

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HATA YAYILIMI ALTINDA RÖLE SEÇİMLİ İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME
SİSTEMLERİNİN ANALİZİ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EZGİ ŞANLI

EKİM 2017

BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HATA YAYILIMI ALTINDA RÖLE SEÇİMLİ İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME
SİSTEMLERİNİN ANALİZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ezgi ŞANLI

DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Hakan KAYA

ZONGULDAK

Ekim 2017

KABUL:

Ezgi ŞANLI tarafından hazırlanan “Hata Yayılımı Altında Röle Seçimli İşbirlikli Haberleşme Sistemlerinin Analizi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 20/10/2017

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hakan KAYA

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Yrd. Doç. Dr. Selman KULAÇ

Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. .../.../2017



Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ezgi ŞANLI



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HATA YAYILIMI ALTINDA RÖLE SEÇİMLİ İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN ANALİZİ

Ezgi ŞANLI

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hakan KAYA

Ekim 2017, 63 sayfa

Bu çalışmada, röle seçimli işbirlikli haberleşme sistemlerinin hata yayılımı altında analizleri hem teorik hem de benzetim olarak yapılmıştır. Rölelerde çöz-aktar (decode and forward) protokolü kullanılmıştır. Öncelikle ortamda bir rölenin bulunduğu durumdaki sistem performansını (bit hata olasılığı) veren teorik çözümlenmeler yapılmıştır.

İkinci olarak, ortamda üç adet röle bulunması halinde tüm rölelerin aktif olduğu durumdaki uçtan uca sistem performansını elde edebilmek için öncelikli olarak hata yayılım olasılığı (error propagation) ifadesi teorik olarak elde edilmiştir. Daha sonra üç adet rölenin bulunduğu senaryoda uçtan uca sistem performansının (bit hata olasılığı) teorik ifadesi elde edilerek benzetimler ile doğrulanmıştır.

ÖZET (devam ediyor)

Ardından ortamda M adet rölenin bulunduğu işbirlikli iletişim senaryolarında röle seçim teknikleri ele alınmıştır. İlk olarak eşik değeri tabanlı (threshold based) Seçme İşbirliği tekniği için hata yayılım olasılığı ifadesi ve uçtan uca bit hata olasılığı ifadesi elde edilmiştir. Bu teknikte, kullanılan eşik değerleri sistem performansı üzerinde oldukça etkili olduğundan optimum eşik değerleri nümerik olarak hesaplanmıştır. Bir diğer röle seçim tekniği olan Max-Min röle seçimi tekniği için hata performansını veren teorik sonuçlar hata yayılımı altında yaklaşık olarak elde edilmiştir. Tüm teorik sonuçlar benzetimler ile doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İşbirlikli haberleşme, hata yayılımı, röle seçimi.

Bilim Kodu: 608.04.00

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

ANALYSIS OF COOPERATIVE COMMUNICATION SYSTEMS WITH RELAY SELECTION UNDER ERROR PROPAGATION

Ezgi ŞANLI

Bülent Ecevit University

Institute of Science

Department of Electrical and Electronics Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Hakan KAYA

October 2017, 63 pages

In this study, we propose the analysis of cooperative communication systems with relay selection under error propagation both theoretically and as a simulation. The decode and forward protocol is considered in the relays. Firstly, we present expressions of bit error probability when there is a relay in the environment.

Secondly, the error propagation probabilities are derived theoretically in order to get the end-to-end system performance where all the relays are active when there are three relays in the environment. Then, in the scenario where there are three relays, the theoretical expression of the end-to-end system performance (bit error probability) is obtained and verified with the simulations.

ABSTRACT (continued)

Then, the relay selection techniques are compared in cooperative communication scenarios where M relays are found in the environment. Firstly, the error propagation probability and the end-to-end bit error probability for the threshold based selection cooperative technique are obtained. In this technique, the optimum threshold values are numerically obtained since the threshold values used are very effective on the system performance. The theoretical results giving the error performance for the Max-Min relay selection technique, which is another relay selection technique, are obtained approximately under error propagation. All theoretical results are verified by simulations.

Keywords: Cooperative communication, error propagation, relay selection.

Science Code: 608.04.00

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında desteklerini esirgemeyen baŐta Rektörümüz Prof. Dr. Mahmut ÖZER'e, Fen Bilimleri Enstitü Müdürümüz Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN'a, Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Zehra SARAÇ'a, Tez Danışmanım Yrd. Doç. Dr. Hakan KAYA'ya, Yrd. Doç. Dr. Selman KULAÇ'a, Arş. Gör. Ferdi KARA'ya, bölümümüz öğretim elemanlarına, tez çalışmamda bu alanda yaptıkları akademik çalışmalarıyla bana ışık tutan tüm bilim insanlarına, arkadaşlarıma ve her daim yanımda olan aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 KABLOSUZ HABERLEŞME	5
2.1 KABLOSUZ İLETİŞİM KANALLARININ ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1.1 Toplanır Beyaz Gauss Gürültülü Kanal	5
2.1.2 Sönümlenmeli Kanal.....	6
2.1.2.1 Frekans Seçici ve Düz Sönümlenmeli Kablosuz Kanallar	6
2.1.2.2. Hızlı ve Yavaş Sönümlenmeli Kablosuz Kanallar	7
2.1.2.3. Rayleigh Sönümleme	7
2.2 KABLOSUZ İLETİŞİM KANALLARI İÇİN ÇEŞİTLEME TEKNİKLERİ	9
2.2.1 Frekans Çeşitlemesi	10
2.2.2 Zaman Çeşitlemesi.....	10
2.2.3 Uzay Çeşitlemesi	10
2.2.4 İşbirlikli Çeşitleme.....	10
2.3 KABLOSUZ İLETİŞİM KANALLARI İÇİN BİRLEŞTİRME TEKNİKLERİ	11
2.3.1 Seçmeli Birleştirme (Selection Combining, SC)	11
2.3.2 En Büyük Oran Birleştirmesi (Maximal Ratio Combining, MRC)	11
2.3.3 Eşit Kazanç Birleştirmesi (Equal Gain Combining, EGC).....	12

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 3 İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME	13
3.1 İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEMENİN TEMELİ RÖLELİ YAPILAR	14
3.2 AKTARMA YÖNTEMLERİ	14
3.2.1 Kuvvetlendir-Aktar Yöntemi	14
3.2.2 Çöz-Aktar Yöntemi	15
3.3 TEK RÖLELİ ORTAMDA UÇTAN UCA HATA OLASILIĞI HESABI	15
3.3.1 Tek Röleli Sistemde Hata Olasılığı Hesabı	18
3.4 ÇOK RÖLELİ ORTAMDA UÇTAN UCA HATA OLASILIĞI HESABI	25
3.4.1. Üç Röleli Sistem İçin Hata Olasılığı Hesabı	26
3.4.2. Röle Seçimli Sistem İçin Hata Olasılığı Hesabı	32
3.4.2.1 Seçme İşbirliği Yöntemi İçin Uçtan Uca Hata Olasılığı Hesabı	33
3.4.2.2 Max-Min Yöntemi İle Röle Seçimine Bağlı Hata Olasılığı Hesabı	49
BÖLÜM 4 SONUÇLAR	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Seçmeli birleştirme tekniği	11
Şekil 2.2 En büyük oran birleştirme tekniği.....	12
Şekil 2.3 Eşit kazanç birleştirme tekniği.....	12
Şekil 3.1 Klasik röleli sistem.....	14
Şekil 3.2 Kuvvetlendir-Aktar yöntemi	15
Şekil 3.3 Çöz-Aktar yöntemi.....	15
Şekil 3.4 Tek röleli sistemde işbirlikli iletişim.	16
Şekil 3.5 Düşük γ_{th} ve yüksek γ_{th} durumlarında hata yayılımının etkisi.....	23
Şekil 3.6 Ortamda tek rölenin bulunduğu sistemde γ_{opt} nümerik ve teorik sonucun karşılaştırması.	24
Şekil 3.7 Ortamda tek rölenin bulunduğu sistemde $\gamma_{th}=0, 2, 10$, γ_{opt} değerleri için teorik ve benzetim sonuçları.	25
Şekil 3.8 Çok röleli sistem.	26
Şekil 3.9 Ortamda üç rölenin bulunduğu durumda $\gamma_{th} = 0, 3, 10$, γ_{opt} değerleri için adil ve adil olmayan durumların teorik sonuçları.	30
Şekil 3.10 Ortamda üç rölenin bulunduğu durumda $\gamma_{th} = 0, 3, 10$, γ_{opt} değerleri için adil durum teorik sonuçları.	31
Şekil 3.11 Ortamda üç rölenin bulunduğu durumda $\gamma_{th} = 0, 3, 10$, γ_{opt} değerleri için adil olmayan durum teorik sonuçları.	32
Şekil 3.12 Ortamda üç röle bulunması durumu ile en iyi rölenin seçilmesi durumunda $\gamma_{th} = 0, 3, 10$, γ_{th} değerleri için adil durum sonuçlarının karşılaştırılması.....	38
Şekil 3.13 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma^2_{sd} = \sigma^2_{sr} = \sigma^2_{rd} = 1$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, 4, 9$, γ_{opt} değerleri için sonuçlar.....	39
Şekil 3.14 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma^2_{sd} = [1, 10]$, $\sigma^2_{sr} = 1$, $\sigma^2_{rd} = 1$ durumlarında $\gamma_{th} = 0, 4, 9$, γ_{opt} ve $E_b/N_0 = 0, 10, 20$ değerleri için sonuçlar.	40
Şekil 3.15 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma^2_{sd} = 1, 5, 10$, $\sigma^2_{sr} = 1$, $\sigma^2_{rd} = 1$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0$, γ_{opt} değerleri için sonuçlar.....	41
Şekil 3.16 Ortamda üç, dört, beş, altı rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma^2_{sd} = 1, 10, \infty$, $\sigma^2_{sr} = 1$, $\sigma^2_{rd} = 1$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0$, γ_{opt} değerleri için sonuçlar.....	42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.17 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, \sigma_{sr}^2=[1,10], \sigma_{rd}^2=1$ durumlarında $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ ve $E_b/N_0 = 0, 10, 20$ değerleri için sonuçlar.	43
Şekil 3.18 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, \sigma_{sr}^2=1, 5, 10, \sigma_{rd}^2=1$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, \gamma_{opt}$ değerleri için sonuçlar.	44
Şekil 3.19 Ortamda üç, dört, beş, altı rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, \sigma_{sr}^2=1, 10, \infty, \sigma_{rd}^2=1$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, \gamma_{opt}$ değerleri için sonuçlar.	45
Şekil 3.20 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, \sigma_{sr}^2=1, \sigma_{rd}^2=[1,10]$ durumlarında $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ ve $E_b/N_0 = 0, 10, 20$ değerleri için sonuçlar.	46
Şekil 3.21 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, \sigma_{sr}^2=1, \sigma_{rd}^2=1, \infty$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ değerleri için sonuçlar.	47
Şekil 3.22 Ortamda üç, dört, beş, altı rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, \sigma_{sr}^2=1, \sigma_{rd}^2=1, 10, \infty$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, \gamma_{opt}$ değerleri için sonuçlar.	48
Şekil 3.23 En iyi rölenin seçimine bağlı sistem modeli.	49
Şekil 3.24 Ortamda dört röle bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, 2, 10, \sigma_{sr}^2=1, 3, 10, \sigma_{rd}^2=1, 3, 10$ olması durumunda Max-Min, SC ve ortalamalarının karşılaştırılması.	53
Şekil 3.25 Ortamda iki, üç, dört röle olması durumunda Max-Min röle seçim tekniği teorik sonuçları.	54
Şekil 3.26 Ortamda üç, dört, beş, sekiz rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=\sigma_{sr}^2=\sigma_{rd}^2=1$ olması durumunda Max-Min ve SC yönteminin karşılaştırılması.	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 E_b/N_0 ve σ_{sd}^2 'nin değişimine bağlı olarak P_{prop} ve PSR hata olasılıkları.	43
Çizelge 3.2 E_b/N_0 ve σ_{sr}^2 'nin değişimine bağlı olarak P_{prop} ve PSR hata olasılıkları.	45
Çizelge 3.3 E_b/N_0 ve σ_{rd}^2 'nin değişimine bağlı olarak P_{prop} ve PSR hata olasılıkları.	49





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

$f_X(x)$: Olasılık yoğunluk fonksiyonu
Π	: Pi sayısı
m	: Ortalama
σ_x	: Standart sapma
σ_x^2	: Varyans
T_m	: Çoklu yoldan yayılım zamanı
B_c	: Uyum bant genişliği
B_s	: İşaretin bant genişliği
T_s	: İşaretin periyodu
f_d	: Doppler frekans kayma miktarı
T_0	: Kanalin uyumluluk süresi
$h(t)$: Rasgele süreç
$x_1(t)$: Rasgele sürecin gerçek bileşeni
$x_2(t)$: Rasgele sürecin sanal bileşeni
$a(t)$: Sönümlenme zarfı
X_1, X_2	: Rasgele değişken
E_b	: Sinyal gücü
N_0	: Ortalama gürültü gücü
γ	: İGO
$\bar{\gamma}$: Ortalama İGO
$E(.)$: İstatiksel ortalama operatörü
P_e	: Hata olasılığı
M	: Çeşitleme derecesi
w_i	: Sönümlenme katsayısı
S	: Kaynak
D	: Hedef
R	: Röle

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

γ_{th}	: Eşik değer İGO
γ_{xy}	: x - y arası İGO
γ_{xy}	: Hedefte alınan sinyal
P	: Güç
h_{xy}	: x - y arasındaki sönümlenme katsayısı
x	: Kaynaktan gönderilen modülasyonlu sinyal
n_{xy}	: x - y arasındaki toplanır beyaz Gauss gürültüsü
a_1 - a_2	: MRC katsayıları
h^*	: Kanal katsayısının karmaşık eşleniği
P_{e2e}	: Sistemin uçtan uca hata olasılığı
P_{dec}	: Rölenin gelen sinyali doğru çözme olasılığı
P_{div}	: Rölenin iletimde olduğu durumdaki ortalama hata olasılığı
$P_{non-coop}$: Direkt yoldan yapılan iletim sonucunda meydana gelen hata olasılığı
$P(.)$: Hata olasılığı fonksiyonu
$\bar{P}(.)$: Ortalama hata olasılığı fonksiyonu
$Q(.)$: Q fonksiyonu
$M(.)$: Moment üreten fonksiyon
P_{SR}	: Röledeki hata olasılığı
P_{prop}	: Hata yayılımı
P_{coop}	: İşbirlikli iletişim durumunda meydana gelen hata olasılığı
γ_{opt}	: Optimum eşik değer İGO
C	: Seçim kümesi
$F_X(x)$: Olasılık dağılım fonksiyonu
$\delta(.)$: Dürtü fonksiyonunu
$u(.)$: Birim basamak fonksiyonu

KISALTMALAR

AF	: Amplify and Forward
BHO	: Bit Hata Oranı
BPSK	: Binary Phase Shift Keying

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

DF	: Decode and Forward
EGC	: Equal Gain Combining
GRS	: Generalized Relay Selection
ISI	: Intersymbol Interference
İGO	: İşaret Gürültü Oranı
MGF	: Moment Generating Function
MIMO	: Multi Input Multi Output
MRC	: Maximal Ratio Combining
OYF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
RF	: Radyo Frekansı
SC	: Selection Cooperation
TBGG	: Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yıllarda taşınabilir akıllı cihazların artmasıyla kullanıcıların geniş bant talepleri de büyük bir yükseliş göstermekte ve uygulamaların ihtiyaç duydukları bant genişlikleri, mevcut hücresel sistemlerinin sınırlarını zorlamaktadır. Yüksek veri ve kapasite gereksinimi için büyüyen talep yeni nesil (5G) hücresel sistemleri gerekli kılmaktadır. İşbirliğine dayalı iletişim, ağ düğümlerinin uzamsal çeşitlilik avantajlarını gerçekleştirmek için bilgi aktarmada birbirlerine yardımcı oldukları yeni bir kablosuz iletişim tekniğini temsil eder. Bu yeni iletim modeli bağlantı güvenilirliği, spektral verimlilik, sistem kapasitesi ve iletim menzili açısından önemli performans artışı vaat etmektedir.

