan hedefe iletirken hem de röle üzerinden hedefe göndererek iletim çeşitlemesi sağlar. Mesafenin fazla olduğu durumlarda iletim görevini röle tek başına görebilir. Son yıllarda kullanıcıların röle olarak kullanılmasıyla işbirlikli haberleşme kavramı ortaya çıkmıştır [10-12]. Bu sistemde her kullanıcı hem kendi verisini hem de diğer kullanıcılardan aldığı veriyi de hedefe gönderir. Böylece kullanıcılar birbirleri için röle görevi görmüş olurlar. Rölelerde aktarma yöntemleri, rölenin kaynaktan aldığı sinyali hedefe iletmeden önce sinyal üzerinde gerçekleştirdiği işleme göre sınıflandırılırlar.

Şekil 3.1’de röleli haberleşme modeli verilmektedir. Kaynaktan gönderilen sinyal iletim ortamında zayıflamaya uğramaktadır. Bu zayıflama  $h$  katsayısı ile gösterilmiştir. Ayrıca alıcıda AWGN gürültüsü de sinyale eklenmektedir. Gürültü  $n$  katsayısı ile gösterilmiştir. Ayrıca kaynak, röle ve hedefin aynı doğru üzerinde olmadığı durumlarda rölenin belli bir açısı bulunmaktadır. Bu açı  $\beta$  ile gösterilmiştir. Genelde çalışmalarda bu açı  $180^\circ$  kabul edilir.



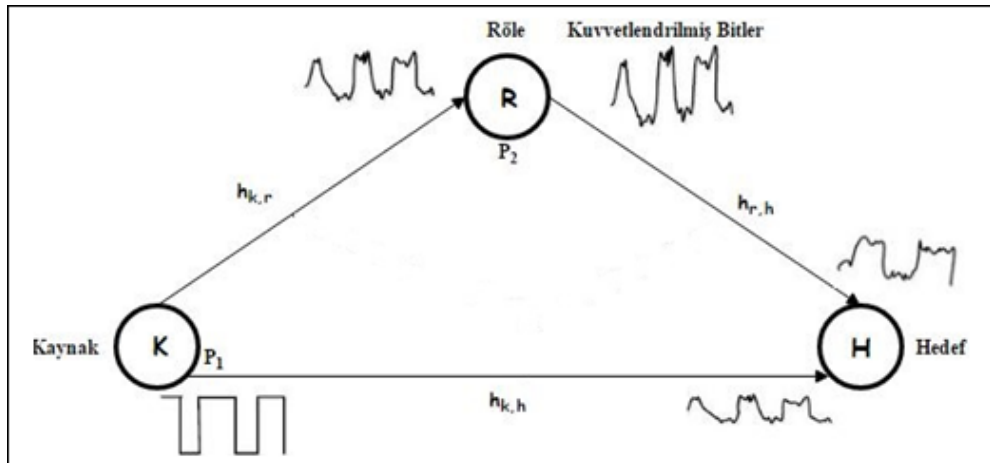
Şekil 3.1. Röleli haberleşme diyagramı

### 3.1. Röleli Haberleşmede Aktarma Yöntemleri

Röleli haberleşme sistemlerinde kuvvetlendir ve aktar ile çöz ve aktar aktarma yöntemleri kullanılmaktadır.

#### 3.1.1. Kuvvetlendir ve aktar (AF)

Kuvvetlendir ve aktar yönteminde röle kaynaktan aldığı sinyali güçlendirir ve hedefe aktarır. Bu yöntemin dezavantajı aldığı sinyali güçlendirdiği gibi sinyale eklenmiş kanal gürültüsünü de güçlendirmesidir. Yine de kaynak bir sinyalin iki bağımsız formunu aldığı için karar vermede avantaj sağlar. Bu yöntemde alıcının en iyi çözümü bulması için, kanalların karakteristiğini bilmesi gereklidir [30].

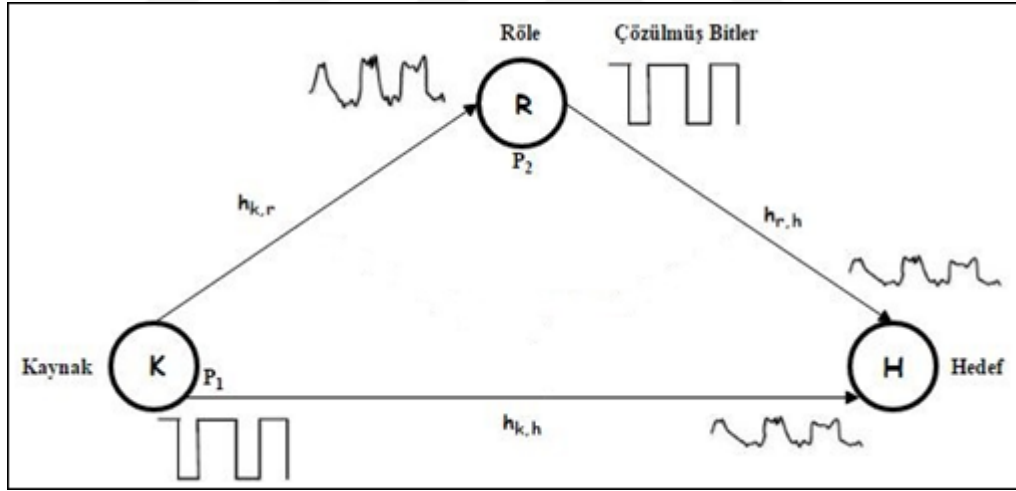


Şekil 3.2. Röleli haberleşmede kuvvetlendir ve aktar yöntemi

Şekil 3.2’de kuvvetlendirir ve aktar yöntemi basitçe ifade edilmektedir. Şekilde  $P_1$  ve  $P_2$  sırasıyla kaynak ve röle güçlerini göstermektedir. Kanal sönümlenme katsayıları ise  $h$  ile gösterilmiştir.

### 3.1.2. Çöz ve aktar (DF)

Çöz ve aktar yönteminde röle kaynağın gönderdiği sinyali önce çözerek, almış olduğu sinyali gürültüden arındırır. Bu yöntemde verinin röle tarafından doğru olarak çözülmesi önemlidir. Eğer rölede hatalı çözüm gerçekleşirse kaynağa yanlış sinyal gönderilmiş olur ve böylece hata yayılımı problemi ortaya çıkar [30]. AF yönetiminde olduğu gibi DF yönteminde de kanalın karakteristik özelliklerinin alıcı tarafından bilinmesi gereklidir. Şekil 3.3’te çöz ve aktar yönteminin genel yapısı görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi kaynağın hedefe gönderdiği sinyal gürültüdüzdür ve  $P_1$  ve  $P_2$  sırasıyla kaynak ve röle güçlerini göstermektedir. Burada rölenin sinyali doğru çözdüğü kabul edilir.



Şekil 3.3. Röleli haberleşmede çöz ve aktar yöntemi

### 3.2. Alıcıda Birleştirme Yöntemleri

Alıcıda farklı kaynaklardan gelen sinyallerin birleştirilmesi gereklidir. Burada  $N$  tane birbirinden bağımsız, yavaş sönümlenmeli ve düz sönümlenmeli iletim kanalı olduğu varsayılır [14, 31]. Alıcı bu  $N$  tane kanaldan gelen sinyalin en iyisini veya bunların doğrusal bir birleşimini seçmektedir. Literatürde sıklıkla kullanılan çeşitli birleştirme yöntemleri;

- ✓ En büyük oran birleştirmesi (Maximal Ratio Combining, MRC)

- ✓ Eşit kazanç birleştirmesi (Equal-Gain Combining, EGC)
- ✓ Seçmeli birleştirme (Selective Combining, SC)

olarak verilirler [14, 31, 32, 33].

### 3.2.1. En büyük oran birleştirmesi

En büyük oran birleştirmesi (Maximal Ratio Combining, MRC) yönteminde alıcı, bağımsız kanallardan aldığı her bir sinyali sönümlenmeli kanal katsayısının fazını yok edecek şekilde bir ağırlıklandırma değeri ile çarparak, çıkıştaki SNR değerini maksimum yapacak şekilde bu sinyalleri birleştirir. Şekil 3.4'te MRC'nın genel yapısı görülmektedir. L tane kanal üzerinden gelen ve AWGN ( $n_i$ ) eklenmiş sinyaller farklı katsayılarla ( $w_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$ ) ağırlıklandırılır. Sönümleme katsayısı  $h_i$  ile ve  $w_i = h_i^*$  ile gösterilmek üzere alınan sinyal,

$$r_i = h_i s + n_i \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. MRC çıkışı ise, Denklem (3.2) ile hesaplanır.

$$r = \sum_{i=1}^L w_i r_i = \sum_{i=1}^L |h_i|^2 s + \sum_{i=1}^L h_i^* n_i \quad (3.2)$$

P alınan sinyalin gücünü,  $N_0$  gürültü gücünü ve SNR değerini göstermek üzere alınan i. sinyalin SNR değeri

$$\gamma_i = |h_i|^2 \frac{P}{N_0} \quad (3.3)$$

olarak verilir. Bundan hareketle MRC çıkışındaki SNR değeri,

$$\gamma_{\text{MRC}} = \frac{(\sum_{i=1}^L |h_i|^2)^2 P}{\sum_{i=1}^L |h_i|^2 N_0} = \sum_{i=1}^L |h_i|^2 \frac{P}{N_0} = \sum_{i=1}^L \gamma_i \quad (3.4)$$

denkleminle verilebilir. Denklem (3.4)'te görüldüğü gibi MRC çıkışındaki SNR değeri her bir kanaldaki SNR değerlerinin toplamına eşittir. Çıkış SNR değeri maksimum yapıldığı için optimum bir birleştirme yöntemidir. Alıcıda kanal durum bilgisinin (Channel State Information, CSI) bilinmesi zorunludur [30].



Bütün kanallardaki SNR değerlerinin beklenen değeri aynı ( $\text{SNR}\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}$ ) alınarak (sabit) [14, 30, 32] MRC çıkışındaki  $\gamma_{\text{MRC}}$ 'nin beklenen değeri,

$$\bar{\gamma}_{\text{MRC}} = L\bar{\gamma} \quad (3.5)$$

şeklinde verilir,  $\gamma_{\text{MRC}}$ 'nin pdf'si,

$$f_{\gamma_{\text{MRC}}}(\gamma) = \frac{1}{(L-1)!\bar{\gamma}^L} \gamma^{L-1} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \gamma \geq 0 \quad (3.6)$$

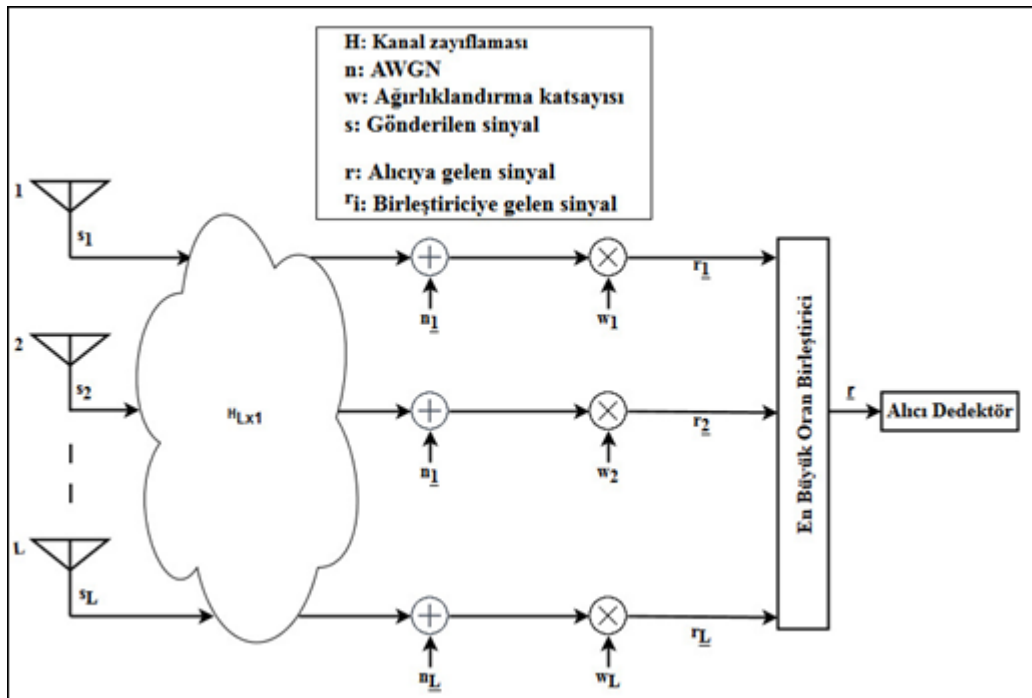
olarak [14, 31, 32], bdf ise,

$$F_{\gamma_{\text{MRC}}}(\gamma) = \frac{1}{(L-1)!} \left( \Gamma(Q) - \Gamma\left(Q, \frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \right) \quad (3.7)$$

eşitliğiyle verilmektedir [14, 31, 32].

$$\Gamma(Q, \gamma) = \int_{\gamma}^{\infty} u^{L-1} \exp(-u) du, \quad (3.8)$$

olarak verilen tamamlanmamış Gamma fonksiyonunu göstermektedir [30].



Şekil 3.4. En büyük oran birleştirme yönteminin blok diyagramı

### 3.2.2. Eşit kazanç birleştirmesi

Eşit kazanç birleştirmesi (Equal-Gain Combining, EGC) yönteminde bütün kanallardaki sinyaller eşit ağırlıklandırılarak (aslında  $w_i = 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$  alındığı için ağırlıklandırma yapılmadan) sadece aynı faza getirilerek yapılan birleştirme yöntemidir [30]. Buna göre çıkıştaki ortalama SNR değeri,

$$\gamma_{EGC} = \frac{\sum_{i=1}^L |h_i|^2 P}{\sum_{i=1}^L N_0} \quad (3.9)$$

denklemleriyle verilir. EGC kanalının çıkışındaki ortalama SNR değerinin beklenen değeri,

$$\bar{\gamma}_{EGC} = \bar{\gamma} \left( 1 + \frac{\pi}{4} (L-1) \right) \quad (3.10)$$

olarak elde edilir [14, 31]. Burada bütün kanallardaki ortalama SNR değeri sabit olup aynı değerde iken kanallara ait ani SNR değeri farklı olabilmektedir. Denklem (3.10)'da görüldüğü gibi EGC'ye ait SNR değeri MRC'ye göre  $\frac{\pi}{4}$ 'lük bir faktörle daha kötü değere sahiptir [14].