Kablosuz haberleşme sistemlerinin gerçekleştirilmesinde karşılaşılan en önemli problemlerden birisi de çok yollu sönmüleme etkisidir. Bu olumsuz etkiyi önlemek için işbirlikli çeşitleme fikri ortaya atılmıştır [1, 2]. Kaynaktan gönderilen bilginin istatistiksel bağımsız kanallar üzerinden hedefe iletilmesi prensibine dayanan işbirlikli çeşitleme yöntemi ile sönmülemenin olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması ve klasik noktadan noktaya iletişim performansına kıyasla performansın artırılması sağlanmaktadır. İşbirlikli çeşitleme yönteminde iletişim, bilginin kaynak ve hedef arasında sağlanan direkt iletme ek olarak kaynaktan iletim ortamında bulunan röle vasıtası ile hedefe ulaştırılması ile sağlanır. İşbirlikli haberleşme sistemlerinde “Kuvvetlendir ve Aktar” (Amplify and Forward, AF) ve “Çöz ve Aktar” (Decode and Forward, DF) rölede kullanılan başlıca aktarma yöntemlerindedir. AF yöntemi, kaynaktan gönderilen sinyalin kuvvetlendirilerek iletiminin sağlanması prensibine dayanırken; DF yöntemi, kaynaktan gönderilen sinyalin rölede çözülüp tekrar kodlanarak hedefe iletilmesi prensibine dayanır [1, 3].

İşbirlikli çeşitleme yöntemi, tek röle ile kullanıcılar arasındaki iletişim kalitesini arttırmak için kullanılacağı gibi, iki kullanıcı (kaynak-hedef kullanıcılar) arasında bulunan diğer kullanıcılar bu iki kullanıcı için röle kabul edilerek çoklu röle kullanan işbirlikli yapılar da tasarlanabilir.

Çoklu röle kullanan işbirlikli yapılarda kaynak-hedef arasında bulunan ve röle olarak kabul edilen cihazlar, kaynak-hedef arasında iletişim için çeşitleme sağlayarak iletişim kalitesini röle sayısı ile orantılı olarak iyileştirirler. Fakat bu yapıda tüm röleler frekans ve zaman boyutunda kaynakları iletim için işgal ederek kaynakların verimli kullanılmasını engellerler. Bu sorunun çözümü için yapılan çalışmalarda, kaynak-röle arasında bulunan tüm rölelerin kullanılması yerine en iyi link kalitesine sahip tek rölenin seçilmesi ve işbirliğinin bu röle üzerinden yapılması fikri ortaya atılmıştır [4].

DF protokolünün kullanıldığı işbirlikli haberleşme sistemlerinde meydana gelen en önemli problem, kaynak-röle arasındaki kanalda meydana gelen bozucu etkiler sonucunda rölede algılama hatalarının oluşması ve hedefe hatalı paketlerin iletilmesidir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için yapılan çalışmalarda, çok rölenin bulunduğu işbirlikli sistemlerde röle seçiminin sistem performansını iyileştirdiği ortaya çıkmıştır [5, 6]. Bu fikir, röle seçimli işbirlikli sistemlerde en iyi link kalitesine sahip röle üzerinden aktarım yapılması prensibine dayanmaktadır.

[4]'te verilen çalışmada, çok röleli sistemlerde öncelikle kodları doğru çözen rölelerin belirlendiği ve sonrasında da iletim için en iyi rölenin seçildiği bir röle seçim kriteri önerilmiştir. [7]'de verilen çalışmada, röle-hedef arasındaki yolun maksimum işaret gürültü oranına (İGO) sahip olan röle seçilmektedir. [8]'de verilen bir başka çalışmada, kaynak-röle ve röle-hedef arasındaki anlık İGO değerlerinin harmonik ortalamalarına dayalı seçim kriterleri önerilmiştir.

Çöz ve aktar yönteminin performansı çeşitli sistem ve kanal modelleri için literatürde incelenmiştir. Önceki çalışmalarda çoğunlukla Rayleigh ve Nakagami-m sönümlü kanal modelleri ele alınmıştır. [9]'da çöz ve aktar yöntemini de içeren işbirlikli haberleşme sistemlerinin performans analizi incelenmiştir. [10]'da Rayleigh sönümlü kanallarda en iyi röle seçimine dayalı çöz ve aktar tekniğinin servis dışı kalma olasılığı ve kanal kapasitesi incelenmiştir. [11, 12]'deki çalışmalarda çöz ve aktar tekniğinin Rayleigh sönümlü kanallarda optimum güç tahsisi ve sembol hata oranı analizi gerçekleştirilmiştir. [13]'te verilmiş olan çalışmada, çöz ve aktar işbirlikli sistemlerin Nakagami-m sönümlü kanallardaki hata olasılığı analiz edilmiştir. [14, 15]'teki çalışmalarda, çöz ve aktar işbirlikli haberleşme sisteminin Nakagami-m sönümlü kanallarda güç tahsisi ve performans analizi gerçekleştirilmiştir.

[16]'da sunulan çalışmada, Nakagami-m sönümlü kanallarda röle seçimine dayalı çöz ve aktar işbirlikli çeşitleme yönteminin sembol hata oranı analizi ele alınmıştır.

Literatürde, sıra istatistiği kullanılarak röle seçimi analizi için yapılan çalışmalarda bit hata oranı ya da servis kesilme (outage probability) için teorik ifadeler türetilmiştir. [10, 17]'de en iyi rölenin kullanılmadığı durumlarda M adet röle arasından N . en iyi rölenin kullanıldığı sistemlerde AF ve DF protokolleri için incelemeler yapılmıştır. [18, 19]'da röle seçiminde kanal kestiriminin doğru yapılamaması durumunda ortaya çıkan hatalar göz önüne alınarak Genelleştirilmiş Röle Seçimi (Generalized Relay Selection, GRS) fikri ortaya atılmıştır.

DF protokolü kullanan rölelerde tam kod çözmesi varsayımı ile kaynaktan gelen sinyalin rölede doğru şekilde çözülerek hedefe iletiildiği düşünülür. Fakat gerçekte rölelerin tamamen doğru çözdüğünün garantisi yoktur. DF rölede tam kod çözme olasılığını arttırmak için çeşitli yöntemler öne sürülmüştür.

Bu yöntemlerden sıklıkla kullanılanlardan biri Seçme İşbirliği (Selection Cooperation, SC) yöntemidir. Bu yöntemde karşılaşılan en büyük zorluk, eşik değerinin doğru biçimde belirlenmesi gerektiğidir. [20]'de yapılan çalışmada, ortamda tek röle bulunması durumunda DF röle için optimum eşik değer analitik olarak bulunmuştur.

[21]'de tek röle için optimum eşik değer ifadesi Nakagami-m sönümlü kanallar için elde edilmiştir. [22]'deki çalışmada Rayleigh sönümlemeli kanallar için ortamda çok röle bulunması durumunda optimum eşik değer ifadesinin ne olması gerektiği araştırılmıştır. DF rölede tam kod çözme olasılığını arttırmak için sıklıkla kullanılan yöntemlerden bir diğeri Max-Min röle seçimi yöntemidir. Literatürde Rayleigh sönümlü kanalda ve tek röleli sistem modeli için bu iki yöntemin performansa etkilerinin karşılaştırılması [23]'te verilmektedir.

Bu çalışmada Bölüm 2'de kablosuz haberleşme sistemlerindeki sönümlemeli kanallar hakkında bilgi verilmekte ve sönümleme etkisini en aza indirmek için kullanılan yöntemler sunulmaktadır. Bölüm 3'de sönümlemenin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için uygulanan işbirlikli haberleşme sistemi tanıtılmakta ve işbirlikli çeşitlemenin temeli olan röleli yapılar için aktarma yöntemleri verilmektedir. Bu çalışmadaki tüm sistem modeli analizlerinde, çöz-aktar işbirlikli çeşitleme yöntemi kullanılmış ve birimler arası kanallar Rayleigh olarak ele alınmıştır.

Bölüm 3.3'te ortamda tek rölenin bulunduğu, iletişimin direkt yoldan ve röle üzerinden sağlandığı sistem modeli incelenmektedir. Bu model için hata yayılımı etkisi altındaki uçtan uca hata olasılığı ifadesi verilmektedir. Sistemde rölenin iletimde olup olmadığı, önceden belirlenmiş eşik değer ile karşılaştırılarak elde edilmektedir. Bu varsayımda en iyi hata performansını veren optimum eşik değer ifadesi tek röle için ifade edilmektedir.

Eşik değerinin sistem performansı üzerindeki etkisi MATLAB programında incelenmekte ve yorumlanmaktadır. Bölüm 3.4'te iletişim kalitesini arttırmak amacıyla öne sürülen çok röleli sistem modeli tanıtılmaktadır. Bölüm 3.4.1'de ortamda üç rölenin bulunduğu ve üç rölenin de iletişim için kullanıldığı sistem modelinde hata olasılığı ifadesi, hata yayılımı etkisi de dikkate alınarak türetilmektedir. Ayrıca bu bölümde kaynak ve röleler arasındaki güç paylaşımına bağlı olarak, adil ve adil olmayan durumların sistem performansına etkisi farklı eşik değerleri için MATLAB programı kullanılarak karşılaştırılmaktadır. Çok röleli sistemlerde kaynakların verimsiz kullanılmasının önüne geçmek amacıyla en iyi rölenin seçilmesi fikri ve kullanılan yöntemler Bölüm 3.4.2'de tanıtılmaktadır. Bu yöntemlerden ilki olan SC yöntemi Bölüm 3.4.2.1'de anlatılmaktadır. Bu bölümde en iyi rölenin seçimi için SC yönteminin kullanıldığı sistem modelinde, hata yayılımı etkisi altındaki hata olasılığı ifadesi verilmektedir. Ayrıca iletişimin üç röle üzerinden sağlandığı ve seçilen en iyi röle üzerinden sağlandığı sistem modellerindeki hata performansı, farklı eşik değerleri için MATLAB programı kullanılarak karşılaştırılmaktadır. Ortamda dört rölenin bulunduğu ve en iyi rölenin SC yöntemi ile belirlendiği sistem modeli için, yol katsayıları değişiminin sistem performansı üzerindeki etkisi çeşitli eşik değerlerinde incelenmektedir. En iyi rölenin seçilmesinde kullanılan bir diğer yöntem olan Max-Min yöntemi Bölüm 3.4.2.2'de anlatılmaktadır. Bu bölümde en iyi rölenin seçimi için Max-Min yönteminin kullanıldığı sistem modelinde, hata yayılımı etkisi altındaki hata olasılığı ifadesi türetilmektedir. Buna bağlı olarak, her iki yöntemin de sistem performansı üzerindeki etkisi MATLAB programı kullanılarak karşılaştırılmaktadır. Ayrıca ortamda iki, üç, dört rölenin olduğu ve en iyi rölenin Max-Min yöntemi ile belirlendiği model için, röle sayısının sistem performansına etkisi incelenmektedir. Son olarak SC ve Max-Min yöntemlerinin, artan röle sayısına göre hata olasılığını ne ölçüde değiştirdiği MATLAB programı kullanılarak analiz edilmektedir.

BÖLÜM 2

KABLOSUZ HABERLEŞME

Kablosuz haberleşme en genel anlamda; noktadan noktaya veya bir ağ yapısı şeklinde bağlantı sağlayan, iletim ortamı olarak serbest uzayı kullanan iletişim endüstrisinin en hızlı büyüyen teknolojilerinden biridir. İletişim elektromanyetik dalgalar şeklinde iletim ortamı üzerinden gerçekleştirilir.

Kablosuz haberleşmede karşılaşılan ana problemlerden biri, işaretin alıcıya ulaşması sürecinde havada karşılaştığı çevresel sorunlardır. Vericiden gönderilen işaret alıcıya ulaşana kadar çeşitli olumsuz etkilerle karşılaşmaktadır. Bu kanal etkileri kablosuz haberleşme teknolojisinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle kanal modelinin tasarımı önem arz eder [24].

2.1 KABLOSUZ İLETİŞİM KANALLARININ ÖZELLİKLERİ

Telsiz iletişim sistemlerinin başarımında, iletişim kanalının özelliklerinin etkisi büyüktür. Bu bölümde kablosuz kanal modelleri hakkında bilgiler verilecektir.

2.1.1 Toplanır Beyaz Gauss Gürültülü Kanal

Haberleşme sistemlerinde en çok kullanılan kanal modellerinden biri toplanır beyaz Gauss gürültülü (TBGG) kanaldır. Bu modelde, iletilen işaret, haberleşme sisteminin elektronik bileşenleri tarafından üretilen ısı gürültünün oluşturduğu toplanır rastgele gürültü süreci tarafından bozulmaktadır [25]. (2.1) eşitliğinde; m ortalamalı, σ_x standart sapmalı Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonunu (OYF) belirtmektedir.

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (2.1)$$

2.1.2 Sönümlenmeli Kanal

Kablosuz kanallarda; kaynaktan elektromanyetik dalgalar halinde gönderilen sinyal direkt görüş yolunda meydana gelen kırılma, kırınım, saçılma, gölgeleme gibi etkenler sebebiyle hedefe doğrudan ulaşamaz. Bunun sonucunda gönderilen sinyalin birçok kopyası hedefe farklı gecikme, zayıflama ve fazda ulaşır. Hedefe ulaşan bu kopyalar bazen işaretin güç seviyesini düşürecek şekilde toplanırken bazen de daha büyük bir işaret değeri üretecek şekilde toplanır. Bunun sonucunda alınan işaretle meydana gelen genlik değişimlerine sönümleme (fading) denir. İletilen işaretin ve iletildiği kanalın karakteristiğine bağlı olarak, iletilen işaret bazı anlarda derin sönümlenmeye uğrar ve toplanır beyaz Gauss gürültüsünün (TBGG) etkisiyle birlikte, hedefte hatalı karar verilmesine neden olur. Dolayısıyla bu durum haberleşme sisteminin performansını olumsuz yönde etkiler [26].

Sönümlenmeli kablosuz kanallar; frekansta meydana gelen saçılmaya göre yavaş veya hızlı sönümlenmeli kanallar, zamanda meydana gelen saçılmaya göre ise frekans seçici veya düz sönümlenmeli kanallar olarak sınıflandırılır.

2.1.2.1 Frekans Seçici ve Düz Sönümlenmeli Kablosuz Kanallar

Kaynaktan gönderilen sinyalinin kırılma, kırınım, saçılma ve gölgeleme gibi etkenlerden dolayı farklı zaman gecikmeleri ile birçok kopyasının hedefe ulaştığı durumda, gönderilen sinyalin hedefe ilk ve son olarak ulaşan bileşenleri arasındaki zaman farkı maksimum artık gecikme olarak isimlendirilir T_m ile ifade edilir. Yansıyan sinyallerin T_m sürede hedefe ulaşmasıyla oluşan profil kanalın dürtü cevabını vermektedir. Kanalın bant genişliği hesabı için dürtü cevabı frekans bölgesinde incelendiğinde, bant genişliğinin yaklaşık $1/T_m$ olduğu görülür. Bu frekans bandı uyumluluk bant genişliği (coherence bandwidth) olarak isimlendirilir B_c ile ifade edilir [26].

B_s iletilen işaretin bant genişliği olmak üzere, $B_s < B_c$ olması durumunda (iletilen işaretin periyodunun $T_s > T_m$ olması durumunda) iletilen işaretin tüm frekans bileşenleri kanalda aynı etkiye maruz kalır ve böylece kanalda frekans seçici olmayan (frequency nonselective) sönümleme ya da düz sönümleme (flat fading) oluşur [27].

$B_s > B_c$ olması durumunda (iletilen işaretin periyodunun $T_s < T_m$ olması durumunda) iletilen işaretin frekans bileşenlerine kanal farklı tepki verir ve bu durumda oluşan sönümlenmeye de frekans seçici (frequency selective) sönümlenme denir [27].

Frekans seçici kanallarda hedefte sönümlenme etkisine ek olarak performansı kötüleştiren semboller arası karışım (intersymbol interference, ISI) oluşur [27].

2.1.2.2 Hızlı ve Yavaş Sönümlenmeli Kablosuz Kanallar

Kablosuz gezgin haberleşme cihazlarının hareket etmesi sonucunda, iletilen sinyalin hareket yönüne gezgin haberleşme cihazının da hareket yönünün eklenmesiyle frekansta bir kayma meydana gelir. Bu olay Doppler frekans kayması olarak isimlendirilir ve sinyalin frekansındaki değişim miktarı f_d olarak gösterilir. Doppler frekansının tersi yaklaşık olarak kanalın uyumluluk süresini (coherence time) ifade eder ($T_0 \approx 1/f_d$).

$T_s < T_0$ olması durumunda kanal gelen sinyallere yaklaşık aynı tepkiyi verir yani kanalın tepkisi zamanla değişmez. Bu kanal modeline yavaş sönümlenmeli (slow fading) kanal denir [10].

$T_s > T_0$ olması durumunda ise kanalın gelen sinyallere verdiği tepki zamanın bir fonksiyonu olarak değişir. Bu kanal modeline zamanla değişen yani hızlı sönümlenmeli (fast fading) kanal denir [27].

2.1.2.3 Rayleigh Sönümlenme

Düz sönümlenmeli bir kablosuz haberleşme kanalının analizinde sönümlenme eşitlik (2.2)'deki gibi karmaşık rasgele süreçtir.

$$h(t) = x_1(t) + jx_2(t) \quad (2.2)$$

Burada $x_1(t)$ ve $x_2(t)$, sırasıyla rasgele sürecin gerçek ve sanal bileşenleridir. Eşitlik (2.2)'de karmaşık formda verilen sönümlenme ifadesi eşitlik (2.3)'teki gibi kutupsal formda da gösterilebilir.

$$h(t) = \alpha(t)e^{j\theta(t)} \quad (2.3)$$

Burada $\alpha(t)$, sönümlemenin zarfıdır ($|h(t)|$) ve eşitlik (2.4)'teki gibi tanımlanır.

$$\alpha(t) = \sqrt{x_1^2(t) + jx_2^2(t)} \quad (2.4)$$

Hedefe ulaşan sinyallerin sayısının, kablosuz iletim sırasında meydana gelen kırılma, kırınım, saçılma, gölgeleme gibi nedenlerden dolayı yeterince büyük olduğu düşünülürse merkezi limit teoremine göre eşitlik (2.2)'de verilen $x_1(t)$ ve $x_2(t)$ bileşenleri Gauss rasgele süreci olarak modellenmektedirler.

Eşitlik (2.2) ve eşitlik (2.3)'te rasgele süreç olarak tanımlanan kompleks sönümleme ve eşitlik (2.4)'te verilen sönümlemenin zarfı, kanalın yavaş sönümlemeli olması durumunda zamandan bağımsız olur. Bir diğer deyişle bu ifadeler rasgele değişken olurlar ($\alpha = \sqrt{X_1^2 + jX_2^2}$).

Kablosuz haberleşmede, kaynak ve hedef antenler arasında hiçbir direkt görüş yolunun olmadığı, sadece çevreden yansıyan çok yollu bileşenlerin hedefe ulaştığı kanalda, X_1 ve X_2 bileşenleri sıfır ortalamalı Gauss rasgele değişkenleridir. Bu durumda eşitlik (2.4)'te tanımlanan sönümlemenin zarfı (2.5)'te verilen Rayleigh dağılıma sahiptir [27]

$$f(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma^2} e^{-\alpha^2/2\sigma^2}, \quad \alpha \geq 0 \quad (2.5)$$

TBGG'li bir kanalın hedefte düz sönümlemeli algılanması durumunda hedefte alınan anlık İGO eşitlik (2.6)'daki gibidir.

$$\gamma = \alpha^2 \frac{E_b}{N_0} \quad (2.6)$$

Burada E_b bit başına harcanan enerjiyi, $N_0/2$ toplanır beyaz Gauss gürültüsünün çift yönlü güç spektral yoğunluğunu ifade etmektedir. Sönümleme zarfı α 'nın Rayleigh dağılıma sahip olması durumunda, γ 'nın olasılık yoğunluk fonksiyonu üstel (exponansiyel) dağılıma sahiptir ve eşitlik (2.7)'deki gibi verilir [26].

$$f_{\gamma}(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), & \gamma \geq 0 \\ 0 & , \gamma < 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Burada $\bar{\gamma}$ ifadesi anlık işaret gürültü oranının (γ) istatistiksel ortalaması olup $\bar{\gamma} = E[\alpha^2] \frac{E_b}{N_0}$ ya da $\bar{\gamma} = E[|h|^2] \frac{E_b}{N_0}$ olarak verilmektedir. $E[.]$ istatistiksel ortalama operatörüdür.

2.2 KABLOSUZ İLETİŞİM KANALLARI İÇİN ÇEŞİTLEME TEKNİKLERİ

Çok yollu kanallar üzerinden hedefe ulaşan işaretler sönmülemelere maruz kaldığı için hedefte hata miktarı büyük ölçüde artar. Bu olumsuz etkiyi en aza indirebilmek için çeşitleme yöntemleri kullanılmaktadır. Çeşitleme; aynı bilgiyi taşıyan işaretin birden çok kopyasının birbirinden bağımsız sönmülemeli kanallar üzerinden gönderilmesi yöntemidir.

Bu sayede işaretlerin hepsinin aynı anda sönmülemeye uğrama olasılıkları azalır. Çeşitleme uygulanan bir sistem için yüksek İGO değerlerinde hata olasılığı yaklaşık olarak eşitlik (2.8)'deki gibidir [28].

$$P_e \approx \frac{1}{\bar{\gamma}^M} \quad (2.8)$$

Eşitlik (2.8)'de M çeşitleme derecesi ya da çeşitleme kazancı olarak isimlendirilir ve aynı bilgiyi taşıyan işaretin birden çok kopyasının birbirinden bağımsız olarak gönderildiği yol sayısını göstermektedir. Çeşitleme derecesinin M olduğu bir sistemde çeşitleme kazancı da M elde ediliyorsa bu kazanca tam çeşitleme kazancı denir. Aynı zamanda çeşitleme derecesi, İGO'nun bir fonksiyonu olarak çizdirilen hata olasılığı eğrisinin (log-log skalasında) eğimi olarak adlandırılır ve eşitlik (2.9)'daki gibi ifade edilir [29].

$$M = \lim_{\text{İGO} \rightarrow \infty} -\frac{\log(P_e)}{\log(\text{İGO})} \quad (2.9)$$

2.2.1 Frekans Çeşitlemesi

Frekans çeşitlemesi; iletilen sinyalin farklı frekanslarda birden fazla kopyasının gönderilmesi prensibine dayanır. Belirlenmiş olan taşıyıcı frekanslar, kanalın bant genişliğine eşit ya da büyük olması gerekmektedir.

2.2.2 Zaman Çeşitlemesi

Zaman çeşitlemesi; iletilen sinyalin farklı zaman dilimlerinde oluşturulmuş kopyalarının gönderilmesi prensibine dayanır. Belirlenmiş zaman dilimleri arasındaki fark, kanalın zamanına eşit ya da büyük olması gerekmektedir.

2.2.3 Uzay Çeşitlemesi

Uzay çeşitlemesinde, verinin bağımsız kopyaları birden fazla anten ile yollar. Bu nedenle bu çeşitlemeye anten çeşitlemesi de denilmektedir. Bu yöntem ile gönderilen veriler birbirinden bağımsız yollar ile gönderilmekte ve her yolun sönmeme karakteristiği farklı olarak alıcıya ulaşmaktadır. Vericide birden fazla anten kullanılması verici çeşitlemesi, alıcıda birden fazla anten kullanılması alıcı çeşitlemesi olarak isimlendirilir. Hem alıcıda hem de vericide birden fazla anten kullanılarak çeşitlemenin yapıldığı sistemler çoklu giriş çoklu çıkış sistemler (Multi Input Multi Output, MIMO) olarak bilinirler [30].

2.2.4 İşbirlikli Çeşitleme

Telsiz iletişim araçları donanımsal olarak karmaşık ve küçük boyutlarda olduğundan çoklu anten için sınırlıdır. Bu durum istenen iletişim performansını engellemektedir. Daha iyi bir performans için işbirlikli çeşitleme yöntemi öne sürülmüştür. İşbirlikli çeşitleme; birden fazla kullanıcının olduğu ortamlarda, gezginlerin antenlerini paylaşmalarını sağlayarak sanal çok antenli verici oluşturulmaktadır. Bölüm 3’de işbirlikli çeşitleme konusu daha detaylı anlatılmaktadır.

2.3 KABLOSUZ İLETİŞİM KANALLARI İÇİN BİRLEŞTİRME TEKNİKLERİ

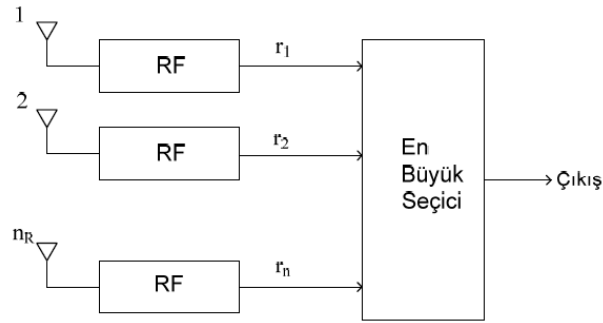
Alıcıya farklı bağımsız yollarından ulaşan işaretten, gönderilen işaretin kestirilebilmesi için birleştirme teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerden en çok kullanılanları; seçmeli birleştirme, en büyük oran birleştirmesi ve eşit kazanç birleştirmesidir [31].

2.3.1 Seçmeli Birleştirme (Selection Combining, SC)

Bu yöntemde, bağımsız yollardan alıcıya gelen her işaretin İGO değeri karşılaştırılarak İGO değeri en yüksek olan işaret seçilmektedir.

Diğer bir deyişle SC tekniğinde en büyük seçici devre çıkışındaki işaretin İGO'su $\gamma_{SC} = \max(\gamma_i)_{i=1}^n$ olur. $E[\gamma_i] = \bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) varsayımı altında $\bar{\gamma}_{SC} = \bar{\gamma} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}$ olarak elde edilir. Burada γ_i , her bir yoldan alınan işaretin İGO'sudur.

Demodülasyon ve sezme işlemi için daha basit bir yol olarak, önceden belirlenmiş bir eşik değerinden İGO'su büyük olan işaretin seçilmesi düşünülebilir. İşaret gücünün eşik değerinden küçük olduğu durumda ise işaret gücünün en fazla olduğu kanala anahtarlama yapılır [31]. Şekil 2.7'de seçmeli birleştirme tekniği gösterilmiştir.

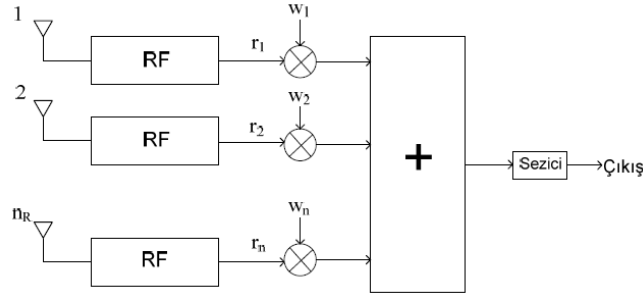


Şekil 2.1 Seçmeli birleştirme tekniği [32].