### 3.2.3. Seçmeli birleştirme

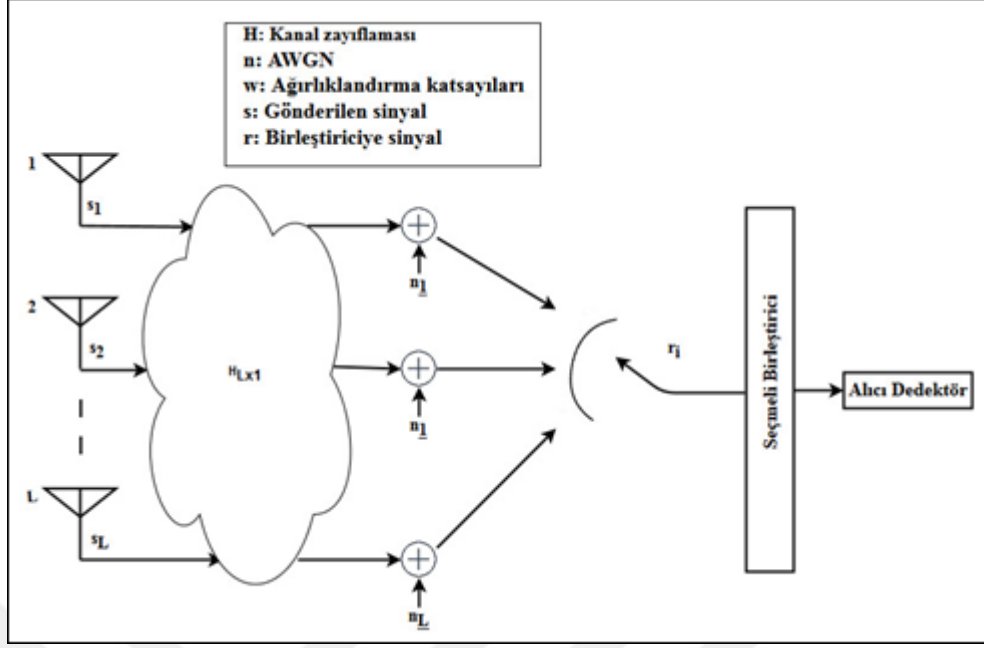
Seçmeli birleştirme (Selection Combining, SC) yönteminde, birbirinden bağımsız sönümlenmeli kanallardan alınan sinyallerden en büyük SNR değerine sahip sinyal seçilir. Dolayısıyla  $w_i$  ağırlıklandırma katsayısı en büyük SNR alındığı zaman 1 değerini diğer durumlarda ise 0 değerini alır [31]. Şekil 3.5'te seçmeli birleştirme yönteminin blok diyagramı görülmektedir.

MRC'de olduğu gibi kaynak tarafından alınan sinyal,

$$r_i = h_i s + n_i \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilebilir. Alınan her bir sinyalin ani SNR değeri,

$$\gamma_i = |h_i|^2 \frac{P}{N_0} \quad (3.12)$$



Şekil 3.5. Seçmeli birleştirme yönteminin blok diyagramı

denklemlerle verilir [33]. Sistem çıkışında seçilen maksimum SNR değerli sinyal,

$$\gamma_{SC} = \max(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L) \quad (3.13)$$

şeklinde verilir. Bu sinyale ilişkin odf ise,

$$f_{\gamma_{SC}}(\gamma) = \frac{L}{\bar{\gamma}} \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)\right)^{L-1} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \gamma \geq 0 \quad (3.14)$$

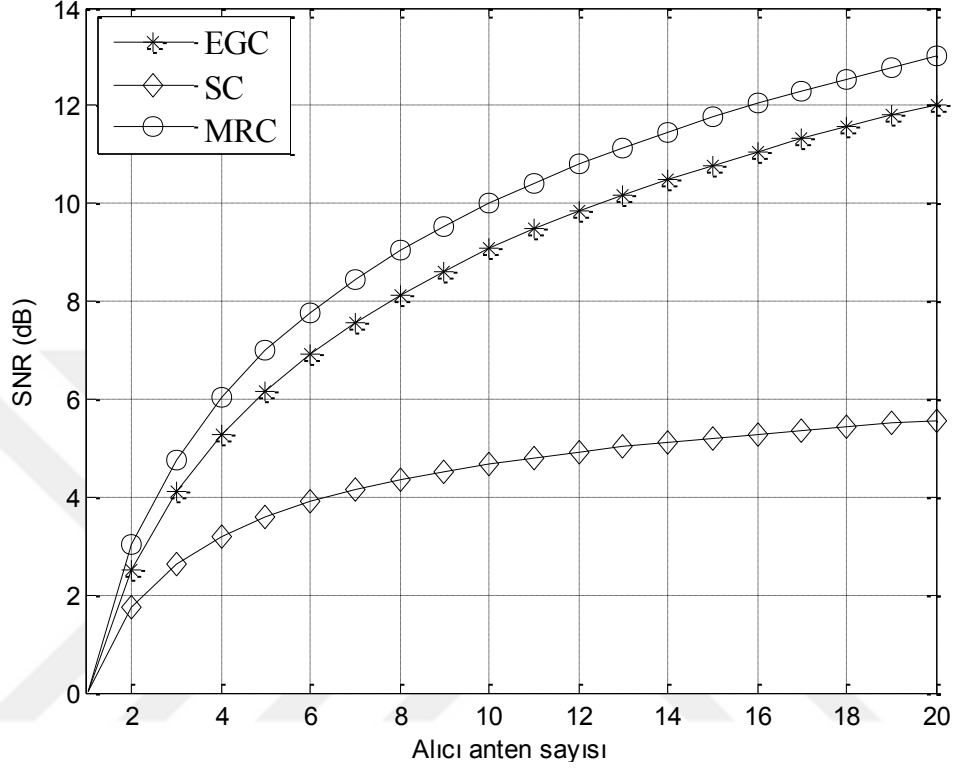
denklemlerle verilir [30, 31]. Maksimum sinyalin bdf'si de,

$$F_{\gamma_{SC}}(\gamma) = \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)\right)^L \quad (3.15)$$

eşitliğinde verildiği gibidir [30, 31]. SC kanalının çıkışındaki  $\gamma_{SC}$ 'nin ortalama değeri,

$$\bar{\gamma}_{SC} = \bar{\gamma} \sum_{i=1}^L \frac{1}{i} \quad (3.16)$$

olarak hesaplanır. Denklem (3.16)'da görüldüğü gibi SC yöntemi ile çıkıştaki ortalama SNR değeri girişteki ortalama SNR değerinin  $\sum_{i=1}^L \frac{1}{i}$  katı kadar arttırılmaktadır.



Şekil 3.6. Alıcıda birleştirme yöntemleri sonucundan elde edilen SNR değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.6'da alıcı anten sayısı 10 iken, MRC'de 10, EGC'de 9 ve SC de ise 4,5 SNR kazancı elde edildiği gösterilmiştir. MRC başarımı, SC ye göre 5,5 dB kadar daha fazla avantaj sağlamaktadır. MRC yöntemiyle EGC birbirlerine yakın performans sağlamalarının yanında MRC daha üstündür. SC yöntemi en kötü performansa sahip olmasının yanında donanım karmaşıklığı açısından daha basittir.

#### 4. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde bilgisayar benzetimleri ile elde edilen sonuçlar verilerek bu sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır. İlk kısımda toplam gücün Röle-Kaynak arasında optimum dağılımı ele alınmıştır. İkinci kısımda ise HCN'de girişim gidermek için röleli sistem modeli ele alınmıştır. Birden fazla rölenin kullanıldığı durumda en iyi röle seçimi yapılarak performans iyileştirilmesindeki başarımlar değerlendirilmiştir.

##### 4.1. Optimum Güç Paylaşımı

Optimum Güç Paylaşımı için, [34]'te yapılan çalışma temel alınarak röle ve kaynak arasında optimum güç paylaşımı yapılmıştır. Röleli haberleşmede kaynak, hedefle doğrudan haberleşebildiği gibi bir röle üzerinden de haberleşerek iletim çeşitlenmesi sağlayabilmektedir. Röleli haberleşme için çeşitli aktarma protokolleri kullanılmaktadır. Genelde üç farklı protokol sunulmaktadır [30].

Tablo 4.1. Röleli haberleşmede aktarma protokolleri [30]

	1. zaman dilimi	2. zaman dilimi
Protokol I	$K(x_1) \rightarrow R$	$R(x_1) \rightarrow H$
	$K(x_1) \rightarrow H$	$K(x_2) \rightarrow H$
Protokol II	$K(x_1) \rightarrow R$	$R(x_1) \rightarrow H$
	$K(x_1) \rightarrow H$	-
Protokol III	$K(x_1) \rightarrow R$	$R(x_1) \rightarrow H$
	-	$K(x_2) \rightarrow H$

Tablo 4.1'de aktarma protokolleri görülmektedir. Birinci protokolde faz 1'de, kaynak veriyi röle ve hedefe gönderir. Faz 2'de, röle faz 1'de kaynaktan aldığı veriyi hedefe gönderir ve kaynak da hedefe veri gönderir. İkinci protokolde faz 1'de birinci protokolle aynı işlem gerçekleşirken faz 2'de kaynak susar ve röle aldığı veriyi hedefe iletir. Üçüncü protokolde ilk fazda kaynak sadece röleye veri iletir. İkinci

fazda hem röle hem kaynak hedefe veri gönderir. [35]'te yapılan çalışmada bu protokollerin performansları karşılaştırılmıştır.

[34]'te yapılan çalışmada haberleşme sistemi faz 1 ve faz 2 olmak üzere iki adımda gerçekleşir. İlk adımda kaynak kendi verisini hem röleye hem de hedefe gönderir. Faz 2 de ise röle faz 1'de kaynaktan aldığı veriyi hedefe gönderir. Kaynak bu fazda susar. Hedef, kaynaktan gelen veriyi faz 1'de doğrudan, faz 2'de ise röle üzerinden alarak MRC ile birleştirme işlemi yapar. Böylece kaynak aynı verinin farklı kopyalarını iki farklı yoldan almış olur ve veri kaybı ihtimali düşmüş olur.

$$y_{k,h} = \sqrt{P_1} h_{k,h} x + n_{k,h} \quad (4.1)$$

$$y_{k,r} = \sqrt{P_1} h_{k,r} x + n_{k,r} \quad (4.2)$$

$$y_{r,h} = \sqrt{\tilde{P}_2} h_{r,h} x + n_{r,h} \quad (4.3)$$

Denklem (4.1)'de kaynak tarafından gönderilen sinyalin hedef tarafından alınması, Denklem (4.2)'de kaynak tarafından gönderilen sinyalin röle tarafından alınması ve Denklem (4.3)'te ise röle tarafından gönderilen sinyalin hedef tarafından alınması görülmektedir.  $P_1$  ve  $P_2$  iletim güçlerini,  $x$  kaynağın gönderdiği işareti,  $h_{k,r}$  kaynaktan röleye,  $h_{k,h}$  kaynaktan hedefe ve  $h_{r,h}$  röleden hedefe kanal sönümleme kat sayılarını göstermektedir. Kaynaktan alınan sinyal röle tarafından doğru olarak çözümlerse  $\tilde{P}_2 = P_2$  olarak alınır.  $n_{k,h}$ ,  $n_{k,r}$  ve  $n_{r,h}$  ifadeleri ise sinyale gürültüyü göstermektedir. İletim kanal modeli olarak Rayleigh sönümlemeli kanal modeli alınmıştır. Gürültü ise sıfır ortalamalı kompleks Gauss rastgele değişkenleri ile AWGN olarak modellenmiştir.

#### 4.1.1. Çöz ve aktar (DF)

Literatürde seçmeli röle (selective-relaying) protokolü olarak bilinen bir protokol kullanılmıştır. Buna göre röle kaynaktan aldığı verinin doğru çözülüp çözülmediğini bilir. Pratik olması için bu durum bir SNR eşik değerine bağlanır. Böylece alınan sinyalin SNR değeri belli bir eşik değerinin üzerinde ise sinyal doğru algılanmış kabul edilir.

DF yöntemi için Denklem (4.3) göz önüne alındığında buradaki  $x$ , kaynaktan alınan sinyali ifade eder. Gerekli düzenlemeler yapıldığında DF yönteminde röleden gelen verinin hedef tarafından alınması Denklem (4.4)'teki gibi ifade edilir:

$$y_{r,h} = \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1|h_{k,r}|^2 + N_0}} h_{r,h}(\sqrt{P_1}h_{k,r}x + n_{k,r}) + n_{r,h} \quad (4.4)$$

MRC detektör çıkışında röleden ve kaynaktan gelen sinyalin toplamı Denklem (4.5)'teki gibi ifade edilmektedir. Denklemde görüldüğü gibi kaynak ve hedeften gelen veri belli bir katsayı değeri ile kaynak tarafında birleştirilir.  $a_1$  ve  $a_2$  katsayıları MRC çıkışındaki SNR değerini optimize etmek için kullanılır.

$$y = a_1 y_{k,h} + a_2 y_{r,h} \quad (4.5)$$

#### 4.1.2. DF için optimum güç seçimi

Kaynak röle arasında rastgele bir güç paylaşımı yapmak yerine gücü bunlar arasında optimum paylaşımın başarıyı arttırdığı düşünülmektedir. Denklem (4.5)'teki katsayılar;

$$a_1 = \sqrt{P_1 h_{k,h}^* / N_0} \quad (4.6)$$

ve

$$a_2 = \sqrt{P_2 h_{r,h}^* / N_0} \quad (4.7)$$

olarak ifade edilir. Burada kaynak tarafından alınan sinyalin kaynak ve röle güçlerine bağlı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla işbirlikçi haberleşmede temel noktalarda biri veri iletimi için kaynak ve röle arasında toplam güç  $P$ 'yi optimum şekilde paylaşmaktır. [36]'da yapılan çalışmada seçmeli AF kullanılmış ve bu çalışmadan farklı olarak röleler arasında optimum güç paylaşımı yapılmıştır. M-PSK veya M-QAM için  $P = P_1 + P_2$  olmak üzere;

$$P_1 = \frac{\delta_{k,r} + \sqrt{\delta_{k,r}^2 + 8(A^2/B)\delta_{r,h}^2}}{3\delta_{k,r} + \sqrt{\delta_{k,r}^2 + 8(A^2/B)\delta_{r,h}^2}} P \quad (4.8)$$

$$P_2 = \frac{2\delta_{k,r}}{3\delta_{k,r} + \sqrt{\delta_{k,r}^2 + 8(A^2/B)\delta_{r,h}^2}} P \quad (4.9)$$

güç paylaşımı yukardaki denklemlerdeki gibi yapılabilir. Bu denklemlerde kaynak ve röle güç seçiminin kaynak-hedef arasındaki katsayıya bağlı olmadığı görülmektedir.  $\delta_{k,r}$  ve  $\delta_{r,h}$  değişkenleri ise kanal katsayılarının varyansını göstermektedir. Denklem (4.8 ve 4.9)'da görüldüğü gibi kaynağın güç seçimi  $\frac{1}{2}$  ile 2 arasında, rölenin güç değişimi ise 0 ile  $\frac{1}{2}$  arasında değişmektedir. Dolayısıyla kaynağa daha fazla güç ayrılmış olur. Bu denklemlerde M modülasyon seviyesini göstermek üzere A ve B değişkenleri DF yönteminde modülasyon seviyelerine göre değişmektedir. M-PSK için A ve B değişkenleri Denklem (4.10)'da olduğu gibi ifade edilir. M-QAM için de bu değişkenler Denklem (4.11)'deki gibi ifade edilir.  $K = 1 - \frac{1}{\sqrt{M}}$  olmak üzere;

$$A = \frac{M-1}{2M} + \frac{\sin \frac{2\pi}{M}}{4\pi}, \quad B = \frac{3(M-1)}{8M} + \frac{\sin \frac{2\pi}{M}}{4\pi} - \frac{\sin \frac{4\pi}{M}}{32\pi} \quad (4.10)$$

$$A = \frac{M-1}{2M} + \frac{K^2}{\pi}, \quad B = \frac{3(M-1)}{8M} + \frac{K^2}{\pi} \quad (4.11)$$

DF yönteminde güç seçimi dağılımı bazı özel koşullar altında yapılabilmektedir;

- 1. Durum: Röle – Hedef bağlantısı yok ise  $P_1 = P$  olarak seçilir. Dolayısıyla gücün hepsi kaynağa tahsis edilir.
- 2. Durum: Kaynak – Röle bağlantısı yok ise  $P_1 = P$  olarak seçilir. Yine röle üzerinden kaynağa erişim olmayacağı için gücün hepsi kaynağa tahsis edilir.
- 3. Durum: Kaynak – Hedef bağlantısı yok ise  $P_1 = \frac{\delta_{r,h}}{\delta_{k,r} + \delta_{r,h}} P$  ve  $P_2 = \frac{\delta_{k,r}}{\delta_{k,r} + \delta_{r,h}} P$  olarak paylaşılır.

#### 4.1.3. Kuvvetlendir ve aktar (AF)

Bu yöntemde de MRC detektörü çıkışında alınan sinyal Denklem (4.5)'deki gibi ifade edilir. Ancak burada  $a_2$  katsayısı farklılık göstermektedir. Kaynaktan hedefe gelen sinyal DF ile aynı olduğu için  $a_1$  katsayısı değişmemektedir.  $a_2$  katsayısı ise



Denklem (4.12) ile ifade edilir. Röleden hedefe gelen sinyalin güç çarpanı değiştiği için  $a_2$  katsayısı değişmektedir.

$$a_2 = \frac{\sqrt{\frac{P_1 P_2}{P_1 |h_{k,r}|^2 + N_0}} h_{k,r}^* h_{r,h}^*}{\left( \frac{P_2 |h_{r,h}|^2}{P_1 |h_{k,r}|^2 + N_0} + 1 \right) N_0} \quad (4.12)$$

#### 4.1.4. AF için optimum güç seçimi

DF yönteminde olduğu gibi AF yönteminde de gücü kaynak ve röle arasında optimum şekilde paylaşmak önemlidir. AF yönteminde güç kaynak ve röledeki güç dağılımları Denklem (4.13 ve 4.14)'te gösterildiği gibidir.

$$P_1 = \frac{\delta_{k,r} + \sqrt{\delta_{k,r}^2 + 8\delta_{r,h}}}{3\delta_{k,r} + \sqrt{\delta_{k,r}^2 + 8\delta_{r,h}}} P \quad (4.13)$$

$$P_2 = \frac{2\delta_{k,r}}{3\delta_{k,r} + \sqrt{\delta_{k,r}^2 + 8\delta_{r,h}}} P \quad (4.14)$$

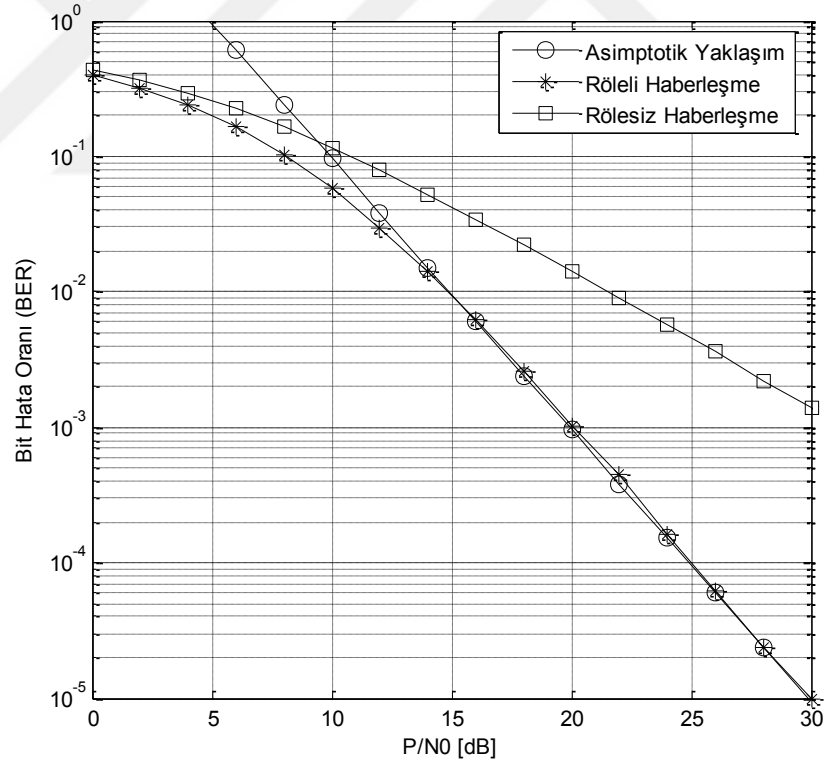
Denklem (4.13 ve 4.14)'te görüldüğü gibi kaynak ve röle arasındaki güç paylaşımı modülasyon çeşidinden etkilenmemektedir. AF yönteminde röleye gelen sinyalin türüne bakılmayıp sadece güçlendirme yapıldığı için bu paylaşım yapılmaktadır. AF'de de DF'de olduğu gibi güç paylaşımı kaynak–hedef arasındaki katsayıdan bağımsızdır. Yine güç dağılımı kaynak için  $\frac{1}{2}$  ile 2 arasında, röle için 0 ile  $\frac{1}{2}$  arasında değişmektedir.

#### 4.1.5. Bilgisayar benzetimi

Bu çalışmada bir adet kaynak, bir hedef ve bir röle ele alınmıştır. Kaynak tarafından üretilen rastgele bir işaret QPSK modülasyonuna tabi tutulmuştur. Kaynak-Röle, Kaynak-Hedef ve Röle-Hedef arasındaki iletim kanalları bağımsız düz Rayleigh kanal olarak modellenmiştir. Daha sonra bu işaret faz 1'de kanala verilerek hedef ve röleye gönderilmiştir. Bu işaret kanalda iletilirken, düz sönmülemeye ve gürültüye maruz kalmıştır.

Röleye gelen işaret, röle tarafından güçlendirilip faz 2’de kaynağa aktarılmıştır. Röleden kaynağa gelen işaret iletimi esnasında düz sönümlenmeye ve gürültüye maruz kalmıştır. Hedef röle ve kaynaktan aldığı işaretleri MRC yöntemi ile birleştirmektedir.

Şekil 4.1’de ele alınan model için yapılan Monte-Carlo benzetimi görülmektedir. Burada üst sınır değeri olarak [34]’te belirtilen asimptotik yaklaşım değeri kullanılmıştır. Bu değer  $P/N_0=5\text{dB}$  için 0 ve  $P/N_0=30\text{dB}$  için  $10^{-5}$  hata oranı elde edilir. Şekilde görüldüğü gibi röleli haberleşme yapıldığında yaklaşık SNR’nin 13dB olduğu değer ve sonrasında benzetim ve asimptotik yaklaşım sonuçları örtüşmektedir. Rölesiz haberleşme yapıldığında zayıflama daha fazla olacağı için daha kötü bir sonuç elde edildiği açıkça görülmektedir. Bu çalışma sonucunda açıkça görülmektedir ki işbirlikçi haberleşmenin kullanılmasıyla iletimde başarı sağlanmaktadır.

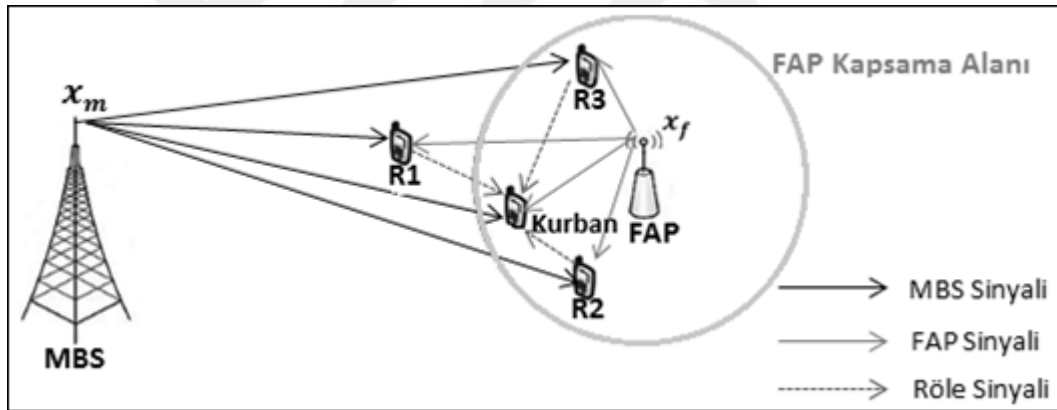


Şekil 4.1. AF haberleşmede BER'in toplam güç-gürültü oranına ( $P/N_0$ ) göre değişim

## 4.2. Röleli Haberleşme Modeli ve En İyi Röle Seçimi

### 4.2.1. Sistem modeli

Bu bölümde MBS ve FAP'tan oluşan bir HCN'de, MBS kullanıcısının FAP'ın kapsama alanına girmesiyle girişime maruz kaldığı bir durum ele alınmıştır. FAP'ın kapsama alanına giren kullanıcı kurban, girişim sinyalinin giderilmesi için işbirliği yapılan diğer MBS kullanıcıları ise röle olarak tanımlanmıştır. Önerilen sistem modeli Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Sistemdeki tüm birimlerin zaman bölmeli çoklama kullandığı ve her kullanıcının tek antene sahip olduğu varsayılmıştır. Sistemdeki tüm linkler Rayleigh kanal olarak modellenmiş ve rölenin AF yöntemini kullandığı kabul edilmiştir. Düğümler arasındaki kanal katsayıları; MBS-röle  $h_{m,r_i}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) MBS-kurban  $h_{m,k}$ , FAP-röle  $h_{f,r_i}$ , FAP-kurban  $h_{f,k}$  ve son olarak röle-kurban ise  $h_{r_i,k}$  ile gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Sistem modeli

Her bir birimdeki gürültü ( $n_k, n_{r_i}$ ) AWGN olarak modellenmiştir. MBS sinyali  $x_m$ , FAP sinyali  $x_f$  ile gösterilip her iki sinyalin gücü 1 olarak alınmıştır. Kurban ve rölelerin ilk fazda aldığı sinyaller;

$$y_k = h_{m,k}\sqrt{P_m}x_m + h_{f,k}\sqrt{P_f}x_f + n_k \quad (4.15)$$

$$y_{r_i} = h_{m,r_i}\sqrt{P_m}x_m + h_{f,r_i}\sqrt{P_f}x_f + n_{r_i} \quad (4.16)$$

denklemleriyle verilir.  $P_m$ ,  $P_f$  ve  $P_{r_i}$  sırasıyla MBS, FAP ve rölelerin iletim güçleridir. Kurban röleden yardım alarak girişimi giderebileceği gibi, röleden yardım almadan kendi başına da girişimi giderebilir. Röleli haberleşme durumunda, röle aldığı sinyali aşağıdaki güç ölçekleme çarpanı ile,

$$\sqrt{E \left[ |y_{r_i}|^2 \right]} = \sqrt{|h_{m,r_i}|^2 P_m + |h_{f,r_i}|^2 P_f + N_{r_i}} \quad (4.17)$$

ölçeklendirip kurbanı aktarır. Bütün birimlerdeki ani SNR değerleri,

$$\gamma_{m,r_i} = P_m |h_{m,r_i}|^2 / N_{r_i} \quad (4.18)$$

$$\gamma_{m,k} = P_m |h_{m,k}|^2 / N_k \quad (4.19)$$

$$\gamma_{f,r_i} = P_f |h_{f,r_i}|^2 / N_{r_i} \quad (4.20)$$

$$\gamma_{f,k} = P_f |h_{f,k}|^2 / N_k \quad (4.21)$$

$$\gamma_{a,k} = P_{r_i} |h_{r_i,k}|^2 / N_k \quad (4.22)$$

şeklinde hesaplanabilir.  $N_{r_i}$  rölelerdeki ve  $N_k$  kurbandaki AWGN gürültü gücünü göstermektedir.