2.3.2 En Büyük Oran Birleştirmesi (Maximal Ratio Combining, MRC)

Bu yöntemde alıcıda algılanan işaret için, iletiildiği yolun durum tahmini ve faz uyumlaştırma işlemi yapıldıktan sonra, her işaret kendi iletiildiği yola ait sönümlenme katsayısı ile orantılı olarak birleştirilir.

Şekil 2.2’ de w_i ($i = 1, 2, \dots, n$) her bir yola ait sönümlenme katsayısı olmak üzere birleştirici çıkışındaki İGO, $\gamma_{MRC} = \sum_{i=1}^n \gamma_i$ olur. Bu durum incelendiğinde, alıcıya farklı yollardan ulaşan işaretlerin İGO’sunun toplanabildiği görülmektedir. Bu toplam sonucunda elde edilen İGO, elde edilebilecek maksimum İGO olduğu için MRC yöntemi optimum birleştirme sağlar.



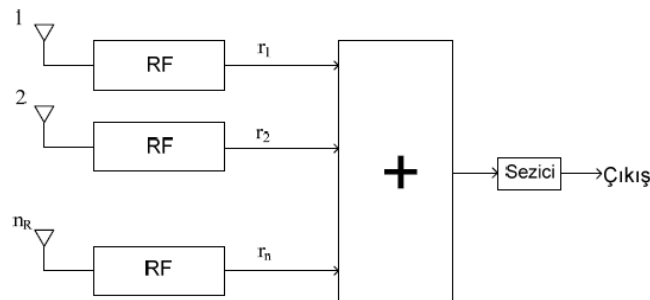
Şekil 2.2 En büyük oran birleştirme tekniği [32].

2.3.3 Eşit Kazanç Birleştirilmesi (Equal Gain Combining, EGC)

Bu yöntem, MRC tekniğinde gerekli olan sönümlenme katsayılarının tahmini ve buna bağlı olarak ağırlıklandırılmalı birleştirme işlemi olmadığı için daha kolay bir yöntemdir. Şekil 2.3’te gösterilen EGC yönteminde, her bir yola ait sönümlenme katsayısı $w_i = 1$ ($i = 1, 2, \dots, n$) olarak seçilir ve buna göre birleştirme işlemi yapılır. Bu durum daha basit alıcı yapıları sunmasına rağmen optimum çözüm sağlayan MRC yöntemi ile karşılaştırıldığında daha düşük çeşitleme sağlar. EGC yöntemi ile birleştirme işlemi yapıldığı takdirde birleştirici

çıkışındaki İGO, $\gamma_{EGC} = \frac{(\sum_{i=1}^n \sqrt{\gamma_i})^2}{n}$ olur. $E[\gamma_i] = \bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) varsayımı altında

$\bar{\gamma}_{EGC} = \bar{\gamma} \left(1 + \frac{(n-1)\pi}{4}\right)$ olarak elde edilir.



Şekil 2.3 Eşit kazanç birleştirme tekniği [32].

BÖLÜM 3

İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME

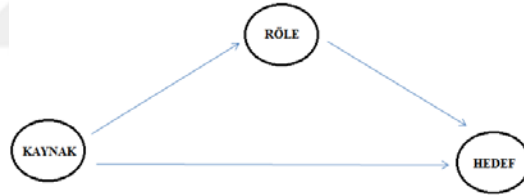
Kablosuz iletişim teknolojilerinin kullanım alanlarının artışıyla beraber yüksek veri hızları, güvenilirlik, hizmet kalitesi, gezginlik, taşınabilirlik ve diğer kullanıcılar ile girişimsizlik gibi talepler ortaya çıkmaktadır. Bant genişliğinin ve pil ömrünün sınırlı olması, kablosuz haberleşme cihaz boyutlarının gezgin iletişim için uygun olmaması, iletimde meydana gelen sönümlenme etkisi bu taleplerin karşılanmasındaki en büyük zorluklardandır. Bu problemlerin çözümü için farklı yaklaşımlar söz konusudur [32].

Sönümlenme hizmet kalitesini olumsuz etkileyen bir faktördür. Bu problemi en aza indirmek ve hata performansını iyileştirmek için çeşitleme tekniklerinden yararlanılmaktadır. Vericiden gönderilen mesaj işaretinin alıcıya en doğru şekilde ulaşmasını sağlayan tekniklerden biri olan çeşitleme en genel anlamda bilgi işaretinin birbirinden bağımsız birden fazla yol ile iletilmesiyle, alıcıya en güvenilir şekilde ulaştırılması tekniğidir. Çeşitleme zaman, frekans boyutunda yapılacağı gibi birden fazla alıcı ve/veya verici anten (MIMO) kullanılarak uzay boyutunda da sağlanabilir [27]. MIMO sistemlerin avantajı iletim çeşitlemesi tekniklerine olanak vermeleridir. Çoklu anten kullanılarak elde edilen uzay çeşitlemesinin beklenen performansı gerçekleştirilmesi için, antenlerin iletilen işarete sağlayacakları yolların birbirinden bağımsız olması gerekmektedir. Bunu elde etmek için verici veya alıcıya konuşlandırılan antenlerin kendi aralarındaki mesafenin en az iletilen işaret dalga boyunun yarısı mertebesinde olması gerekmektedir [28]. Bazı istasyonları için herhangi bir sorun teşkil etmeyen bu durum mobil cihazlar için önemli bir kısıttır. Mobil cihazlar kullanılarak yapılan gezgin iletişimde boyut, pil ömrü, maliyet gibi parametreler de göz önünde bulundurularak sanal MIMO olarak da isimlendirilen, mobil cihazların birbiriyle işbirliği yaparak elde edilen “ İşbirlikli İletişim “ çeşitleme yöntemi olarak ortaya atılmıştır. Klasik noktadan noktaya haberleşmeden farklı olarak, işbirlikli iletişimde röle olarak adlandırılan cihaz sadece kendi verilerini değil işbirliği içerisinde olduğu cihazın verilerini de alıp yollamakla sorumludur.

Bu teknik ile kullanıcı hem röle hem de bilgi kaynağı olarak görev yapabilmektedir [2]. Bu bölümde işbirlikli çeşitlemenin temeli olan röleli yapılardan ve rölelerde kullanılan aktarma yöntemlerinden bahsedilmektedir. İlk olarak tek röleli ortamda, hata yayılımı altındaki uçtan uca hata olasılığı hesabı verilmektedir. Daha sonra çok röleli sistem modeli anlatılmakta ve üç röleli sistem modeli için hata yayılımı altındaki uçtan uca hata olasılığı hesabı gösterilmektedir. Çok röleli sistemlerin dezavantajı olan kaynakların verimsiz kullanımının önüne geçebilmek için en iyi rölenin seçilmesi ve iletişimin bu röle üzerinden sağlanması fikri açıklanmaktadır. Son olarak, en iyi rölenin seçilmesi için kullanılan SC ve Max-Min yöntemlerinde hata yayılımı altındaki uçtan uca hata olasılığı hesabı verilmektedir.

3.1 İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEMENİN TEMELİ RÖLELİ YAPILAR

Röleli sistemler; işareti gönderen kaynak, işaretin gönderilmesinin amaçlandığı hedef ve işaretin gönderilmesine yardımcı olan röleden oluşmaktadır [2]. Röle aldığı işareti çeşitli aktarma yöntemleri kullanarak işler ve hedefe gönderir. Bunun sonucunda gönderilen işaretin hedefte, kaynaktan ve röleden gelen kopyaları bulunur. Şekil 3.1’de klasik röleli sistem gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Klasik röleli sistem.

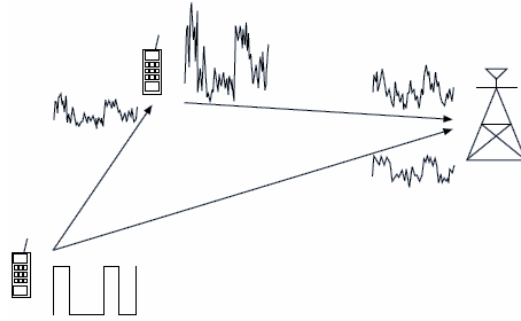
3.2 AKTARMA YÖNTEMLERİ

İşbirlikli haberleşmenin gerçekleştirilmesi için rölede yapılan işleme göre farklı aktarma yöntemleri mevcuttur. Kuvvetlendir-Aktar protokolü (Amplify and Forward, AF) ve Çöz ve Aktar protokolü (Decode and Forward, DF) çoğunlukla kullanılan iki aktarma yöntemidir.

3.2.1 Kuvvetlendir-Aktar Yöntemi

İşbirlikçi iletişim yönteminde röle, kaynaktan aldığı bilgiyi, kanal hakkında sahip olduğu bilgiye göre kuvvetlendirerek (kanalın etkisini dengelemek için) hedefe göndermektedir [1].

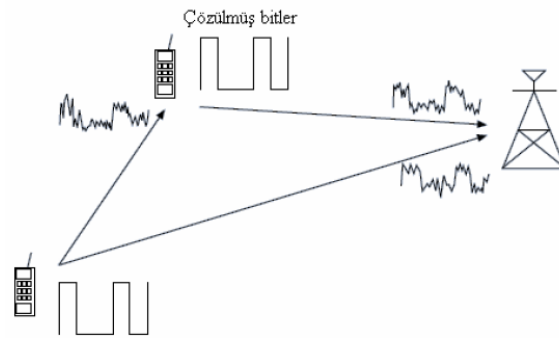
Bu sistemdeki dezavantaj kaynak-röle arasındaki gürültünün de hedefe iletilmesidir. Şekil 3.2’de kuvvetlendirir-aktar yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Kuvvetlendirir-Aktar yöntemi [32].

3.2.2 Çöz-Aktar Yöntemi

Bu yöntemde, kaynaktan röleye gelen işaret rölede çözüldükten sonra tekrar modüle edilerek hedefe gönderilmektedir [2]. Bu sistemde kaynak-röle arasındaki gürültü hedefe iletilmemektedir. Ancak sistemin dezavantajı, rölenin işareti yanlış çözme olasılığıdır. Şekil 3.3’te çöz-aktar yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Çöz-Aktar yöntemi [32].

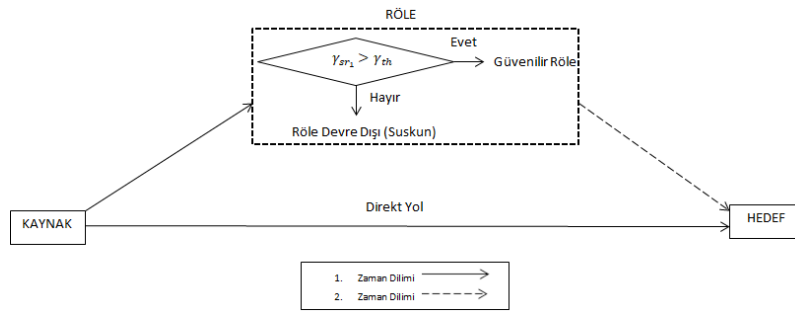
3.3 TEK RÖLELİ ORTAMDA UÇTAN UCA HATA OLASILIĞI HESABI

Bu bölümde; ortamda kaynak (S), hedef (D) ve tek bir rölenin (R) bulunduğu durum incelenmektedir. Her birim, tek antenli yarı çift yönlü (half-duplex) yapıya sahiptir ve herhangi iki birim arasındaki kanal sönmleme katsayısının zarfı Rayleigh rasgele değişkeni olarak modellenmiştir. Sistemdeki röle DF protokolünü kullanmaktadır.

Şekil 3.4'te iki atlamalı işbirlikli haberleşme sistemi verilmektedir. İşbirlikli haberleşme iki zaman diliminde gerçekleşmektedir. Birinci zaman diliminde, kaynaktan hedefe doğrudan bilgi gönderilirken eş zamanlı olarak aynı bilgi röleye de gönderilmektedir. İkinci zaman diliminde ise röle birinci zaman diliminde aldığı bilgiyi çözüp tekrar modüle ederek hedefe yollamaktadır.

Birinci zaman diliminde, kaynaktan röleye gelen sembolün İGO değeri belirli bir eşik değerinden (γ_{th}) küçük ise rölenin sembolü doğru çözemediğine karar verilmektedir. Bu durumda röle suskun kalarak veriyi hedefe göndermez ve iletim sadece direkt yoldan yapılmaktadır (İşbiriksiz iletişim).

İkinci zaman diliminde ise kaynaktan röleye gelen sinyalin İGO değerinin eşik değerinden büyük olduğu rölenin ise gelen sembolü doğru çözdüğü varsayılır ve röle gelen sinyali hedefe gönderir (İşbirlikli iletişim). Eşik değerinin doğru belirlenmiş olması önemli bir kısıttır. Rölede kullanılan eşik değerinin iyi seçilememesi durumunda, kaynaktan röleye gelen sembolün İGO değeri, belirlenen eşik değerinin üzerinde olsa dahi gelen sembol yanlış çözümlenip hedefe hatalı veri aktarılmış olabilir ve bu durumda röle tarafından gönderilen hatalı veri hedefte de hataya neden olmaktadır. Hedefteki bu hata "Hata Yayılımı" olarak adlandırılmaktadır [20].



Şekil 3.4 Tek röleli sistemde işbirlikli iletişim.

İlk zaman diliminde alıcı ve röle tarafından alınan işaretler sırasıyla (3.1) ve (3.2)'de verilmektedir [29].

$$y_{sd} = \sqrt{P_s} h_{sd} x + n_{sd} \quad (3.1)$$

$$y_{sr} = \sqrt{P_s} h_{sr} x + n_{sr} \quad (3.2)$$

Burada; x vericiden gönderilen modülasyonlu sembolü, P_s verici gücünü, n_{sd} ve n_{sr} sırasıyla kaynak-hedef ve röle-hedef arasındaki çift yönlü güç spektral yoğunluğu $N_0/2$ olan toplanır beyaz Gauss gürültüsünü, h_{sd} ve h_{sr} sırasıyla kaynak-hedef ve kaynak-röle arasındaki σ_{sd}^2 ve σ_{sr}^2 varyanslı sönümlenme katsayılarını ifade etmektedir.