#### 4.2.2. Performans analizi

HCN'de yer alan diğer MBS kullanıcıları, içerisinde en iyi konuma ve kanala sahip kullanıcı, kurbanı yardım edecek röle olarak seçilir ve FAP'tan aldığı sinyali AF yöntemiyle kurbanı aktarır. Kurban, MBS'den ve AF yöntemiyle röleden aldığı sinyalleri MRC yöntemi ile birleştirir. Performans karşılaştırması için, kurbanın en iyi röle seçimi sonrasında yardım aldığı durum ile röle kullanılmayan, girişim giderme işleminin kurban tarafından gerçekleştirildiği durumun benzetimi ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

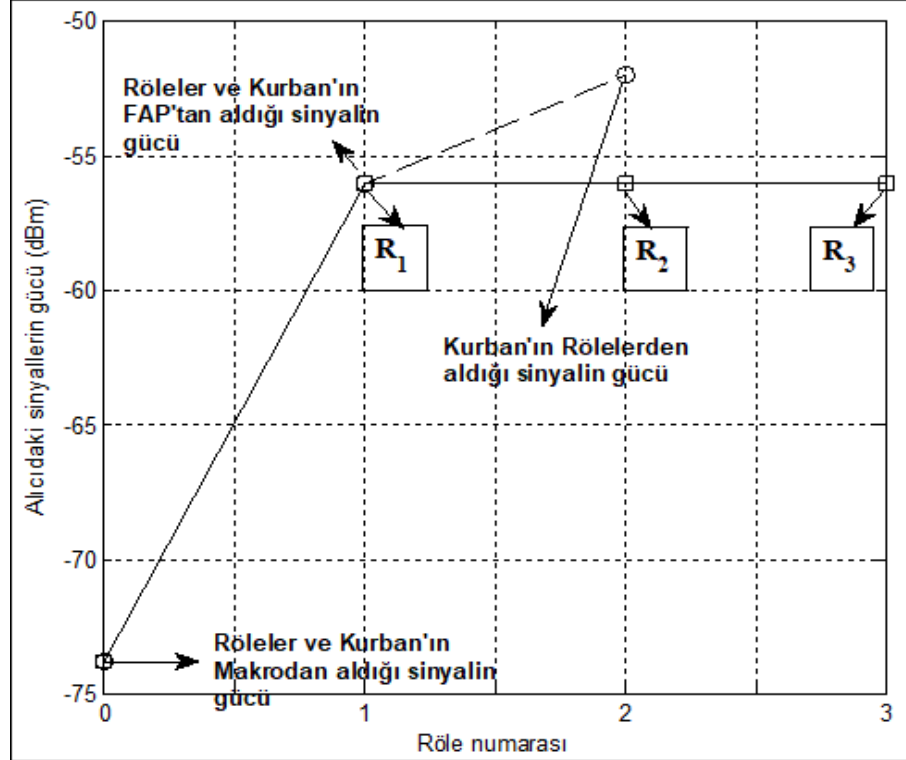
Rölenin olmadığı durumda kurban Denklem (4.15)'te aldığı sinyalden önce girişimi ( $x_f$ ) gidermekte, ardından istenen  $x_m$  sinyalini gürültüden arındırmaktadır. Alınan sinyale ilişkin spektral verimlilik, SINR veya SNR değerinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki denklemle verilebilir. Denklemdeki  $\frac{1}{2}$  kat sayısı yarım çift yönlü kanaldan ve tek antene sahip alıcı vericiden (Single Input Single Output, SISO) dolayı gelmektedir. Spektral verimliliğin birimi bit/s/Hz olarak verilir [16, 37, 38, 39].

$$R_{y_k}^{[x_f]} = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \gamma_{y_k}^{[x_f]} \right) \quad (4.23)$$

Denklem (4.23)'te  $y_k$  sinyalinin içindeki  $x_f$  sinyalinin SINR'si,

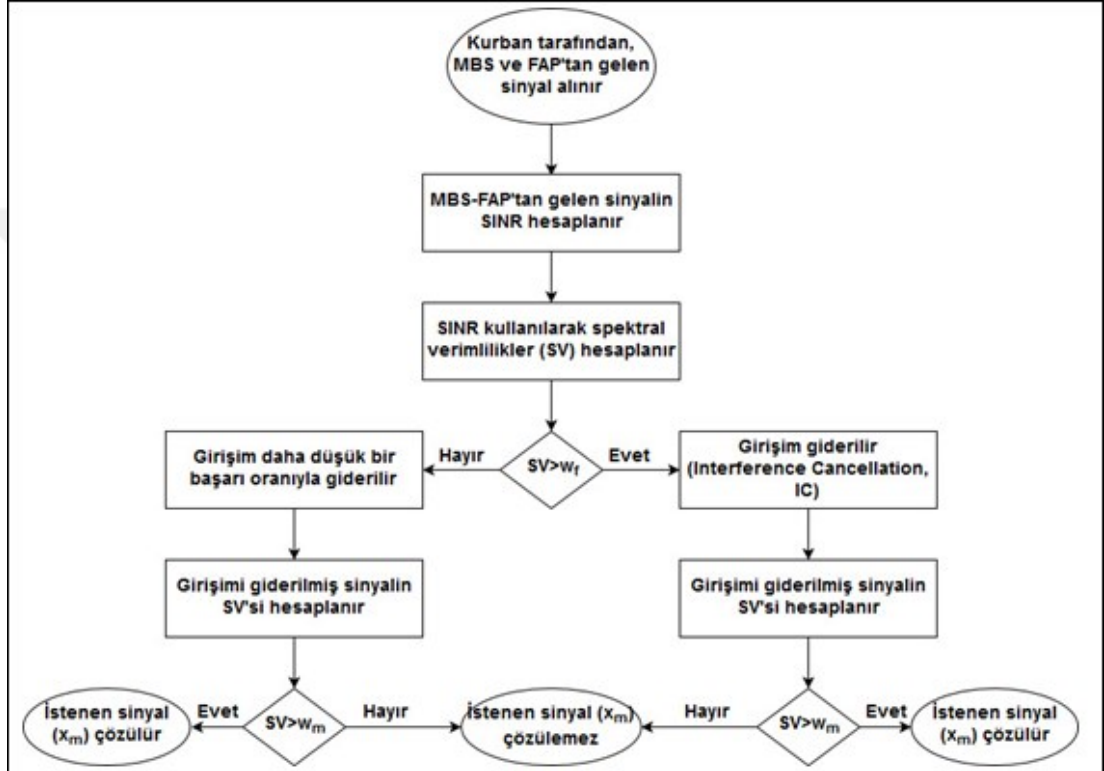
$$\gamma_{y_k}^{[x_f]} = \frac{|h_{f,k}|^2 P_f}{|h_{m,k}|^2 P_m + N_k} \quad (4.24)$$

ile ifade edilir. Girişimin giderilmesi için Denklem (4.24)'te verilen spektral verimlilik fonksiyonu bir eşik değeri ( $w_f$ ) karşılaştırılmaktadır [7].



Şekil 4.3. Kurban ve Röle'deki  $x_m$  ve  $x_f$  sinyallerine ait güç

Şekil 4.3'te x eksenine ilgili röleyi ve y eksenine alıcıdaki sinyallerin gücünü göstermektedir.  $R_1$ ,  $R_2$  ve  $R_3$  ise röleleri göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi kurban tarafında alınan  $x_m$  sinyaline ilişkin güç, (-74dBm)  $x_f$  sinyalinin gücünden (-56dBm) çok düşük olduğu için Şekil 4.4'te görüldüğü gibi kurbanın röle kullanmadan, eşik değerin aşıldığı ve aşılmadığı her iki durumda da belirli şartlar altında girişim sinyalini giderilebildiği kabul edilir.



Şekil 4.4. Kurban'ın Röle kullanmadan  $x_m$  sinyalini çözme diyagramı

Girişim giderildikten sonra kurbanın aldığı sinyal,

$$y_{k,IC} = h_{m,k} \sqrt{P_m} x_m + n_k \quad (4.25)$$

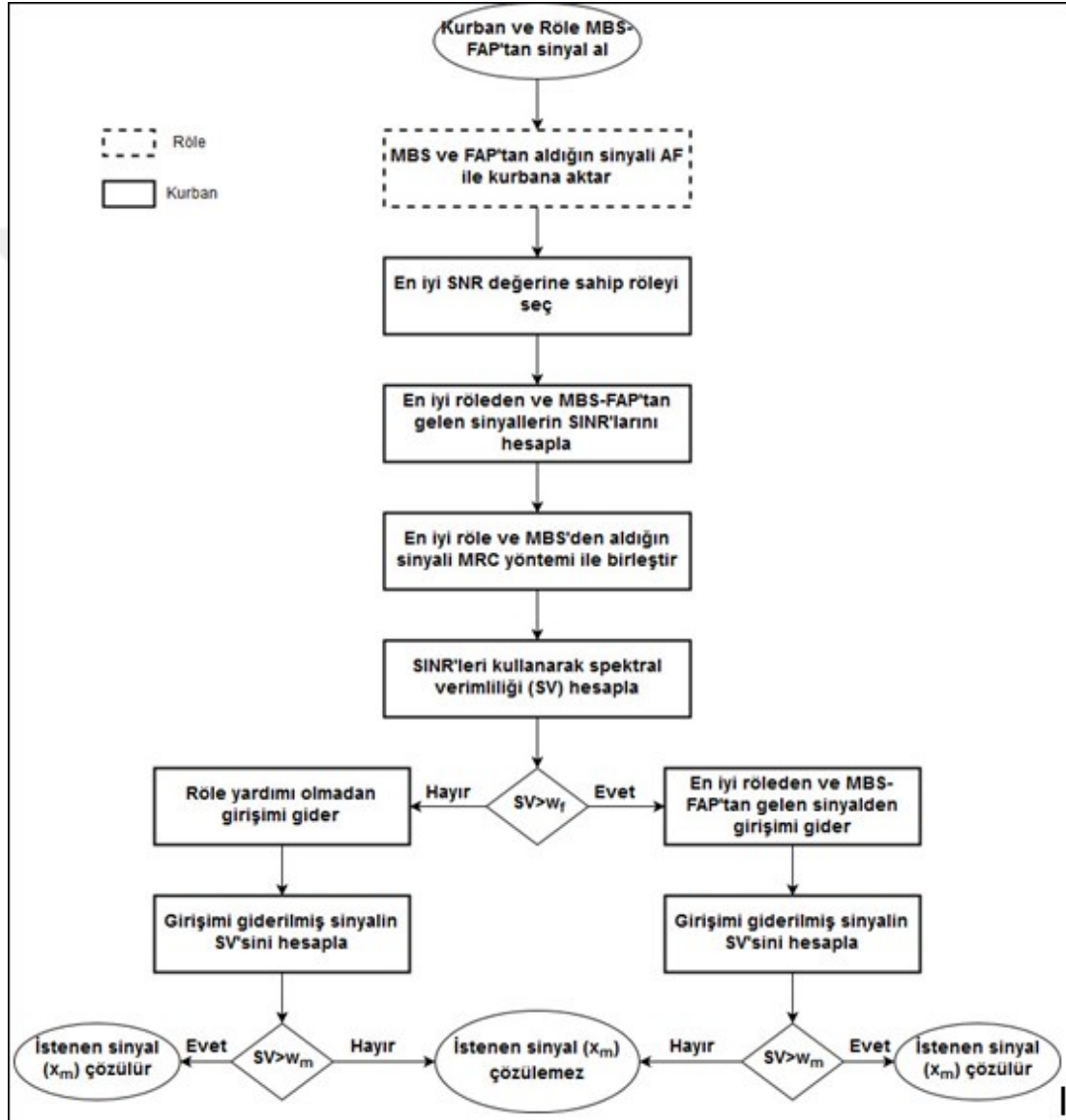
ile ifade edilir. Girişim sinyali giderildikten sonra, istenen sinyal  $x_m$ 'e ait SNR,

$$\gamma_{y_{k,IC}}^{[x_m]} = \frac{|h_{m,k}|^2 P_m}{N_k} \quad (4.26)$$

kullanılarak spektral verimlilik,

$$R_{y_{k,IC}}^{[x_m]} = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \gamma_{y_{k,IC}}^{[x_m]} \right) \quad (4.27)$$

şeklinde ifade edilir. Spektral verimlilik değeri, eşik değeri ( $w_m$ ) ile karşılaştırılır.  $R_{y_{k,IC}}^{[x_m]} > w_m$  olduğu sürece kurban MBS'den gelen  $x_m$  sinyalini çözebilir. Eşik değerin aşılmadığı durumlarda arzulanan sinyal elde edilemez.