İkinci zaman diliminde ise röleden hedefe gönderilen işaret (3.3)'te verilmektedir [29].

$$y_{rd} = \sqrt{P_{DF}} h_{rd} x_r + n_{rd} \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.3)'te, rölenin doğru çözme yaptığı varsayılır ise $P_{DF} = P_r$, doğru çözemediği varsayılır ise $P_{DF} = 0$ olarak alınır. x_r , DF protokolü kullanan rölenin kaynaktan gelen sinyali çözüp tekrar modülasyon işlemine tabi tutması sonucunda oluşan sembolü, h_{rd} röle-hedef arasındaki σ_{rd}^2 varyanslı sönümlenme katsayısını, n_{rd} çift yönlü güç spektral yoğunluğu $N_0/2$ olan toplanır beyaz Gauss gürültüsünü ifade etmektedir.

İki zaman dilimi sonrasında direkt yoldan ve röleden olmak üzere hedefe iki sinyal ulaşmaktadır. Kanalin hedefte bilindiği varsayımı altında MRC yöntemi kullanılarak çıkış İGO değeri maksimize edilir ve hedefte alınan işaret (3.4)'teki gibi olur.

$$y = a_1 y_{sd} + a_2 y_{rd} \quad (3.4)$$

Burada a_1 ve a_2 MRC katsayılarıdır ve (3.5)'te verilmektedir.

$$a_1 = \frac{\sqrt{P_s} h_{sd}^*}{N_0} \text{ ve } a_2 = \frac{\sqrt{P_{DF}} h_{rd}^*}{N_0} \quad (3.5)$$

Burada h^* , kanal katsayısının karmaşık eşleniğidir.

3.3.1 Tek Röleli Sistemde Hata Olasılığı Hesabı

Ortamda tek rölenin bulunduğu sistem yapısı için uçtan uca hata olasılığı eşitlik (3.6)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{e2e} = P_{dec} P_{div} + (1 - P_{dec}) P_{non-coop} \quad (3.6)$$

Burada P_{dec} , röleye gelen sembolün İGO değerinin eşik değeri γ_{th} 'den büyük olma olasılığını, P_{div} rölenin iletimde olduğu durumdaki ortalama hata olasılığını, $P_{non-coop}$ rölenin doğru çözemediğine karar vermesi durumunda direkt yoldan yapılan iletim sonucunda meydana gelen hata olasılığını göstermektedir. P_{dec} ifadesi eşitlik (3.7)'deki gibi tanımlanmaktadır [33].

$$P_{dec} = Pr(\bar{\gamma}_{sr} > \gamma_{th}) = e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{sr}}} \quad (3.7)$$

Burada $\bar{\gamma}_{sr}$, kaynak - röle arasındaki ortalama İGO'dur ve $\bar{\gamma}_{sr} = E(|h_{sr}|^2) \cdot \gamma_{sr}$ olarak verilmektedir. γ_{sr} ise kaynak - röle arasındaki anlık İGO'dur ve $\gamma_{sr} = P_s/N_0$ olarak verilmektedir.

TBGG kanalda ikili faz kaydırmalı anahtarlama (Binary Phase Shift Keying, BPSK) için sembol hata olasılığı ifadesi eşitlik (3.8)'deki gibi verilmektedir [28].

$$P_s(\gamma_s) = Q(\sqrt{2\gamma_s}) \quad (3.8)$$

Sönümlenmeli bir kanalda hata olasılığı, TBGG kanalda oluşan hata olasılığının ortalamasının alınmasıyla bulunur. Eşitlik (3.9)'da ortalama hata olasılığı hesabı gösterilmektedir [28].

$$\bar{P}_s = \int_0^{\infty} P_s(\gamma_s) f_{\gamma_s}(\gamma_s) d\gamma_s \quad (3.9)$$

Buradaki $f_{\gamma_s}(\gamma_s)$ ifadesi, eşitlik (2.7)'de verilen Rayleigh dağılımına sahip olasılık yoğunluk fonksiyonudur.

Eşitlik (3.8) için alternatif Q fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak P_s değeri elde edilebilir. (3.10)'da alternatif Q fonksiyonu yaklaşımı verilmektedir [28].

$$Q(z) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left[\frac{-z^2}{2\sin^2(\theta)}\right] d\theta \quad z > 0 \quad (3.10)$$

(3.9) ve (3.10) birlikte kullanılarak BPSK için P_s değeri eşitlik (3.11)'deki gibi ifade edilir [28].

$$P_s = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(\frac{-\gamma_s}{\sin^2(\theta)}\right) d\theta \quad (3.11)$$

(3.11) ve (2.7), (3.9)'da yerine konulduğunda sönmülemeli kanalda ortalama hata olasılığı ifadesi (3.12)'deki gibi elde edilmektedir [28].

$$\begin{aligned} \bar{P}_s &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} \exp\left[\frac{-\gamma_s}{\sin^2(\theta)}\right] d\theta f_{\gamma_s}(\gamma_s) d\gamma_s \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left[\int_0^{\infty} \exp\left[\frac{-\gamma_s}{\sin^2(\theta)}\right] f_{\gamma_s}(\gamma_s) d\gamma_s \right] d\theta \end{aligned} \quad (3.12)$$

Burada $\int_0^{\infty} f_{\gamma_s}(\gamma_s) \exp\left[\frac{-\gamma_s}{\sin^2(\theta)}\right] d\gamma_s$ ifadesi, $M_\gamma = \int_0^{\infty} f_\gamma(\gamma) e^{-\gamma s} d\gamma$ eşitliği ile tanımlanan moment üreten fonksiyona (Moment Generating Function, MGF) karşılık gelmektedir. BPSK için ortalama hata olasılığı ifadesi MGF cinsinden (3.13)'te verilmektedir.

$$\bar{P}_s = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} M_{\gamma_s} \left(\frac{-1}{\sin^2(\theta)} \right) d\theta \quad (3.13)$$

Rayleigh sönmülemesi için moment üreten fonksiyon (3.14)'te verilmektedir [28].

$$M_\gamma(s) = (1 - s\bar{\gamma})^{-1} \quad (3.14)$$

(3.6)'da verilen DF protokolünün uçtan uca hata olasılığındaki $P_{non-coop}$ hatası, doğrudan direkt yoldan kaynaklandığı için $M_{\gamma_{sd}}$ ifadesine bağlı olarak değişmektedir ve eşitlik (3.15)'te gösterilmektedir.

$$P_{non-coop} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} M_{\gamma_{sd}} \left(\frac{1}{\sin^2(\theta)} \right) d\theta \quad (3.15)$$

Burada $M_{\gamma_{sd}}$ Rayleigh sönümlmeli kanal olduğundan eşitlik (3.16)'daki gibi verilmektedir.

$$M_{\gamma_{sd}} = \left(1 + \frac{\bar{\gamma}_{sd}}{\sin^2(\theta)}\right)^{-1} \quad (3.16)$$

Rölenin iletimde olduğu durumda meydana gelen hata olasılığı P_{div} , röleden gelen sinyale ve direkt yola bağlı olarak değişmektedir [21].

$$P_{div} = P_{SR} \chi P_{prop} + (1 - P_{SR}) \chi P_{coop} \quad (3.17)$$

(3.17) eşitliğinde; P_{SR} , eşik değerinin kötü seçimine bağlı meydana gelen hata yayılımının oluşma olasılığı; bir başka ifade ile rölenin kaynaktan gelen sembolü yanlış çözmesinin fakat belirlenen eşik İGO değerine göre doğru çözdüğüne karar verilme olasılığıdır. Bu durumda hedefte meydana gelen hata olasılığı P_{prop} olarak adlandırılmaktadır.

P_{coop} rölenin doğru çözmesi durumunda hedefe gönderdiği işaret ile doğrudan kaynaktan hedefe gönderilen işaretin işbirlikli taşınmasında meydana gelen hata olasılığını göstermektedir.

Eşik değerinin kötü seçimi sonucunda meydana gelen hata yayılımının oluşma olasılığı P_{SR} eşitlik (3.18)'de verilmektedir [33].

$$P_{SR}(\gamma_{th}, \bar{\gamma}_{sr}) \leq Q(\sqrt{2\gamma_{th}}) - e^{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{sr}}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\bar{\gamma}_{sr}}}} Q\left(\sqrt{2\gamma_{th}\left(1 + \frac{1}{\bar{\gamma}_{sr}}\right)}\right) \quad (3.18)$$

(3.17)'de verilen; hata yayılımı P_{prop} ifadesinin hesaplanabilmesi için alıcıda MRC çıkışındaki işaret eşitlik (3.19)'da gösterilmektedir [20].

$$y = \frac{h^*_{sd} \sqrt{P_{sd}}}{N_0} y_{sd} + \frac{h^*_{rd} \sqrt{P_{rd}}}{N_0} y_{rd} \quad (3.19)$$

BPSK için rölenin hatalı çözme yaptığı varsayımı altında, vericiden gönderilen sembol $x = 1$ ise röleden hedefe gönderilen sembol $x = -1$ olacaktır. (3.19) eşitliğinde (3.1) ve (3.3) yerine konulduğunda (3.20) elde edilir [20].

$$\begin{aligned}
y &= \left(\frac{|h_{sd}|^2 P_{sd}}{N_0} - \frac{|h_{rd}|^2 P_{rd}}{N_0} \right) + \frac{h_{sd}^* \sqrt{P_{sd}}}{N_0} n_{sd} + \frac{h_{rd}^* \sqrt{P_{rd}}}{N_0} n_{rd} \\
&= (\gamma_{sd} - \gamma_{rd}) + \tilde{n}
\end{aligned} \tag{3.20}$$

(3.20) eşitliğinde; \tilde{n} sıfır ortalamalı ve $\frac{1}{2} (\gamma_{sd} + \gamma_{rd})$ varyanslı Gauss rasgele değişkenidir. Vericiden $x = 1$ gönderilmesi durumunda alıcıda hatanın oluşabilmesi için karar kuralı $y < 0$ olmalıdır. Bu durumdaki hata olasılığı eşitlik (3.21)'de gösterilmektedir [20].

$$P_{prop} = Q\left(\frac{\gamma_{sd} - \gamma_{rd}}{\sqrt{(\gamma_{sd} + \gamma_{rd})/2}}\right) \tag{3.21}$$

γ_{sd} ve γ_{rd} anlık değerler olduğu için ortalama İGO'lara göre, P_{prop} olasılığının ortalaması eşitlik (3.22) elde edilir [20].

$$\bar{P}_{prop} = \int_0^\infty \int_0^\infty Q\left(\frac{\gamma_{sd} - \gamma_{rd}}{\sqrt{(\gamma_{sd} + \gamma_{rd})/2}}\right) \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd} \bar{\gamma}_{rd}} e^{-\gamma_{sd}/\bar{\gamma}_{sd}} e^{-\gamma_{rd}/\bar{\gamma}_{rd}} d\gamma_{sd} d\gamma_{rd} \tag{3.22}$$

(3.22)'de verilen eşitliğin çözümü karmaşık olduğundan, (3.20) eşitliğine göre $\gamma_{sd} - \gamma_{rd} < 0$ olması durumunda hata meydana geldiği yaklaşımı ile hata yayılımı $P_{prop} \cong P(\gamma_{sd} - \gamma_{rd} < 0 | \bar{\gamma}_{sd}, \bar{\gamma}_{rd})$ olarak verilebilir. Bu durumda γ_{sd} ve γ_{rd} 'nin sırasıyla $\bar{\gamma}_{sd}$ ve $\bar{\gamma}_{rd}$ ortalamalarına sahip üstel rasgele değişkenler olduğu varsayımına göre eşitlik (3.23) elde edilir [20].

$$P_{prop} \cong \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{rd}} \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd} \bar{\gamma}_{rd}} e^{-\gamma_{sd}/\bar{\gamma}_{sd}} e^{-\gamma_{rd}/\bar{\gamma}_{rd}} d\gamma_{sd} d\gamma_{rd} \cong \frac{\bar{\gamma}_{rd}}{\bar{\gamma}_{sd} + \bar{\gamma}_{rd}} \tag{3.23}$$

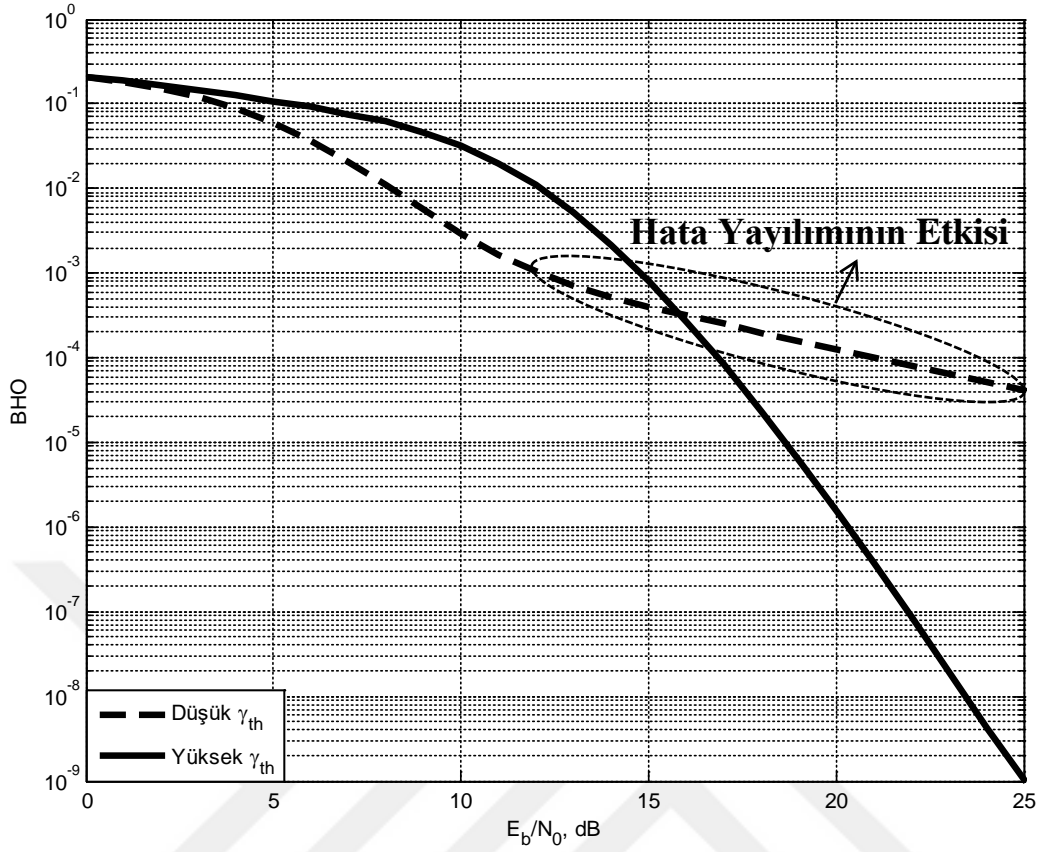
P_{coop} hatasının hesabı için, kaynak-hedef arasındaki MGF ifadesi ve kaynak-röle arasındaki MGF ifadesi yazılmalıdır. MGF ifadelerini kullanarak P_{coop} ifadesi eşitlik (3.24)'teki gibi yazılır [17].

$$P_{coop} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} M_{\gamma_{sd}}\left(\frac{1}{\sin^2(\theta)}\right) M_{\gamma_{sr}}\left(\frac{1}{\sin^2(\theta)}\right) d\theta \tag{3.24}$$

Şekil 3.5'te eşik değerinin röle seçimli sistem performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Genel olarak düşük E_b/N_0 değerlerinde, yüksek eşik değerlerinin (γ_{th}) kullanılması sistemin hata performansını kötüleştirmektedir. Bunun nedeni, kaynaktan röleye gelen sinyalin İGO değerinin seçilen yüksek eşik değerinin altında kalması nedeniyle rölenin suskun kalmasıdır. Bir başka ifadeyle P_{dec} olasılığının azalması ve buna bağlı olarak işbirliksiz iletişim (sadece direkt yoldan yapılan iletim) olasılığının artmasıdır. Diğer taraftan, düşük eşik değerlerinin (γ_{th}) kullanılması durumunda ise yüksek E_b/N_0 değerlerinde sistemin hata olasılığı yüksek eşik değerlerinin kullanımına göre artmaktadır. Kaynaktan röleye gelen sinyalin İGO değeri, γ_{th} değerinden yüksek ise röle kendine gelen sinyali doğru çözdüğünü varsayıp gelen veriyi hedefe gönderecektir; kaynaktan röleye gelen sinyalin İGO değeri γ_{th} değerinden düşük ise röle kendine gelen sinyali yanlış çözdüğünü varsayıp gelen veriyi hedefe göndermeyecektir (röle suskun). Bu nedenle düşük γ_{th} değerlerinin kullanılması durumunda röle çoğunlukla kaynaktan gelen sinyali doğru çözdüğünü varsayıp hedefe gönderecektir (röle aktif); fakat düşük γ_{th} kullanılması durumunda röle kaynaktan gelen sinyali doğru çözdüğünü varsaysa bile aslında röle çoğunlukla yanlış kod çözme yapacaktır ve yanlış çözdüğü sinyali hedefe gönderecektir. Bu durumda P_{SR} olasılığı artacak ve hata yayılımı sistemin hata performansı üzerinde etkili olacaktır. Bu durum, düşük γ_{th} değerlerinin kullanılması durumunda sistemin hata olasılığı eğrisinin yüksek E_b/N_0 değerlerinde eğiminin azalması, çeşitleme kazancının kaybolması şeklinde görülmektedir. Diğer taraftan, yüksek γ_{th} değerlerinin kullanılması durumunda ise sistemin hata olasılığı eğrisinin yüksek E_b/N_0 değerlerinde eğiminin azalmadığı görülmektedir.

Bunun nedeni seçilen yüksek γ_{th} değerlerinde röle aktif ise çoğunlukla doğru kod çözme yapacaktır ve P_{SR} olasılığı azalarak sistem üzerinde hata yayılımının etkisi gözükmeyecektir. Bu durumdaki röle güvenilir röle olarak adlandırılmaktadır.



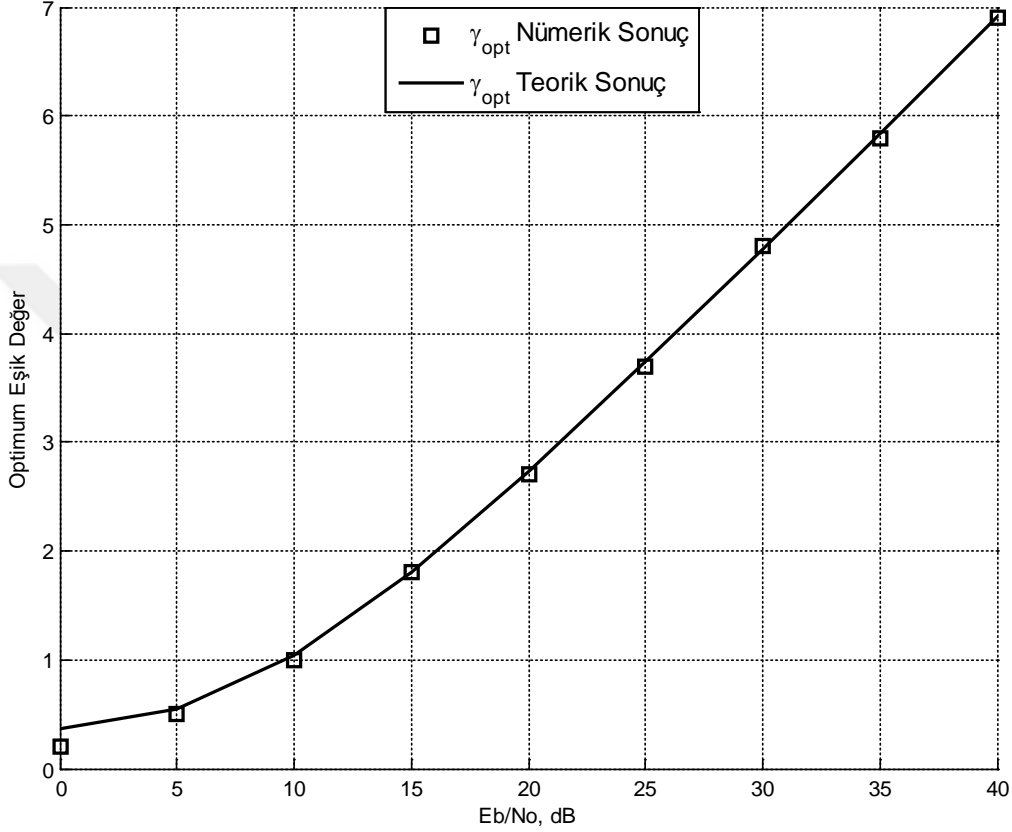
Şekil 3.5 Düşük γ_{th} ve yüksek γ_{th} durumlarında hata yayılımının etkisi.

Buradan çıkarılacak sonuç; düşük E_b/N_0 değerlerinde yüksek γ_{th} , yüksek E_b/N_0 değerlerinde düşük γ_{th} kullanmak sistem performansını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle eşik γ_{th} değerinin E_b/N_0 değerlerine göre ayrı ayrı seçilmesi gerekmektedir. γ_{th} seçimi, uçtan uca sistem hata olasılığını her E_b/N_0 değerinde minimum olacak şekilde yapılmalıdır.

Bu seçim tek röleli sistemde, (3.6) eşitliğinin γ_{th} 'a göre türevinin alınıp sıfıra eşitlenmesi ve Leibnitz kuralının [34] kullanılması ile (3.25)'teki gibi elde edilir. Uçtan uca sistem hata olasılığını minimum yapan γ_{th} eşik değeri, optimum eşik değeri olarak adlandırılmaktadır ve γ_{opt} ile ifade edilmektedir [21].

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{2} \left[Q^{-1} \left(\frac{P_{non-coop} - P_{coop}}{P_{prop} - P_{coop}} \right) \right]^2 \quad (3.25)$$

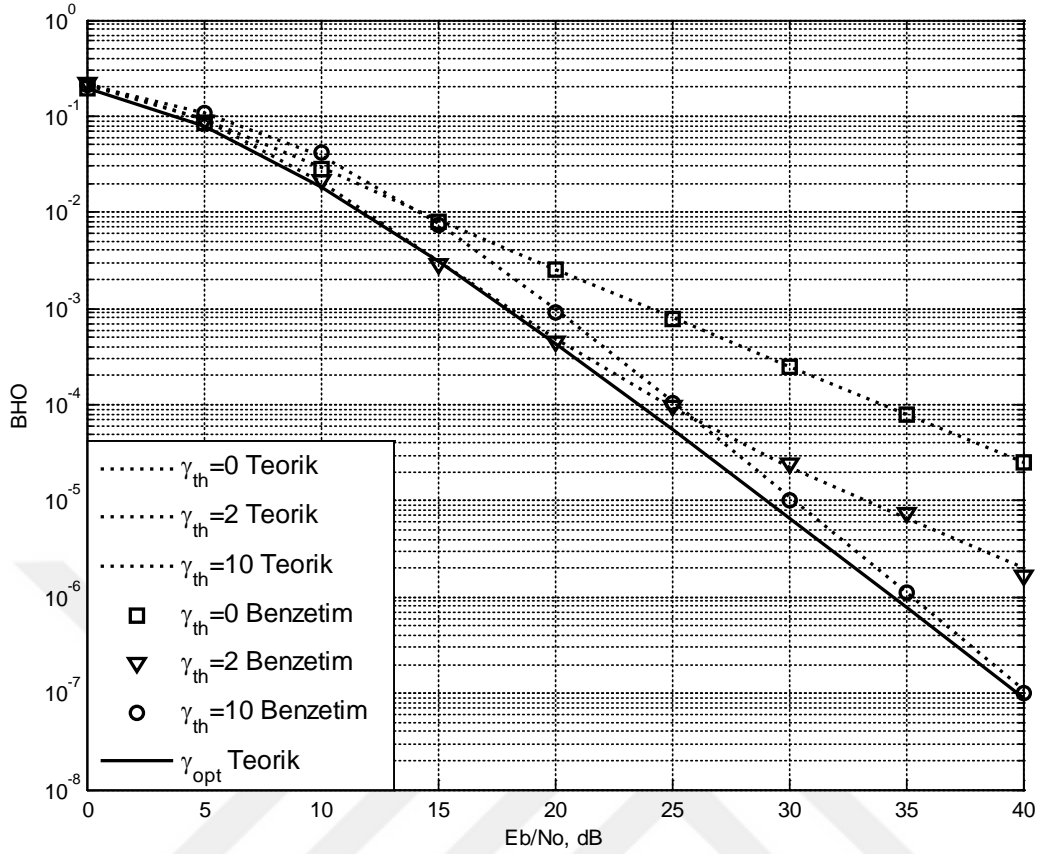
Şekil 3.6'da ortamda tek rölenin bulunduğu sistem modeli için, $\sigma_{sd}^2 = \sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$ olduğu durumda γ_{opt} 'un eşitlik (3.25)'te elde edilmiş olan teorik sonucu ile nümerik sonucunun karşılaştırması verilmektedir. Sistem performansının iyileştirilmesi için düşük E_b/N_0 bölgelerinde düşük γ_{th} , yüksek E_b/N_0 bölgelerinde yüksek γ_{th} kullanılması gerektiği görülmektedir.



Şekil 3.6 Ortamda tek rölenin bulunduğu sistemde γ_{opt} nümerik ve teorik sonucunun karşılaştırması.

Şekil 3.7'de ortamda tek rölenin bulunduğu sistem modeli için, $\gamma_{th}=0, 2, 10$, γ_{opt} ve $\sigma_{sd}^2 = \sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$ olduğu durumlarda sistem performansının değişimi teorik ve benzetim sonuçlarına göre incelenmiştir.

Tek röleli sistem modelinde toplam sistem gücü kaynak-röle arasında eşit paylaştırılmıştır ($P_s = P_r = P/2$). γ_{opt} sayesinde düşük E_b/N_0 bölgelerinde yüksek γ_{th} kullanılması durumunda ortaya çıkan rölenin suskun kalması, yüksek E_b/N_0 bölgelerinde de düşük γ_{th} kullanılması durumunda hata yayılımı olasılığının artması önlenmektedir. Böylece tüm E_b/N_0 değerlerinde hata olasılığı eğrisi minimum seviyededir ve çeşitleme kazancı gözükmemektedir.



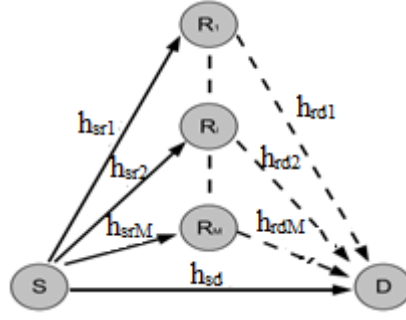
Şekil 3.7 Ortamda tek rölenin bulunduğu sistemde $\gamma_{th}=0, 2, 10, \gamma_{opt}$ değerleri için teorik ve benzetim sonuçları.

3.4 ÇOK RÖLELİ ORTAMDA UÇTAN UCA HATA OLASILIĞI HESABI

İşbirlikli çeşitleme yöntemi tek röle ile kullanıcılar arasındaki iletişim kalitesi arttırmak için kullanılır. Bunun yanı sıra kaynak-hedef arasında bulunan diğer kullanıcılar, bu iki kullanıcı için röle kabul edilerek çok röleli sistemler de tasarlanabilir.

Kaynak-hedef arasında bulunan ve röle kabul edilen bu cihazlar çeşitleme sağlar. Sonuç olarak iletişim kalitesi röle sayısı ile orantılı olarak iyileşir.

Bu bölümde; ortamda kaynak (S), hedef (D) ve M adet rölenin ($R_i, i \in \{1, \dots, M\}$) bulunduğu durum incelenmektedir. Şekil 3.8’de iki atlamalı çok röleli işbirlikli sistem yapısı gösterilmektedir. Her birim, tek antenli yarı çift yönlü (half-duplex) yapıya sahiptir ve herhangi iki birim arasındaki kanal sönmüleme katsayısının zarfı Rayleigh rasgele değişkeni olarak modellenmiştir. Sistemdeki tüm röleler DF protokolünü kullanmaktadır.



Şekil 3.8 Çok röleli sistem.

3.4.1. Üç Röleli Sistem İçin Hata Olasılığı Hesabı

Bu bölümde ortamda M adet rölenin bulunduğu ve iletişim için tümünün kullanıldığı sistem modeli incelenecektir. DF röle protokolünün kullanıldığı M röleli bir sistemde, eşik değer seçimine bağlı genel hata olasılığı ifadesi eşitlik (3.26)'da verilmektedir.

$$P_{e2e} = (1 - P_{dec})^M P_{non-coop} + \sum_{N_r=1}^M \binom{M}{N_r} P_{dec}^{N_r} (1 - P_{dec})^{M-N_r} P_{div} \quad (3.26)$$

Burada P_{dec} (3.7)'de ve $P_{non-coop}$ (3.15)'te verilenler ile aynıdır. $\binom{M}{N_r} P_{dec}^{N_r} (1 - P_{dec})^{M-N_r}$ olasılığı, ortamda bulunan M adet röleden N_r tanesinin kaynaktan kendisine gelen sembolün İGO değerinin eşik değeri γ_{th} 'den büyük olma olasılığını belirtmektedir.