Şekil 4.5. Kurban'ın Röle desteğiyle  $x_m$  sinyalini çözme diyagramı

İşbirlikli haberleşme durumunda ise kurban, en iyi röleden aldığı sinyali Denklem (4.15)'te gösterilen sinyal ile birleştirerek girişim gidermeyi amaçlar. Bu işlem için gereken adımlar Şekil 4.5'te görülmektedir. Röle, Denklem (4.16)'da aldığı sinyali

Denklem (4.17)'deki güç çarpanıyla ölçeklendirerek kurbanı iletmektedir. Kurbanın i. röleden AF aktarma yöntemiyle aldığı sinyal,

$$y_{a_i} = \frac{h_{m,r_i} h_{r_i,k} \sqrt{P_m P_r} x_m}{\sqrt{E[|y_{r_i}|^2]}} + \frac{h_{f,r_i} h_{r_i,k} \sqrt{P_f P_r} x_f}{\sqrt{E[|y_{r_i}|^2]}} + \frac{h_{r_i,k} n_{r_i} \sqrt{P_r}}{\sqrt{E[|y_{r_i}|^2]}} + n_k \quad (4.28)$$

denkleminin ifade edilebilir. Sistemde birden fazla röle bulunduğu için en iyi röle seçimi için 3 farklı yöntem önerilmektedir.  $\gamma_b$  en iyi röleye ait ani SNR'ı göstermek üzere; birinci durumda Denklem (4.29) ile gösterilen Max-Min [40] kuralı, ikinci durumda Denklem (4.30) ile gösterilen toplam SNR'ye göre ve üçüncü durumda ise Denklem (4.31) ile ifade edilen FAP-Röle arasındaki SNR değerine göre en iyi röle seçilmiştir. Max-Min kuralında FAP-Röle ve Röle-Kurban arasındaki ani SNR değerlerinden hangisi küçükse o değer alınır. Daha sonra en büyük değere sahip röle seçilir. Denklem (4.30)'da FAP-Röle ve Röle-Kurban arasındaki ani SNR değerleri toplanır. En büyük toplam değere sahip röle en iyi röle olarak seçilir. Son durumda ise FAP-Röle arasındaki en büyük ani SNR'a sahip röle en iyi röle olarak seçilir.

$$\gamma_b = \max_{i \in \mathcal{R}} \left\{ \min(\gamma_{f,r_i}, \gamma_{a_i,k}) \right\} \quad (4.29)$$

$$\gamma_b = \max_{i \in \mathcal{R}} (\gamma_{f,r_i} + \gamma_{a_i,k}) \quad (4.30)$$

$$\gamma_b = \max_{i \in \mathcal{R}} (\gamma_{f,r_i}) \quad (4.31)$$

En iyi röleye karar verildikten sonra girişimin giderilmesi için MRC yöntemi iki aşamada uygulanır. İlk aşamada kurban, en iyi röleden ve MBS-FAP'tan aldığı sinyallere MRC uygulayarak girişimi giderir. En iyi röleden gelen AF'deki girişim sinyalinin SINR'si,

$$\gamma_{y_{a_b}}^{[x_f]} = \frac{|h_{f,r_b}|^2 |h_{r_b,k}|^2 P_f P_r}{\sqrt{E[|y_{r_b}|^2]}} \bigg/ \frac{|h_{m,r_b}|^2 |h_{r_b,k}|^2 P_m P_r + |h_{r_b,k}|^2 P_r N_{r_b} + N_k}{\sqrt{E[|y_{r_b}|^2]}} \quad (4.32)$$

ile ifade edilir. En iyi röleden gelen AF sinyalinin ve MBS-FAP'tan gelen sinyalin SINR'si Denklem (4.33)'teki gibi birleştirilir.



$$\text{MRC}_1 \left( \gamma_{y_k}^{[x_f]}, \gamma_{y_{ab}}^{[x_f]} \right) = \gamma_{y_k}^{[x_f]} + \gamma_{y_{ab}}^{[x_f]} \quad (4.33)$$

Girişim sinyaline ait spektral verimlilik,

$$R_{\text{MRC}_1(y_k, y_{ab})}^{[x_f]} = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \text{MRC}_1 \left( \gamma_{y_k}^{[x_f]}, \gamma_{y_{ab}}^{[x_f]} \right) \right) \quad (4.34)$$

ile tanımlanır. Spektral verimlilik değeri eşik değerden ( $w_f$ ) büyük olduğunda girişim sinyali ( $x_f$ ) hem  $y_k$  'den hem de  $y_{ab}$  'den giderilebilir.

İkinci aşamada girişimden arındırılmış sinyaller birleştirilerek MBS'den alınan  $x_m$  sinyali elde edilir. Gürültüden arındırılan  $y_{k,IC}$  sinyali Denklem (4.25)'te gösterilmişti. En iyi röleden gelen ve girişimden arındırılan sinyal,

$$y_{ab,IC} = \frac{h_{m,r_b} h_{r_b,k} \sqrt{P_m P_r} x_m}{\sqrt{E \left[ |y_{r_b}|^2 \right]}} + \frac{h_{r_b,k} n_{r_b} \sqrt{P_r}}{\sqrt{E \left[ |y_{r_b}|^2 \right]}} + n_k \quad (4.35)$$

ile gösterilir.  $y_{ab,IC}$  'ye ilişkin SINR aşağıda gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\gamma_{y_{ab,IC}}^{[x_m]} = \frac{|h_{m,r_b}|^2 |h_{r_b,k}|^2 P_m P_r}{\sqrt{E \left[ |y_{r_b}|^2 \right]}} \bigg/ \frac{|h_{r_b,k}|^2 P_r N_{r_b}}{\sqrt{E \left[ |y_{r_b}|^2 \right]}} + N_k \quad (4.36)$$

En iyi röleden ve MBS-FAP'tan gelen  $x_m$  sinyaline ait SINR

$$\text{MRC}_2 \left( \gamma_{y_{k,IC}}^{[x_m]}, \gamma_{y_{ab,IC}}^{[x_m]} \right) = \gamma_{y_{k,IC}}^{[x_m]} + \gamma_{y_{ab,IC}}^{[x_m]} \quad (4.37)$$

şeklinde birleştirilir.  $\text{MRC}_2$  kullanılarak  $x_m$  sinyaline ait spektral verimlilik Denklem (4.38) ile hesaplanır.

$$R_{\text{MRC}_2(y_{k,IC}, y_{ab,IC})}^{[x_m]} = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \text{MRC}_2 \left( \gamma_{y_{k,IC}}^{[x_m]}, \gamma_{y_{ab,IC}}^{[x_m]} \right) \right) \quad (4.38)$$

Eğer  $R_{\text{MRC}_2(y_{k,IC}, y_{ab,IC})}^{[x_m]} > w_m$  ise kurban istediği  $x_m$  sinyalini elde edebilir.

### 4.2.3. Nümerik sonuçlar

Bu bölümde, Şekil 4.2'deki sistemde kurbanın maruz kaldığı girişim sinyalinin çıkarımı için gerçekleştirilen benzetimde Tablo 4.2'de [7, 41, 42] gösterilen değerler kullanılmıştır. En iyi röle seçimi Denklem (4.29-4.31)'de belirtilen kriterlere ve Tablo 4.3'te görülen düğümler arası mesafelere göre gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.2. Benzetimde kullanılan parametre seti [7]

Parametre	Değer
MBS-Kurban, MBS-Röle mesafesi	500 m
FAP-Kurban mesafesi	20 m
Spektral verimlilik eşik değeri	0 – 4 bit/s/Hz
MBS/FAP/Röle iletim gücü	43 dBm, 20 dBm ve 24 dBm
Gürültü gücü	-90 dBm
MBS anten yüksekliği ( $h_a$ )	15 m
Taşıyıcı frekans ( $f_c$ )	2000 MHz
MBS yol kaybı modeli	$40(1 - 4 \cdot 10^{-3}h) \log_{10}(d) - 18 \log_{10}(h) + 21 \log_{10}(f_c/10^6[\text{GHz}]) + 80$
FAP yol kaybı modeli	$127 + 30 \log_{10}(d/10^3[\text{km}])$

Tablo 4.2'de benzetimde kullanılan parametreler ve değerleri görülmektedir. Bu değerler 3GPP'nin sunduğu standartlardan alınmıştır. Tablodan da görüldüğü gibi MBS ve FAP'ın yol kayıpları farklı formüllerle hesaplanmaktadır.

Bu tabloda mesafeler seçilirken 1. Durum'da bütün mesafeler eşit, 2. Durum'da mesafeler farklı seçilmekle beraber Kurban-FAP mesafesinin 2. ve 3. rölelerin üzerinden toplamı eşit (60m), 3. Durum'da Röle-Kurban arası mesafe eşit ve Röle-FAP arası mesafeler farklı, 4. Durum'da Röle-FAP arası uzaklık eşit ve Röle-Kurban arası mesafe farklı seçilerek rölelerin performansı Denklem (4.29-4.31)'e göre değerlendirilmiştir. Tablo 4.2'deki yol kayıpları denklemleri hesaba katıldığında FAP-Röle-Kurban mesafesi ne kadar azalırse başarı o kadar artar.

Şekil 4.6'da en iyi röle seçiminin max-min kriterine göre yapıldığı, düğüm uzaklıklarının ise eşit ve 20m olduğu durumda  $x_m$  'in çözülme başarımı gösterilmektedir. Tüm röleler için uzaklık değerleri aynı seçildiğinden düğümler arasındaki yol kaybı da tüm röleler için aynı olmaktadır. Bu durumda küçük ölçekli sönmüleme kanal kazancı en iyi rölenin seçilmesinde rol oynamaktadır. Tüm

düğümler arasındaki kanallar bağımsız Rayleigh rastgele değişkeni olarak modellendiğinden 3 röle için de en iyi rölenin seçimi düzgün dağılımlı hale gelmektedir.

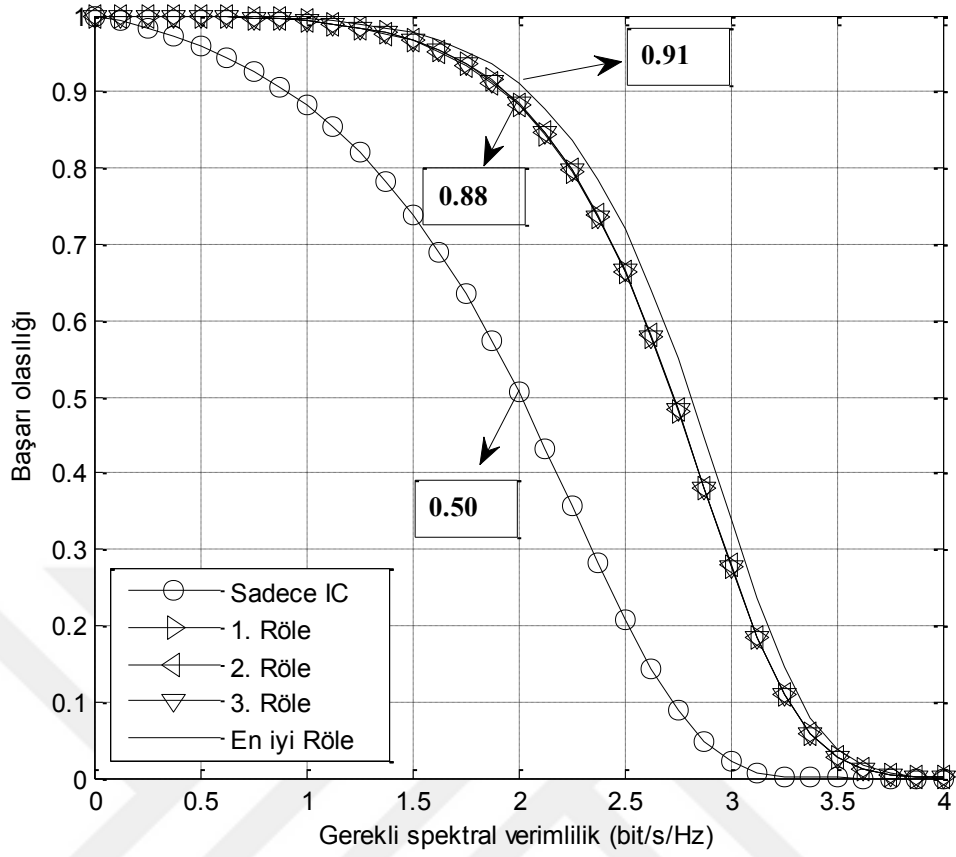
Tablo 4.3. Birimler arasındaki mesafeler

Röle	1. Durum		2. Durum		3. Durum		4. Durum	
	$d_{r,f}(m)$	$d_{r,k}(m)$	$d_{r,f}(m)$	$d_{r,k}(m)$	$d_{r,f}(m)$	$d_{r,k}(m)$	$d_{r,f}(m)$	$d_{r,k}(m)$
1	20	20	20	30	20	20	20	20
2	20	20	20	40	30	20	20	30
3	20	20	40	20	40	20	20	40

Önerilen sistemin performans artışını göstermek için eşik değerin 2 bit/sn/Hz olduğu durumda  $x_m$  verisinin çözülme başarımı 3 durum için ele alınmıştır. En iyi röle seçiminin yapıldığı durumda  $x_m$ 'in çözülme başarımı %91 iken, sistemin hiçbir röleden yardım almaması durumunda %50 ve rastgele bir röle seçimi durumunda %88 olduğu görülmektedir.

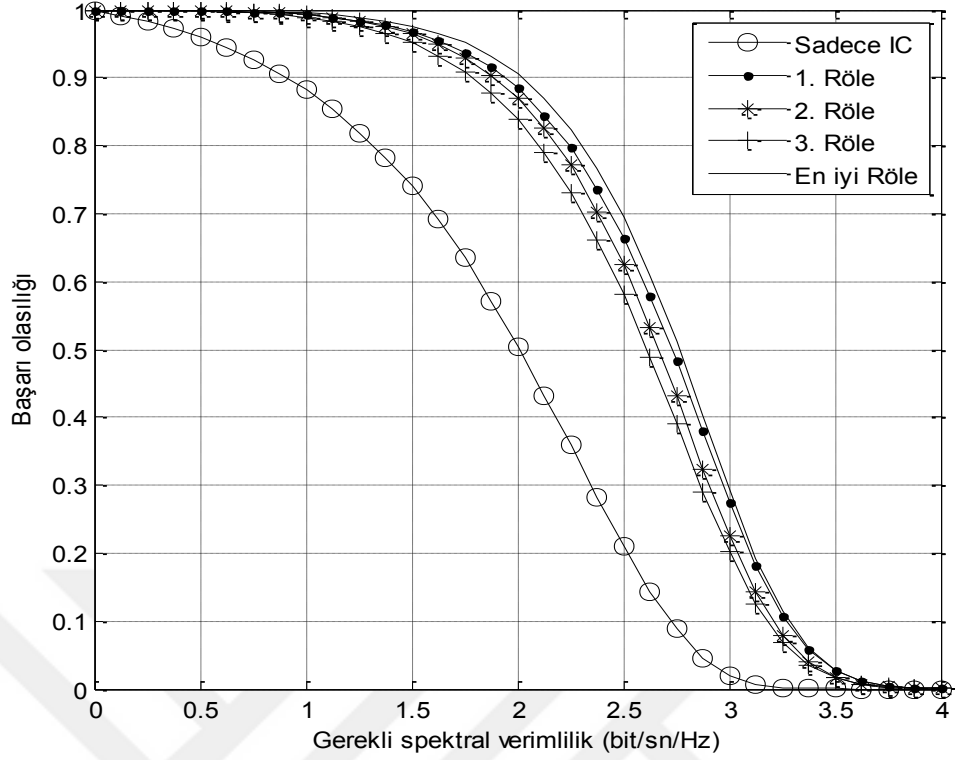
Rastgele bir röle seçiminden kasıt  $R_1$ ,  $R_2$  ve  $R_3$  rölelerinden birinin seçilmesidir. Burada her bir rölenin FAP ve Kurban'a olan uzaklığı aynı olduğundan seçilme olasılıkları birbirine eşittir. Sonuç olarak, en iyi röle seçimi ile röle kullanılmaması durumuna göre başarı %41'lik, rastgele bir röle seçimi durumuna göre ise %3'lük bir performans artışı sağlanmıştır.

Eşik değerin 3 bit/sn/Hz olduğu durumda Tablo 4.5'te Max-Min ve mesafeler için 1. Durum'a bakıldığında en iyi rölenin  $x_m$ 'i çözme başarımı %34, rastgele bir rölenin başarımı %28 ve röle kullanılmaması durumu da %2 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.6. Kurban-Röle<sub>1</sub> ve Röle<sub>1</sub>-FAP arası uzaklıklar eşit alındığında kurbanın  $x_m$  verisini çözme başarımının gerekli spektral verimliliğe göre değişimi

Başka bir senaryoda, en iyi röle seçim kriterleri, rölelerin FAP'a farklı ve Kurban'a eşit mesafede olduğu durum gözlemlenmiştir. Bunun için Tablo 4.3'teki 3. Durum göz önüne alınmıştır. Şekil 4.7 incelendiğinde Max-Min kuralına göre yapılan en iyi röle seçme yönteminin herhangi bir röleyi seçmekten daha başarılı olduğu görülmektedir. Spektral verimliliğin (Spectral Efficiency, SV) 2 bit/sn/Hz olduğu durum için Tablo 4.5'e bakıldığında en iyi röle %91, Röle<sub>1</sub> %89, Röle<sub>2</sub> %87, Röle<sub>3</sub> %84 ve rölenin kullanılmadığı durum %50 başarı göstermiştir. Röle<sub>1</sub>'den Röle<sub>3</sub>'e Röle-FAP arasındaki mesafe arttıkça başarımın da düştüğü gözlemlenmiştir.



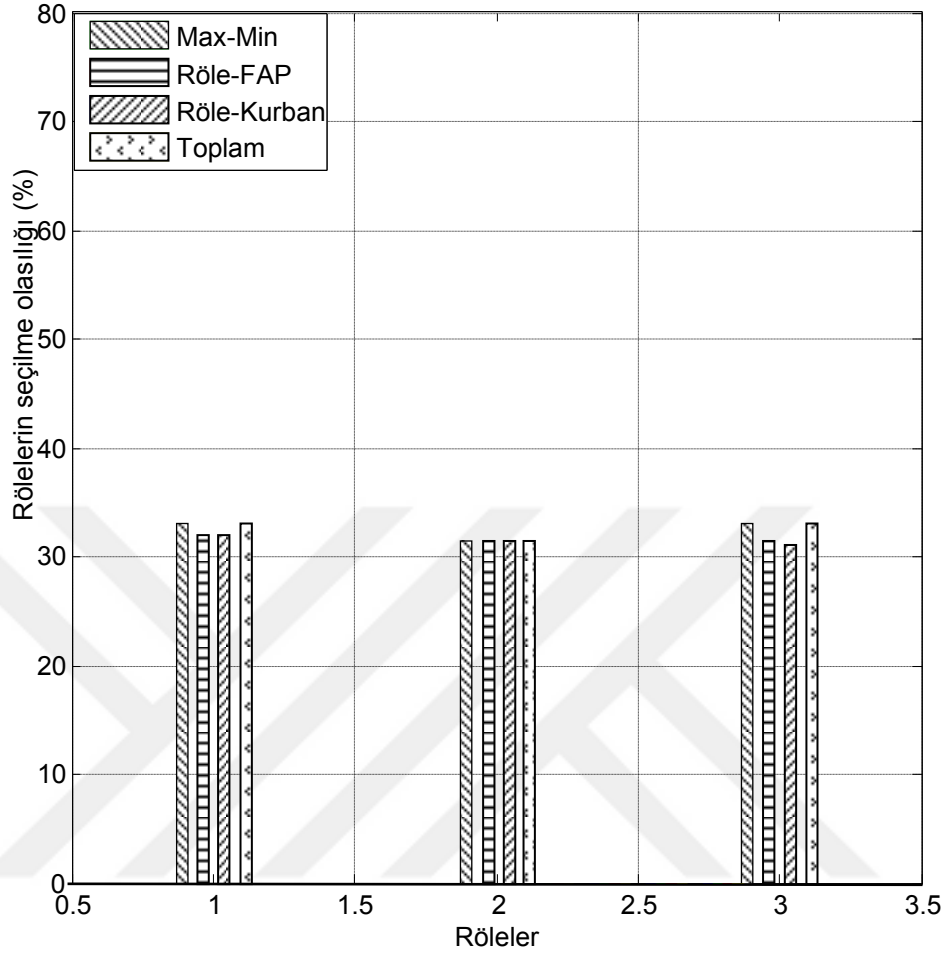
Şekil 4.7. Farklı mesafeler için kurbanın  $x_m$  verisini çözme başarımının gerekli spektral verimliliğe göre değişimi

Tablo 4.4. Farklı mesafeler için rölelerin seçilme yüzdeleri

Röle	1. Durum				2. Durum				3. Durum				4. Durum			
	Max-Min (%)	Röle-FAP (%)	Röle Kurban (%)	Toplam (%)	Max-Min (%)	Röle-FAP (%)	Röle Kurban (%)	Toplam (%)	Max-Min (%)	Röle-FAP (%)	Röle Kurban (%)	Toplam (%)	Max-Min (%)	Röle-FAP (%)	Röle Kurban (%)	Toplam (%)
1	33	34	34	33	58	49	20	32	69	74	34	44	55	34	75	65
2	33	33	33	33	30	49	6	19	24	21	33	30	31	33	20	22
3	34	33	33	34	12	2	74	49	7	5	33	26	14	33	5	13

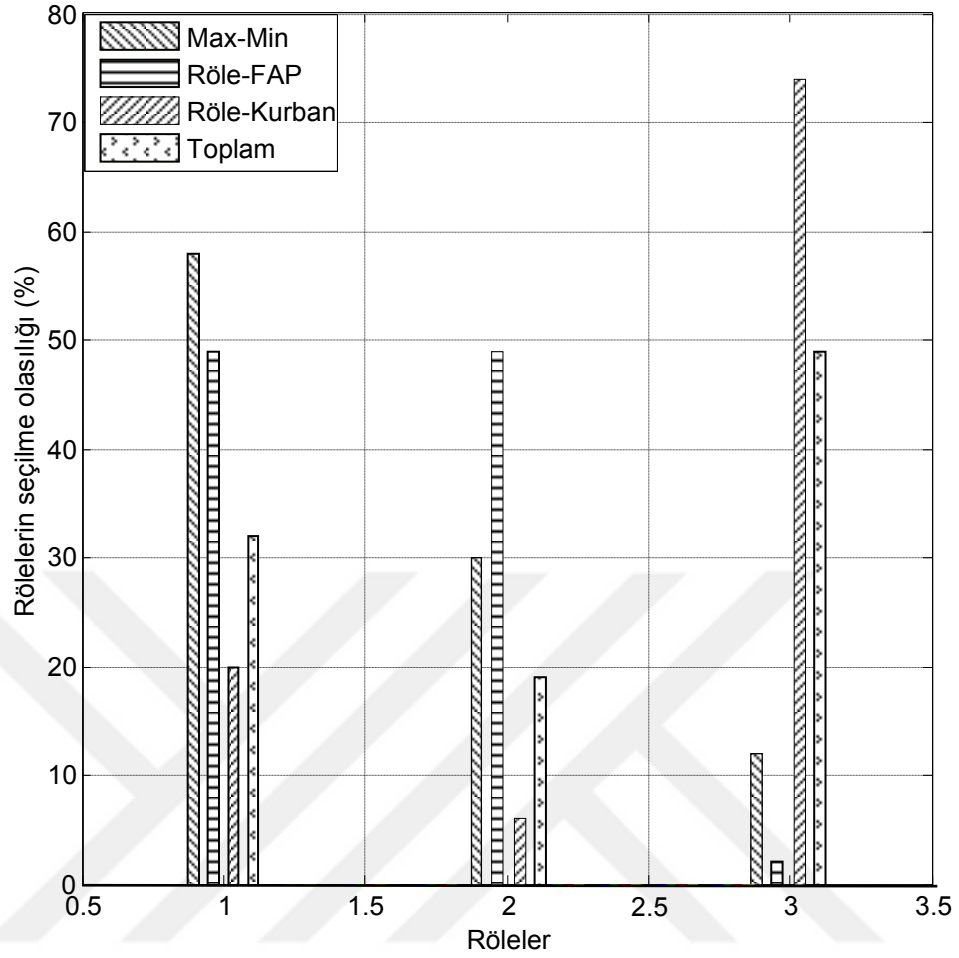
En iyi röle seçiminin mesafelere bağlı değişimini gözlemlemek amacıyla çeşitli benzetimler yapılmıştır.

Şekil 4.8'den sonra histogramı gösterilen rölelerin farklı mesafe durumlarında farklı seçim algoritmalarına göre seçimlerinin sayısal değerleri Tablo 4.4'te görülmektedir. Örneğin 3. Durum'da Max-Min kuralına göre Röle<sub>1</sub> %69, Röle<sub>2</sub> %24 ve Röle<sub>3</sub> %7 olarak seçilmişlerdir.



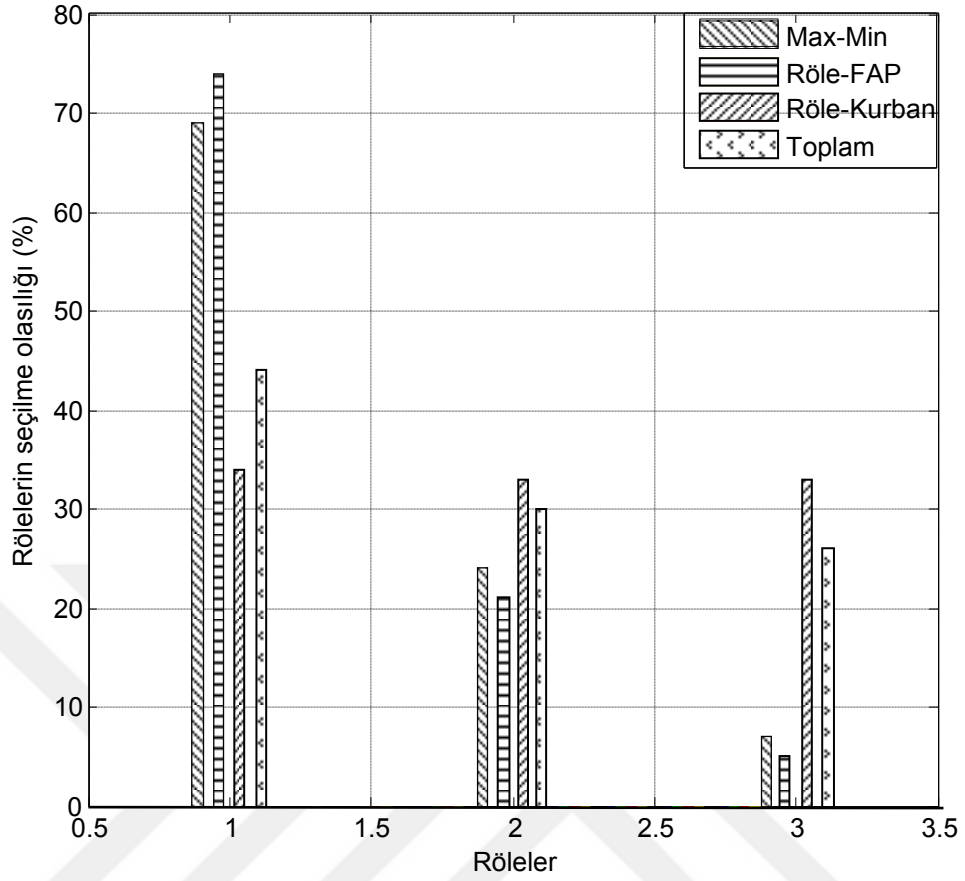
Şekil 4.8. Tablo 4.3'te Durum 1 için rölelerin seçilme yüzdesi

Tablo 4.3 Durum 1'de bütün mesafeler eşit seçildiği için Şekil 4.8'de rölelerin Max-Min, Röle-FAP, Röle-Kurban ve Toplam yöntemlerine göre aynı oranda seçildiği görülmektedir.



Şekil 4.9. Tablo 4.3'te Durum 2 için rölelerin seçilme yüzdesi

Tablo 4.3 Durum 2'de bütün mesafeler farklı seçilmekle beraber Röle<sub>2</sub> ve Röle<sub>3</sub> 'ün toplam mesafeleri eşit (60m) seçilmiştir. Şekil 4.9'da bakıldığında Röle<sub>1</sub> Max-Min kuralına, Röle<sub>2</sub> Röle-FAP kuralına göre, Röle<sub>3</sub> ise Röle-Kurban kuralına göre en iyi sonucu vermiştir. Röle<sub>2</sub>'nin Röle-FAP mesafesi en düşük olduğu için (20m) bu rölenin en iyi seçimi buna göre yapılmıştır. Röle<sub>3</sub>'ün ise Röle-Kurban mesafesi daha kısa (20m) olduğu için bu kritere göre seçim yapılmıştır.