Yani M adet röleden N_r tanesinin aktif olmasının olasılığıdır. M röleli bir sistem için verilen genel hata olasılığı ifadesi, teorik hesap karmaşıklığını önlemek için sadece üç röleli sistem için özelleştirilecektir. Bu durumda hata olasılığı ifadesi (3.27)'deki gibi elde edilir.

$$P_{e2e} = (1 - P_{dec})^3 P_{non-coop} + \sum_{N_r=1}^3 \binom{3}{N_r} P_{dec}^{N_r} (1 - P_{dec})^{3-N_r} P_{div} \quad (3.27)$$

Rölenin iletimde olduğu durumdaki hata olasılığı P_{div} , ortamda üç röle olması durumunda eşitlik (3.28)'de verilmektedir.

$$P_{div} = \begin{cases} (1 - P_{dec})P_{coop_1} + P_{SR}P_{prop_{1,1}} & Nr = 1 \\ P_{SR}^2 P_{prop_{2,2}} + 2P_{SR}(1 - P_{SR})P_{prop_{2,1}} + (1 - P_{SR})^2 P_{coop_2} & Nr = 2 \\ P_{SR}^3 P_{prop_{3,3}} + 3P_{SR}^2(1 - P_{SR})P_{prop_{3,2}} + 3P_{SR}(1 - P_{SR})^2 P_{prop_{3,1}} + (1 - P_{SR})^3 P_{coop_3} & Nr = 3 \end{cases} \quad (3.28)$$

Burada P_{coop_i} ortamda aktif olan i ($i=N_r$) adet rölenin işbirlikli iletişim sonucunda hedefteki hata olasılığını; $P_{prop_{i,j}}$ ise ortamda aktif olan i adet röleden, j tanesinin sebep olduğu hata yayılımı olasılığını vermektedir. Ortamda bir rölenin iletimde olduğu ve doğru çözdüğü durumda, alıcıda yapılan işbirlikli iletişim hata olasılığı P_{coop_1} eşitlik (3.29)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{coop_1} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} M_{Y_{sd}} \left(\frac{1}{\sin^2(\theta)} \right) M_{Y_{rd}} \left(\frac{1}{\sin^2(\theta)} \right) d\theta \quad (3.29)$$

Ortamda iki rölenin iletimde olduğu ve doğru çözdüğü durumda, alıcıda yapılan işbirlikli iletişim hata olasılığı P_{coop_2} (3.30)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{coop_2} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} M_{Y_{sd}} \left(\frac{1}{\sin^2(\theta)} \right) M_{Y_{rd}}^2 \left(\frac{1}{\sin^2(\theta)} \right) d\theta \quad (3.30)$$

Ortamda üç rölenin iletimde olduğu ve doğru çözdüğü durumda, alıcıda yapılan işbirlikli iletişim hata olasılığı P_{coop_3} (3.31)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{coop_3} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} M_{Y_{sd}} \left(\frac{1}{\sin^2(\theta)} \right) M_{Y_{rd}}^3 \left(\frac{1}{\sin^2(\theta)} \right) d\theta \quad (3.31)$$

Ortamda bir rölenin olduğu ve rölenin hatalı çözdüğü durumda, alıcıda MRC yapılması sonucu meydana gelen hata yayılımı $P_{prop_{1,1}}$ (3.23)'teki ile aynı hesaplanır.

Ortamda iki rölenin olduğu ve iki rölenin de hatalı çözdüğü durumda, alıcıda MRC yapılması sonucu meydana gelen hata yayılımı $P_{prop_{2,2}}$, $P(\gamma_{sd} - \gamma_{rd1} - \gamma_{rd2} < 0)$ olasılığıdır. $\gamma_{sd} < \gamma_{rd1} + \gamma_{rd2}$ için $P_{prop_{2,2}}$ (3.32)'deki gibi hesaplanır.

$$P_{prop_{2,2}} = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{rd1} + \gamma_{rd2}} \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd} \bar{\gamma}_{rd1} \bar{\gamma}_{rd2}} e^{-\gamma_{sd}/\bar{\gamma}_{sd}} e^{-\gamma_{rd1}/\bar{\gamma}_{rd1}} e^{-\gamma_{rd2}/\bar{\gamma}_{rd2}} d\gamma_{sd} d\gamma_{rd1} d\gamma_{rd2} \quad (3.32)$$

$\bar{\gamma}_{rd1} = \bar{\gamma}_{rd2} = \bar{\gamma}_{rd}$ olması durumunda $P_{prop_{2,2}}$ eşitlik (3.33)'teki gibi elde edilir.

$$P_{prop_{2,2}} = \left(\frac{\bar{\gamma}_{sd}}{\bar{\gamma}_{sd} + \bar{\gamma}_{rd}} \right)^2 - \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd}} \quad (3.33)$$

Ortamda üç rölenin olduğu ve rölelerden birinin hatalı çözdüğü durumda, alıcıda MRC yapılması sonucu meydana gelen hata yayılımı $P_{prop_{3,1}}$ $P(\gamma_{sd} - \gamma_{rd1} + \gamma_{rd2} + \gamma_{rd3} < 0)$ olasılığıdır. $\gamma_{sd} + \gamma_{rd2} + \gamma_{rd3} < \gamma_{rd1}$ için $P_{prop_{3,1}}$ (3.34)'teki gibi hesaplanır.

$$P_{prop_{3,1}} = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{sd} + \gamma_{rd2} + \gamma_{rd3}} \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd} \bar{\gamma}_{rd1} \bar{\gamma}_{rd2} \bar{\gamma}_{rd3}} e^{-\gamma_{sd}/\bar{\gamma}_{sd}} e^{-\gamma_{rd1}/\bar{\gamma}_{rd1}} e^{-\gamma_{rd2}/\bar{\gamma}_{rd2}} e^{-\gamma_{rd3}/\bar{\gamma}_{rd3}} d\gamma_{rd1} d\gamma_{sd} d\gamma_{rd2} d\gamma_{rd3} \quad (3.34)$$

$\bar{\gamma}_{rd1} = \bar{\gamma}_{rd2} = \bar{\gamma}_{rd3} = \bar{\gamma}_{rd}$ olması durumunda $P_{prop_{3,1}}$ eşitlik (3.35)'teki gibi elde edilir.

$$P_{prop_{3,1}} = \frac{\bar{\gamma}_{rd}}{4(\bar{\gamma}_{rd} + \bar{\gamma}_{sd})} \quad (3.35)$$

Ortamda üç rölenin olduğu ve iki rölenin hatalı çözdüğü durumda, alıcıda MRC yapılması sonucu meydana gelen hata yayılımı $P_{prop_{3,2}}$ $P(\gamma_{sd} + \gamma_{rd1} - \gamma_{rd2} - \gamma_{rd3} < 0)$ olasılığıdır. $\gamma_{sd} + \gamma_{rd1} < \gamma_{rd2} + \gamma_{rd3}$ için $P_{prop_{3,2}}$ (3.37)'deki gibi hesaplanır.

$$\gamma_{rd2} + \gamma_{rd3} = z \quad , \quad f_z(z) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{rd}^2} z e^{-z/\bar{\gamma}_{rd}} \quad (3.36)$$

$$P_{prop_{3,2}} = \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd}\bar{\gamma}_{rd1}} e^{-\gamma_{sd}/\bar{\gamma}_{sd}} e^{-\gamma_{rd1}/\bar{\gamma}_{rd1}} \int_{\gamma_{sd}+\gamma_{rd1}}^\infty \frac{1}{\bar{\gamma}_{rd}^2} z e^{-z/\bar{\gamma}_{rd}} dz \quad (3.37)$$

$\bar{\gamma}_{rd1} = \bar{\gamma}_{rd}$ olması durumunda $P_{prop_{3,2}}$ eşitlik (3.38)'deki gibi elde edilir.

$$P_{prop_{3,2}} = \frac{\bar{\gamma}_{rd}}{\bar{\gamma}_{rd}+\bar{\gamma}_{sd}} \left(\frac{3}{4} + \frac{\bar{\gamma}_{sd}}{2(\bar{\gamma}_{rd}+\bar{\gamma}_{sd})} \right) \quad (3.38)$$

Ortamda üç rölenin olduğu ve üç rölenin de hatalı çözdüğü durumda, alıcıda MRC yapılması sonucu meydana gelen hata yayılımı $P_{prop_{3,3}}$, $P(\gamma_{sd} - \gamma_{rd1} - \gamma_{rd2} - \gamma_{rd3} < 0)$ olasılığıdır. $\gamma_{sd} < \gamma_{rd1} + \gamma_{rd2} + \gamma_{rd3}$ için $P_{prop_{3,3}}$ (3.39)'daki gibi hesaplanır.

$$P_{prop_{3,3}} = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{rd1}+\gamma_{rd2}+\gamma_{rd3}} \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd} \bar{\gamma}_{rd1} \bar{\gamma}_{rd2} \bar{\gamma}_{rd3}} e^{-\gamma_{sd}/\bar{\gamma}_{sd}} e^{-\gamma_{rd1}/\bar{\gamma}_{rd1}} e^{-\gamma_{rd2}/\bar{\gamma}_{rd2}} e^{-\gamma_{rd3}/\bar{\gamma}_{rd3}} d\gamma_{sd} d\gamma_{rd1} d\gamma_{rd2} d\gamma_{rd3} \quad (3.39)$$

$\bar{\gamma}_{rd1} = \bar{\gamma}_{rd2} = \bar{\gamma}_{rd3} = \bar{\gamma}_{rd}$ olması durumunda $P_{prop_{3,3}}$ eşitlik (3.40)'daki gibi elde edilir.

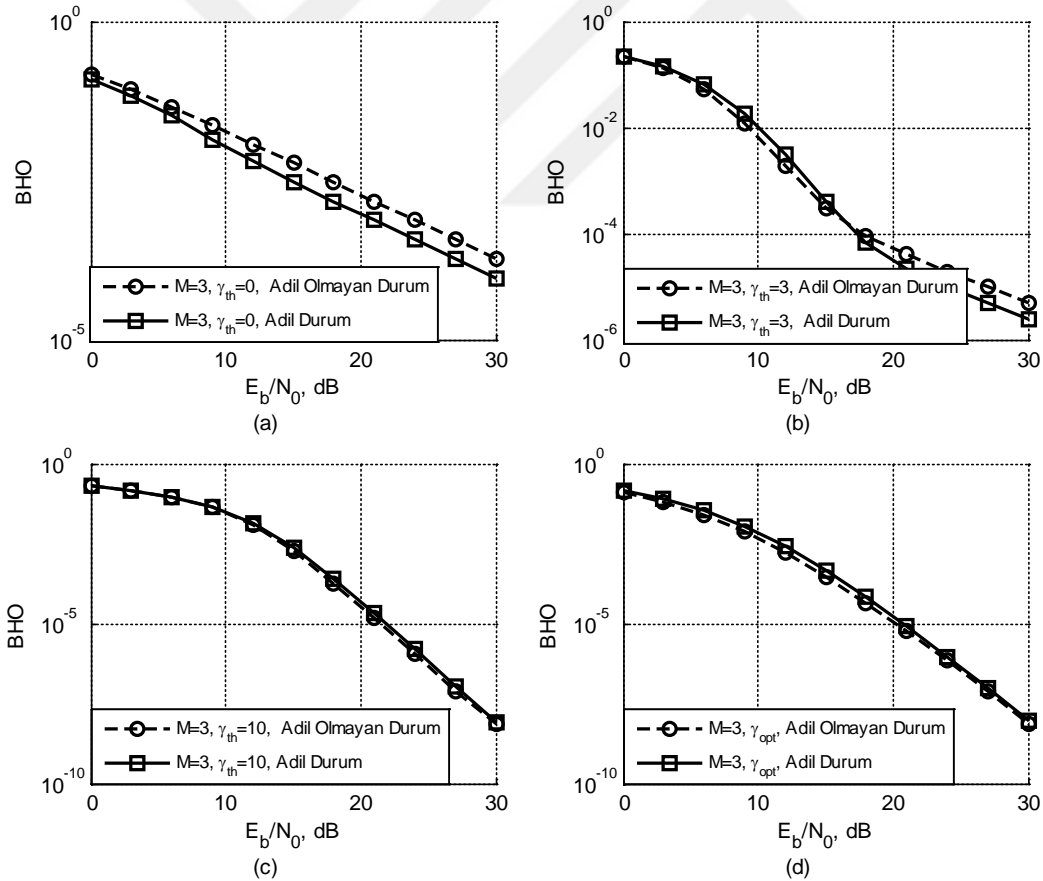
$$P_{prop_{3,3}} = 1 - \left(\frac{\bar{\gamma}_{sd}}{\bar{\gamma}_{rd}+\bar{\gamma}_{sd}} \right)^3 \quad (3.40)$$

Şekil 3.9'da ortamda üç rölenin bulunduğu ve bu üç rölenin de aktif olduğu sistem modeli için, $\sigma_{sd}^2 = \sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$ ve $\gamma_{th} = 0, 3, 10, \gamma_{opt}$ değerleri için teorik sonuçlar verilmektedir. Rölelerdeki güç paylaşımına göre adil ve adil olmayan iki durum göz önüne alınmıştır. Tek röleli sistem modelinde, toplam sistem gücü kaynak-röle arasında eşit paylaştırılmıştır. Üç röleli ve tüm rölelerin de aktif olduğu sistem modelinde $P_s = P_{r_i} = P/2$ ($i=1,2,3$) olduğu durum ile $P_s = P/2$, $P_{r_i} = P/6$ ($i=1,2,3$) olduğu durum incelenmektedir. $P_{r_i} = P/2$ olarak kullanıldığı durumda toplam sistem gücü $P_s + 3P_{r_i} = P/2 + 3P/2 = 2P$ olmakta, $P_{r_i} = P/6$ olarak kullanıldığı durumda ise toplam sistem gücü $P_s + 3P_{r_i} = P/2 + 3P/6 = P$ olmaktadır. Yani $P_{r_i} = P/2$ olarak kullanıldığı durumda gerekli olan sistem gücü 2 katına çıkmaktadır, bu nedenle bu sistem Adil Olmayan durum olarak adlandırılmıştır. Diğer taraftan $P_{r_i} = P/6$ olarak kullanıldığı durumda ise gerekli olan sistem gücü P olarak kalmaktadır, bu nedenle bu sistem Adil Olan durum olarak adlandırılmıştır.