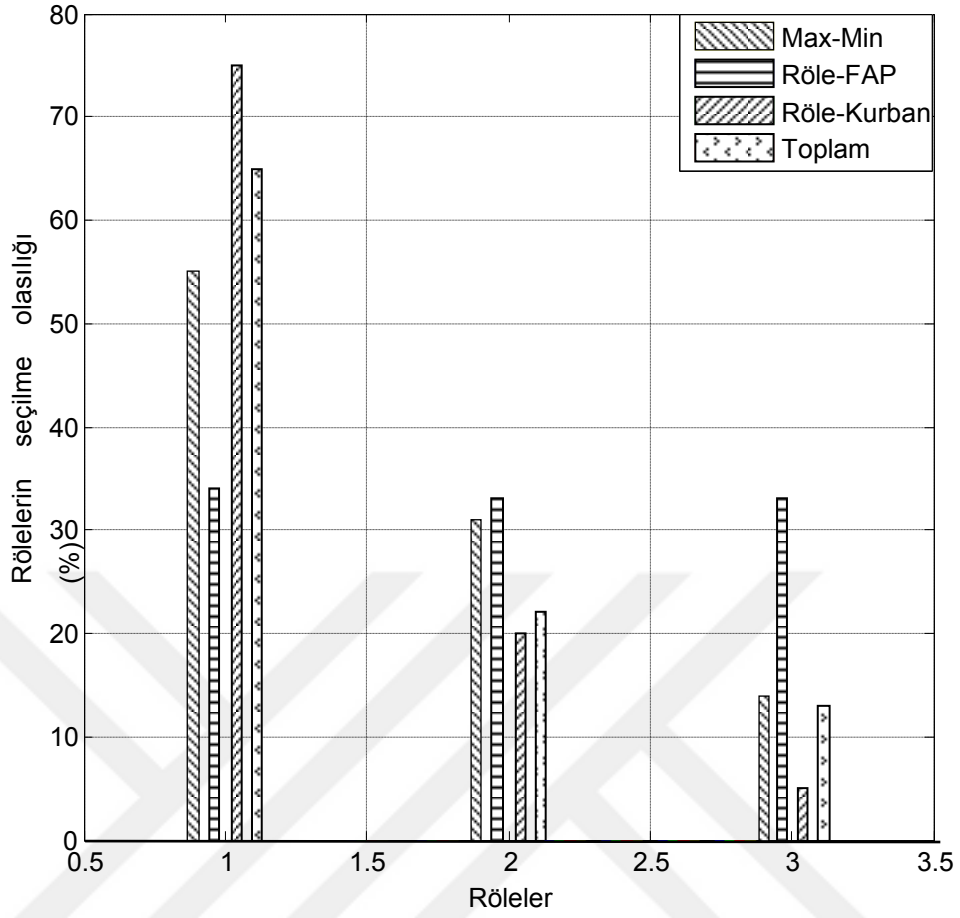


Şekil 4.10. Tablo 4.3'te Durum 3 için rölelerin seçilme yüzdesi

Tablo 4.3 Durum 3'te Röle-Kurban mesafeleri eşit Röle-FAP mesafeleri ise farklı seçilerek performans değerlendirilmesi yapılmıştır.

Şekil 4.10'a bakıldığında Röle<sub>1</sub>, Röle-FAP kuralına, Röle<sub>2</sub> ve Röle<sub>3</sub> Röle-Kurban kuralına göre en iyi sonucu vermiştir. Röle<sub>1</sub> için hem Röle-FAP hem de Röle-Kurban mesafesi 20m seçilmesine rağmen en iyi seçimin Röle-FAP kuralına göre yapılması küçük ölçekli sönmüleme etkisinden kaynaklanmaktadır. Röle<sub>2</sub> ve Röle<sub>3</sub>'ün Röle-Kurban mesafeleri en kısa (20m) olduğu için bu kritere göre seçim yapılmıştır.





Şekil 4.11. Tablo 4.3'te Durum 4 için rölelerin seçilme yüzdesi

Tablo 4.3 Durum 4'te Röle-FAP mesafeleri eşit (20m) Röle-Kurban mesafeleri ise farklı seçilerek performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 4.11'e bakıldığında Röle<sub>1</sub> Röle-Kurban kuralına, Röle<sub>2</sub> ve Röle<sub>3</sub> Röle-FAP kuralına göre en iyi sonucu vermiştir. Röle<sub>2</sub> ve Röle<sub>3</sub>'ün Röle-FAP mesafeleri en kısa (20m) olduğu için bu kritere göre seçim yapılmıştır.

Tablo 4.5'e bakıldığında öncelikle spektral verimlilik değeri 2'den 3'e çıkarıldığında en iyi röle seçme, herhangi bir röle seçme ve sadece girişim giderme yöntemlerinin başarısının düştüğü görülmektedir. Sadece girişim giderme durumunda, röleler kullanılmadığı için başarı oranı röle seçme algoritmalarından ve mesafe değişimlerinden etkilenilmemektedir.

Tablo 4.5. En iyi rölenin (EİR), üç farklı rölenin ve sadece girişim gidermenin (IC) kullanıldığı durumlarda farklı spektral verimlilik değerlerine (bit/s/Hz) göre başarı olasılıkları (%)

Durum	Seçim	Max-Min		Röle-FAP		Röle-Kurban		Toplam	
		SV=2	SV=3	SV=2	SV=3	SV=2	SV=3	SV=2	SV=3
1	EİR	91	34	88	31	91	32	91	33
	Röle <sub>1</sub>	88	28	89	27	89	28	89	28
	Röle <sub>2</sub>	88	28	88	28	89	28	89	27
	Röle <sub>3</sub>	88	28	88	28	89	28	88	27
	IC	50	2	50	2	50	2	51	2
2	EİR	87	24	82	21	88	23	84	23
	Röle <sub>1</sub>	84	22	84	21	85	22	85	21
	Röle <sub>2</sub>	84	20	81	17	81	17	81	17
	Röle <sub>3</sub>	81	17	84	20	84	20	84	20
	IC	51	2	51	2	51	2	50	2
3	EİR	91	29	89	31	88	27	88	28
	Röle <sub>1</sub>	89	28	87	28	89	28	88	28
	Röle <sub>2</sub>	87	23	84	20	87	23	87	23
	Röle <sub>3</sub>	84	20	87	28	84	20	84	20
	IC	50	2	51	2	51	2	51	2
4	EİR	90	29	84	25	90	29	87	29
	Röle <sub>1</sub>	88	28	89	28	88	28	88	28
	Röle <sub>2</sub>	85	21	85	22	84	22	84	21
	Röle <sub>3</sub>	81	18	81	17	80	17	81	17
	IC	51	2	51	2	50	2	51	2

### 4.3. Röle Açısının Değiştirilmesine Bağlı Performans Analizi

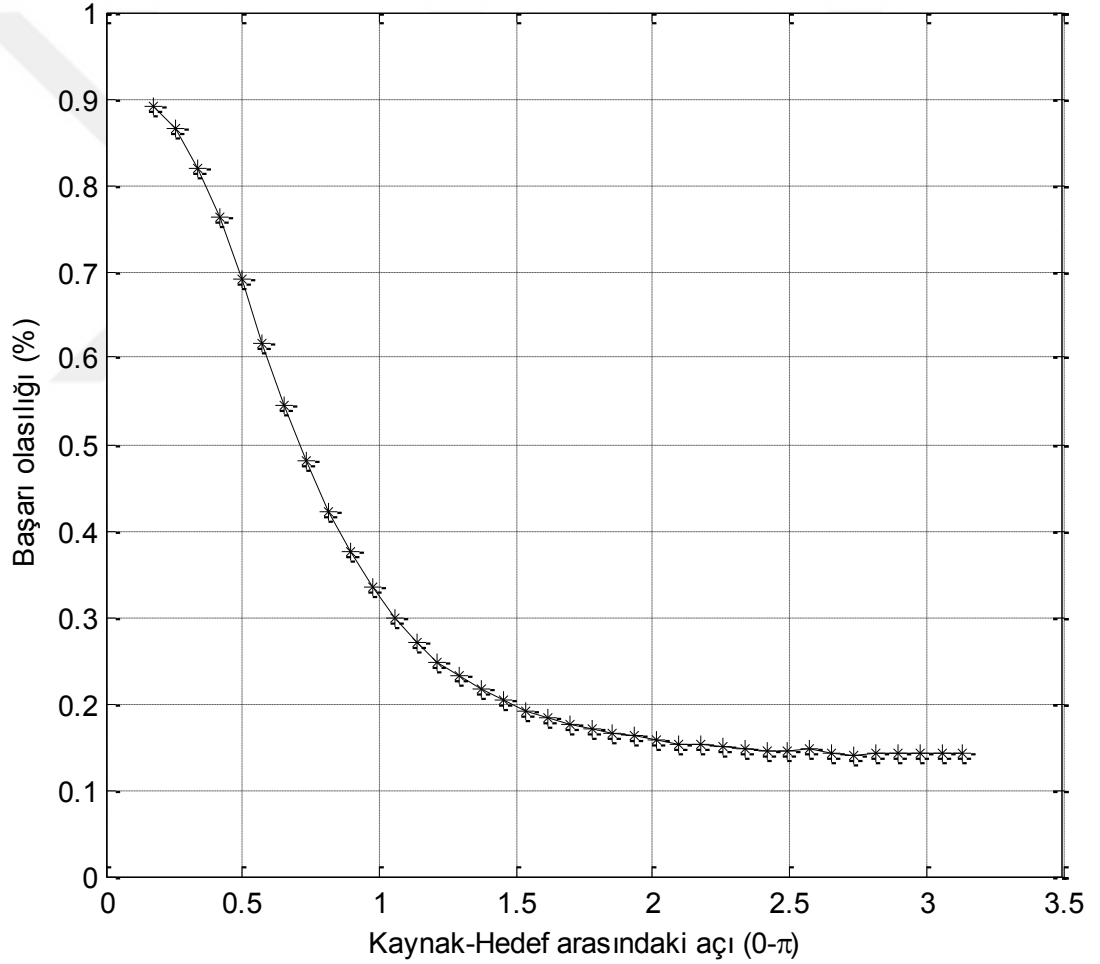
Çalışmanın bu kısmında röleli haberleşmenin geometrik yerleşimi dikkate alınarak benzetim yapılmıştır. Şekil 3.1’de görülen Kaynak-Röle-Hedef arasındaki  $\beta$  açısı değiştirilerek Hedef’in girişimi giderme başarısı bu açının değişimine göre gözlemlenmiştir. [30]’da yapılan çalışmada birimler arasındaki yolların  $\beta$  açısına bağlı ifadesi kosinüs teoremine göre,

$$G_{KR}^{-2/v} + G_{RH}^{-2/v} - 2G_{KR}^{-1/v} G_{RH}^{-1/v} \cos(\beta) = 1 \quad (4.39)$$

ifade edilebilir. Bu denklemde  $G_{KR} = (d_{KH}/d_{KR})^v$  Kaynak-Röle arasındaki,  $G_{RH} = (d_{KH}/d_{RH})^v$  Röle-Hedef arasındaki ve  $G_{KH} = 1$  Kaynak-Hedef arasındaki mesafelere bağlı yol kayıplarını göstermektedir. Röle-Hedef arasındaki yol kaybı birim (1) olarak alınmıştır. Yol kaybı sabiti  $v$  ile gösterilmiştir. Denklem (4.39)'daki  $v$  2 alınıp mesafelere bağlı düzenleme yapılırsa,

$$d_{KR}^2 + d_{RH}^2 - 2d_{KR}d_{RH} \cos(\beta) = d_{KH}^2 \quad (4.40)$$

eşitliği elde edilir. Denklem (4.40)'daki  $\beta$  açısı  $\pi/18-\pi$  arasında değiştirilerek benzetim yapılmıştır.



Şekil 4.12. Kaynak-Röle-Hedef arasındaki açının değişimine bağlı Kurban'ın  $x_m$  sinyalini çözme başarısı

Şekil 4.12'de yapılan benzetim görülmektedir. Tablo 4.2'de 3GPP tarafından FAP'lar için tanımlanan yol kaybı modeli verilmiştir. Bu kaybın birimler arasındaki

mesafeye bağlı olduğu görülmektedir. Denklem (4.40)'ta bu mesafenin kosinse bağlı değiştiği görülmektedir.

Kosinüs doğrusal bir fonksiyon olmadığı için Şekil 4.12'de Hedef'in  $x_m$  verisini çözme başarisının kosinüs karakterini gösterdiği görülmektedir.  $\beta$  açısı arttııa veriyi çözme başarisının dştğu görülmektedir.

Aının artmasıyla beraber FAP-Kurban arasındaki mesafe 0 metreden FAP-Röle ve Röle-Kurban arasındaki toplam mesafeye kadar artmıştır. Mesafe arttııa yol kaybı artar, dolayısıyla alınan işaretin gücü azaldığı için istenen sinyalin çözülme başarısı düşer.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Şekil 1.1’de görülen Heterojen Hücreli Ağlarda girişim giderme için çözüm önerisi sunulmuştur. Problemin çözümü öncesi literatür taraması yapılmış ve daha önce sunulan çözüm teknikleri araştırılmıştır. MBS ve FAP’lardan oluşan HCN’ler aynı zamanda LTE yapısı içinde incelenmektedirler. HCN’lerin içindeki kullanıcılar baz istasyonları aracılığıyla haberleşmelerinin yanında herhangi bir baz istasyonuna ihtiyaç duymadan da birbirleriyle (D2D) haberleşebilmektedirler. Haberleşme ağındaki kullanıcıların aynı spektrum bandını kullanmaları girişime sebep olur.

Bu girişimin engellenmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Girişimin engellenemediği durumlarda bu girişimi alıcıda gidermek için çözümler sunulmaktadır. Girişimin engellenmesi veya giderilmesi için kullanılan telsiz haberleşme kanallarının çeşitli parametreler aracılığıyla tanımlanması gerekmektedir.

İşbirlikli haberleşmede toplam gücü röle ve kaynak arasında optimum paylaşımın başarı olasılığını arttırmaktadır. DF için güç paylaşımı yapılırken sinyal çözüldükten sonra kaynağa iletildiği için modülasyon çeşidi de göz önüne alınmıştır. Ayrıca güç paylaşımı Kaynak-Röle ve Röle-Hedef arasındaki kanal katsayılarının varyansına göre yapılmıştır. Gücün büyük kısmının Kaynak’a tahsis edilmesi beklenmektedir. Denklem (4.8, 4.9, 4.13 ve 4.14)’e bağlı olarak Kaynak’ın gücü  $\frac{1}{2}$  ile 2 arasında değişirken Röle’nin gücü 0 ile  $\frac{1}{2}$  arasında değişmektedir. AF yönteminde ise sinyal sadece güçlendirildiği için modülasyon çeşidi önemli değildir. Güç paylaşımı ise DF’deki değerler aralığıyla aynı değişimi göstermektedir. Yapılan çalışmada benzetim için bir üst sınır belirlenmiş ve bu sınırın altında kalınması hedeflenmiştir.

Benzetimde Kaynak-Röle arasında güç paylaşımının yapıldığı durumda bu sınırın altında kalındığı Şekil 4.1’de gözlemlenmiştir. Bu benzetim sonucu Kaynak-Röle arasında rasgele güç paylaşımı yerine kanal katsayılarına ve modülasyon çeşidine göre güç paylaşımının yapılması başarı oranını arttırmaktadır.

Kaynak-Röle arasında güç paylaşımının yanında sistemde birden fazla rölenin olduğu durumda en iyi rölenin seçilmesi durumu da incelenmiştir. En iyi rölenin seçilmesi için hedefteki ani SNR değerlerine bakılmıştır. İlk olarak Max-Min kuralıyla Kaynak-Röle ve Röle-Hedef arasındaki ani SNR değerlerine bakılarak röle seçimi yapılmıştır. İkinci çalışmada Kaynak-Röle ve Röle-Hedef arasındaki toplam ani SNR değerine göre en iyi röle seçimi yapılmıştır. Son olarak sadece Kaynak-Röle arasındaki değere göre en iyi röle seçimi yapılmıştır.

Öncelikle spektral verimliliğin 2bit/sn/Hz olduğu ve birimler arasındaki mesafenin eşit olduğu durumda röle kullanılmadan kaynağın arzulan sinyali elde etme başarısının %50 olduğu Şekil 4.6'da görülmüştür. Herhangi bir rölenin seçildiği durumda bu başarı %88'e çıkmıştır. En iyi rölenin seçildiği durumda ise başarı oranı %91 olarak gerçekleşmiştir.

Daha sonra en iyi rölenin seçilme yöntemleri aynı spektral verimlilik değeri için karşılaştırılarak başarı olasılığı Max-Min yönteminde %91, toplam değer yönteminde %90 ve Kaynak-Röle yönteminde %88 olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar değerlendirildiğinde röleli haberleşme başarı oranını arttırmakla beraber en iyi rölenin seçilmesi durumu bu oranı daha da arttırmaktadır. İstenen sinyalin elde edilmesinde rölelerin konumu, en iyi röle seçimine göre daha etkilidir.

İşbirlikli haberleşmede başarıyı etkileyen bir başka faktörün Kaynak-Röle-Hedef arasındaki açı olduğu düşünülmüştür. Bu amaçla Kaynak-Röle-Hedef arasındaki açı  $0-\pi$  aralığında değiştirilerek böylece kosinüs teoremine göre Kaynak-Hedef arasındaki mesafe değiştirilmiştir. Spektral verimliliğin 2bit/sn/Hz olduğu durum için yapılan benzetimde, açının sıfır olduğu durumda istenen sinyalin çözülme başarısı %90 iken açı  $180^0$  olduğunda başarı oranı %14 olarak Şekil 4.12'de gerçekleşmiştir. Bu değerlere bakıldığında açı azaldıkça başarı oranı artmaktadır.

En iyi röle seçimi yapılırken üç tane röle içinden seçim yapılmıştır. İlerde yapılacak çalışmalarda bu sayının daha da artırılmasıyla bir genelleme yapılabilir. Ayrıca kaynak-röle arasında güç paylaşımı yapıldığı gibi röleler arasında da güç paylaşımının yapıldığı durum benzetimle gözlemlenebilir. Sistemde birden fazla rölenin kullanıldığı durumda Kaynak-Röle-Hedef'in geometrik yerleşiminin dikkate alındığı çalışmalarda yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Ghosh A., Mangalvedhe N., Ratasuk R., Mondal B., Cudak M. et al., Heterogeneous Cellular Networks: From Theory to Practice, *IEEE Communication Magazine*, DOI: 10.1109/MCOM.2012.6211486.
- [2] Chandrasekhar V., Kountouris M., Andrews J. G., Coverage in Tiered Cellular Networks with Spatial Diversity, *Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE*, Honolulu, HI, USA, 30 November -4 December 2009.
- [3] Hwang D., Kim D. I., Choi S. K., Lee T. J., UE Relaying Cooperation Over D2D Uplink in Heterogeneous Cellular Networks, *IEEE Transactions on Communications*, DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2486773.
- [4] Zahir T., Arshad K., Nakata A., Moessner K., Interference Management in Femtocells, *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, DOI: 10.1109/SURV.2012.020212.00101.
- [5] Minu P. N., Premkumar C. V., Cooperative Relaying for Interference Mitigation in Device to Device Communication, *Data Science and Engineering (ICDSE), 2016 International Conference on*, Cochin, India, 23-25 August 2016.
- [6] Safdar G. A., Rehman M. U., Muhammed M., Imran M. A., Tafazolli R., Interference Mitigation in D2D Communication Underlying LTE-A Network, *IEEE Access*, DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2621115.
- [7] Choi S. K., Kim W. J., Lee H. S., Kim D. I., Interference Forwarding for D2D Based Heterogeneous Cellular Networks, *Communications in China (ICCC), 2013 IEEE/CIC International Conference on*, Xi'an, China, 12-14 August 2013.
- [8] 3GPP, TR 36.843 (V12.0.0) Study on LTE Device-to-Device Proximity Services - Radio Aspects, *3rd Generation Partnership Project*, Sophia-Antipolis, March 2014.
- [9] Goldsmith A., *Wireless Communications*, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- [10] Akin A. İ., İlhan H., Özdemir Ö., Error Performance Analysis of Decode and Forward Based Cooperative Systems with Relay Selection, *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2013 21st*, Haspolat, Türkiye, 24-26 Nisan 2013.

- [11] Akin A. İ., İlhan H., Özdemir Ö., Relay Selection for DF-Based Cooperative Vehicular Systems, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, DOI: 10.1186/s13638-015-0251-3.
- [12] Ata S. Ö., Altunbaş İ., Relay Antenna Selection for V2V PLNC System, *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2015 23th, Malatya, Türkiye, 16-19 Mayıs 2015.
- [13] Kavas A., Gezgin Haberleşmenin Evrimi, Elektrik Mühendisleri Odası, [http://www.emo.org.tr/ekler/8afabcc74541c09\\_ek.pdf?dergi=1039](http://www.emo.org.tr/ekler/8afabcc74541c09_ek.pdf?dergi=1039), (Ziyaret tarihi: 28 Mayıs 2017).
- [14] Molish A. F., *Wireless Communication*, 2nd ed., Wiley, West Sussex, 2011.
- [15] Nohrborg M., LTE, 3GPP, <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>, (Ziyaret tarihi: 28 Mayıs 2017).
- [16] Wannstrom J., LTE-Advanced, 3GPP, <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>, (Ziyaret tarihi: 28 Mayıs 2017).
- [17] LTE Carrier Aggregation Technology Development and Deployment Worldwide, 4G Americas, [http://www.5gamericas.org/files/8414/1471/2230/4G\\_Americas\\_Carrier\\_Aggregation\\_FINALv1\\_0\\_3.pdf](http://www.5gamericas.org/files/8414/1471/2230/4G_Americas_Carrier_Aggregation_FINALv1_0_3.pdf), (Ziyaret tarihi: 28 Mayıs 2017).
- [18] Soret B., Wang Y., Pedersen K. I., CRS Interference Cancellation in Heterogeneous Networks for LTE-Advanced Downlink, *Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on*, Ottawa-ON, Kanada, 10-15 Haziran 2012.
- [19] Xu S., Wang H., Chen T., Huang Q., Peng T., Effective Interference Cancellation Scheme for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks, *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd*. Ottawa-ON, Kanada, 6-9 Eylül 2010.
- [20] Perez D. L., Güvenç İ., Roche G. D. L., Kountouris M., Quek T. Q. S. et al., Enhanced Intercell Interference Coordination Challenges in Heterogeneous Networks, *IEEE Wireless Communication*, DOI: 10.1109/MWC.2011.5876497.
- [21] Patel C., Yavuz M., Nanda S., Femtocells (Industry Perspectives), *IEEE Wireless Communication*, DOI: 10.1109/MWC.2010.5601950.
- [22] Saquib N., Hossain E., Le L. B., Kim D. I., Interference Management In OFDMA Femtocell Networks Issues And Approaches, *IEEE Wireless Communication*, DOI: 10.1109/MWC.2012.6231163.
- [23] Shah S., Kittipiyakul S., Interference in Femtocell Networks, *IEEE Conference Publications*, DOI: 10.4108/icst.iniscom.2015.258415.



- [24] Ni Y., Jin S., Wong K. K., Zhu H., Shao S., Outage Performances for Device-to-Device Communication Assisted by Two-Way Amplify-and-Forward Relay Protocol, *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE*, İstanbul, Türkiye, 6-9 Nisan 2014.
- [25] Barbieri A., Damnjanovic A., Ji T., Montojo J., Wei Y. et al., LTE Femtocells System Design and Performance Analysis, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, DOI: 10.1109/JSAC.2012.120408.
- [26] Nishimori K., Kitao K., Imai T., Interference Cancellation Using Relay Station in Heterogeneous Networks, *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE*, San Francisco-CA, USA, 5-8 Eylül.
- [27] Men J., Ge J., Zhang C., Performance Analysis of Nonorthogonal Multiple Access for Relaying Network over Nakagami-m Fading Channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, DOI: 10.1109/TVT.2016.2555399.
- [28] Rappaport T. S. , *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [29] Proakis J. G., Salehi M., *Communication System Engineering*, 2nd ed., Prentice- Hall, New Jersey, 1994.
- [30] İlhan H., Kaskat Sönümlenmeli kanallar için İşbirlikli Sistem Tasarımı ve Hata Başarım Analizi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 315435.
- [31] Janaswamy R., *Radiowave Propagation and Smart Antennas for Wireless Communications*, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [32] Renfors M., Diversity Techniques, Advanced Course in Digital Transmission. [http://www.cs.tut.fi/kurssit/TLT-5906/L2\\_Diversity.pdf](http://www.cs.tut.fi/kurssit/TLT-5906/L2_Diversity.pdf), (Ziyaret tarihi: 28 Mayıs 2017).
- [33] Loyka S., Diversity Combining Techniques, Wireless Communication, [http://www.site.uottawa.ca/~sloyka/elg4179/Lec\\_11\\_EL4179.pdf](http://www.site.uottawa.ca/~sloyka/elg4179/Lec_11_EL4179.pdf), (Ziyaret tarihi: 28 Mayıs 2017).
- [34] Su W., Sadek A. K., Liu K. J. R., Cooperative Communication Protocols in Wireless Networks: Performance Analysis and Optimum Power Allocation, *Wireless Personal Communications*, DOI: 10.1007/s11277-007-9359-z.
- [35] Nabar R. U., Bolcskei H., Kneubuhler F. W., Fading Relay Channels Performance Limits and Space-Time Signal Design, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, DOI: 10.1109/JSAC.2004.830922.
- [36] Zhao Y., Adve R., Lim T. J., Improving Amplify-and-Forward Relay Networks Optimal Power Allocation versus Selection, *Information Theory, 2006 IEEE International Symposium on*, DOI: 10.1109/TWC.2007.06026.

- [37] Mogensen P., Na W., Kovacs I. Z., Frederiksen F., Pokhariyal A. et al., LTE Capacity Compared to the Shannon Bound, *Vehicular Technology Conference, 2007 VTC2007-Spring. IEEE 65th*, Dublin, Irlanda, 22-25 Nisan 2007.
- [38] Beres E., Adve R., Selection Cooperation in Multi-Source Cooperative Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, DOI: 10.1109/TWC.2008.060184.
- [39] Kwan D. W., Schober R., Resource Allocation and Scheduling in Multi-Cell OFDMA System with Decode-and-Forward Relaying, *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE*, Miami-FL, USA, 6-10 Aralık 2010.
- [40] Torabi M., Haccoun D., Ajib W., Performance Analysis of Cooperative Diversity with Relay Selection over Non-Identically Distributed Links, *IET Communications*, DOI: 10.1049/iet-com.2009.0508.
- [41] 3GPP, TR 36.942 (V11.0.0) E-UTRA Radio Frequency (RF) System Scenarios, *3rd Generation Partnership Project*, Sophia-Antipolis, Aralık 2012.
- [42] 3GPP, TR 36.922 (V11.0.0), E-UTRA TDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) Requirements Analysis, *3rd Generation Partnership Project*, Sophia-Antipolis, Aralık 2012.

## **KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER**

**Söylemez E.**, Aldırmaz Ç. S., Heterojen Hücreli Ağlarda Girişim Aktarma İçin AF Tabanlı İşbirlikli Sistemlerde Rôle Seçimi, 25. *Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları*, Antalya, Türkiye, 15-18 Mayıs 2017.



## ÖZGEÇMİŞ

Ethem Söylemez 1984'te Muş'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini doğduğu ilde, liseyi Çankırı Süleyman Demirel Fen Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden 2011'de Telekomünikasyon Mühendisliği programını tamamlayarak mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans öğrenimini 2017'de tamamladı. Yüksek lisans öğreniminde heterojen hücreli ağlar ve işbirlikli haberleşme konusunda rölelerin kullanımı ile ilgili çalışmalar yaptı.