Şekil 3.9 (a)'da $\gamma_{th} = 0$ için adil ve adil olmayan durum karşılaştırılmıştır. Burada adil olmayan durumun daha kötü sistem performansı sağladığı görülmektedir. Bunun nedeni $\gamma_{th} = 0$ 'da hata yayılımı olasılığı fazla olduğu için, röledeki hata yayılımının adil olmayan durumda güç miktarının artışıyla beraber alıcıda daha etkin olmasıdır, yani adil olmayan durum için hatalı verilerin alıcıdaki İGO değeri daha yüksektir.

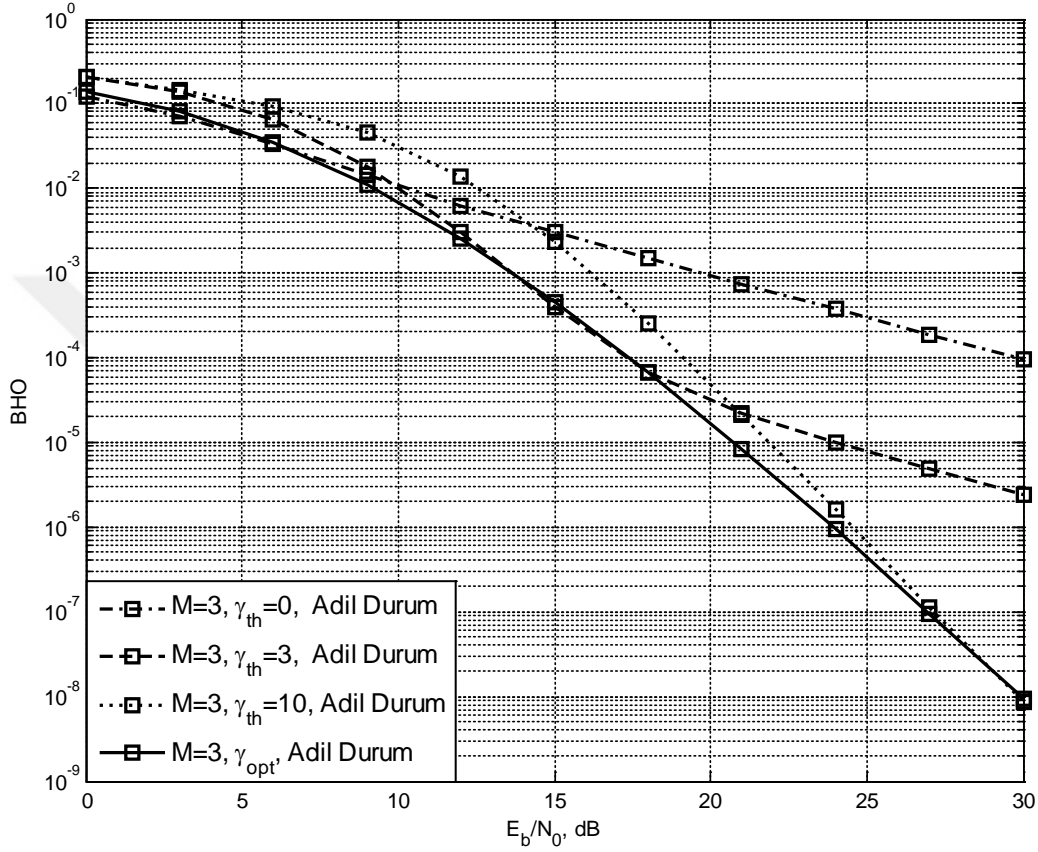
Şekil 3.9 (b)'de $\gamma_{th} = 3$ için düşük E_b/N_0 değerlerinde adil olmayan durumun daha iyi sistem performansı sağladığı görülmektedir. Yüksek E_b/N_0 değerlerinde ise, düşük γ_{th} kullanımına bağlı olarak hata yayılımı etkisi arttığı için adil durum daha iyi sonuç vermektedir. Çünkü adil olmayan durumda hata yayılımı (hatalı veri) hedefe daha fazla güç ile iletilmektedir.

Şekil 3.9 (c)'de $\gamma_{th} = 10$ ve (d)'de γ_{opt} için adil ve adil olmayan durumlar hemen hemen aynı sistem performansı gözlemlenmiştir.

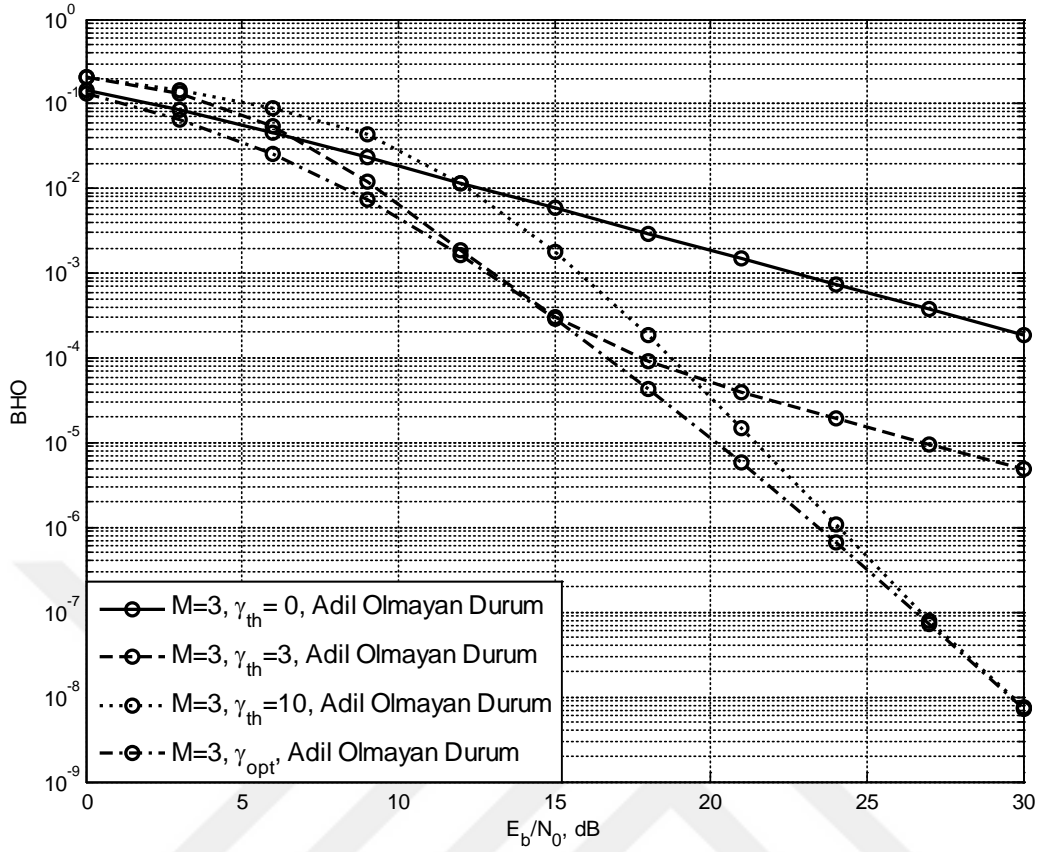


Şekil 3.9 Ortamda üç rölenin bulunduğu durumda $\gamma_{th} = 0, 3, 10, \gamma_{opt}$ değerleri için adil ve adil olmayan durumların teorik sonuçları.

Ortamda üç rölenin bulunduğu ve bu üç rölenin de aktif olduğu sistem modeli için, $\sigma_{sd}^2 = \sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$ olduğu durumda $\gamma_{th} = 0, 3, 10, \gamma_{opt}$ değerleri için Şekil 3.10’da adil durum teorik sonuçları, Şekil 3.11’de ise adil olmayan durum teorik sonuçları verilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, γ_{opt} kullanılması durumunda en iyi sistem performansı elde edilmektedir.



Şekil 3.10 Ortamda üç rölenin bulunduğu durumda $\gamma_{th} = 0, 3, 10, \gamma_{opt}$ değerleri için adil durum teorik sonuçları.



Şekil 3.11 Ortamda üç rölenin bulunduğu durumda $\gamma_{th} = 0, 3, 10, \gamma_{opt}$ değerleri için adil olmayan durum teorik sonuçları.

3.4.2 Röle Seçimli Sistem İçin Hata Olasılığı Hesabı

Röle sayısının artışı iletişim kalitesini arttırmasına rağmen karşılaşılan en büyük problem kaynakların verimli kullanılmamasıdır. Çünkü röle sayısının artışıyla birlikte aynı verinin hedefe gönderilmesi için harcanan zaman dilimi röle sayısı ile orantılı biçimde artacağından sistem kapasitesi düşecektir. Bu problemin çözümü için, kaynak-röle arasındaki tüm rölelerin kullanılmasının yerine bu rölelerden en iyi link kalitesine sahip rölenin seçilmesi ve işbirliğinin bu röle üzerinden yapılması yaklaşımı, Bletsas vd. tarafından 2006 yılında önerilmiştir. Bu yaklaşımda; çok röle arasından seçilen en iyi röle, kaynak-hedef arasındaki en yüksek İGO değerine sahip röledir. Bu sayede tüm rölelerin kullanılmasıyla elde edilen çeşitleme derecesi, sadece en iyi röle üzerinden yapılan iletim ile de elde edilebilir.

Literatürde röle seçimi analizlerinde sıra istatistiği yöntemi kullanılarak Bit Hata Oranı (BHO) için teorik ifadeler türetilmiştir.

En iyi rölenin kullanılmadığı durumlarda M adet röle arasından genel ifade ile N . rölenin kullanıldığı sistemlerde AF ve DF protokolleri için analizler yapılmıştır [10, 17]. Ayrıca röle seçiminde kanal kestiriminin doğru yapılamaması durumunda ortaya çıkan hatalar göz önüne alınarak genelleştirilmiş röle seçimi (GRS) fikri ortaya atılmıştır [18,19]. GRS yönteminde, en iyi link kalitesine sahip tek bir röle değil birden çok röle seçilmektedir. DF röle seçimi için sıklıkla kullanılan yöntemler Seçme İşbirliği (SC) ve Max-Min yöntemleridir.

3.4.2.1 Seçme İşbirliği Yöntemi İçin Uçtan Uca Hata Olasılığı Hesabı

Kaynakların verimli kullanımını ve tam çeşitlemeyi sağlayabilmek için M adet röle arasından seçilen en iyi röle üzerinden iletişim gerçekleştirilmektedir. Seçilen en iyi röle kaynak-hedef arasındaki en iyi link kalitesine sahip röledir. Röle seçimi için, hedefin tüm rölelerin kanal bilgisini bildiği varsayılır. Bu sistemde röle seçimi iki aşamada tamamlanmaktadır. İlk aşamada kaynaktan i . röleye gelen sembolün İGO değeri olan γ_{sr_i} 'ye bakılmaktadır. Kaynaktan röleye gelen sembolün İGO değeri, belirli bir eşik değerinden (γ_{th}) küçük ise rölenin sembolü doğru çözemediğine karar verilir ve bu röle seçim kümesi olarak adlandırılan C kümesinin dışında bırakılır. İGO değerinin eşik değerinden büyük olduğu rölelerin ($\gamma_{sr_i} > \gamma_{th}$) ise gelen sembolü doğru çözdüğü varsayılır ve bu röle C kümesinin içerisinde yer alır. İkinci aşamada ise C kümesi içerisinde İGO değeri en yüksek olan röle ($\max\{\gamma_{r_i}\}, i \in C$) seçilir [23]. En iyi röle belirlendikten sonra seçim dışında kalan röleler diğer sembole kadar bekleme konumuna geçmektedir. Eşik değerinin doğru belirlenmiş olması çok önemlidir. Aksi halde gelen sembolü yanlış çözen röleler de C kümesi içerisinde yer alarak hata yayılımına neden olabilir.

Bu bölümde, Seçme İşbirliği Yöntemi ile seçilen en iyi link kalitesine sahip tek röle üzerinden yapılan iletişimde hedefte meydana gelen uçtan uca hata olasılığı ifadesi türetilmektedir. Uçtan uca hata olasılığı eşitlik (3.41)'de verilmiştir.

$$P_{e2e} = \sum_{i=0}^M P_r(N_r = i) P_r(\varepsilon_{e2e} | N_r = i) \quad (3.41)$$

(3.41) eşitliğinde; $P_r(\varepsilon_{e2e}|N_r = i)$, M adet rölenin bulunduğu ortamda C kümesine dâhil olan röle sayısının i adet olma olasılığı altında oluşan hata olasılığını, $P_r(N_r = i)$ ise M adet rölenin bulunduğu ortamda C kümesinde yer alan röle sayısının i adet olma olasılığını göstermektedir ve eşitlik (3.42)'deki binom dağılımına sahiptir.

$$P_r(N_r = i) = \binom{M}{i} (P_{dec})^i (1 - P_{dec})^{M-i} \quad (3.42)$$

(3.42) eşitliğinde; $i = 0, 1, \dots, M$ C kümesine giren röle sayısını; P_{dec} röleye gelen sembolün İGO değerinin eşik değeri γ_{th} 'den büyük olma olasılığını belirtmektedir ve eşitlik (3.7)' de verilmiştir.

Eşitlik (3.41)'deki toplam hata olasılığı düzenlendiğinde eşitlik (3.43) elde edilmektedir.

$$P_{e2e} = (1 - P_{dec})^M \times P_{non-coop} + \sum_{N_r=1}^M \binom{M}{N_r} P_{dec}^{N_r} \times (1 - P_{dec})^{M-N_r} \times P_{div} \quad (3.43)$$

(3.43) eşitliğinde; $P_{non-coop}$ C kümesine hiçbir rölenin girmediği yani rölelerin tümünün iletimde olmadığı $N_r = 0$ durumundaki ortalama hata olasılığını ifade etmektedir ve eşitlik (3.16)'da verilmiştir. P_{div} ifadesi C kümesi içerisinde en iyi link kalitesine sahip röle seçildiği durumdaki işbirlikli iletişimin ortalama hata olasılığını ifade etmektedir ve röle seçimsiz tek röleli sistem için verilen eşitlik (3.17)'de verilen ile aynıdır. Fakat röle seçimli sistemde, (3.17)'de verilen P_{div} içerisindeki P_{prop} ve P_{coop} olasılıklarının hesapları farklıdır.

P_{coop} ifadesi C kümesi içerisindeki N_r adet röleden seçilen en iyi rölenin, kaynaktan gelen sinyali doğru çözdüğünde (güvenilir röle) yani doğru eşik değerin seçilmesi durumunda röle-hedef arasındaki yolun neden olduğu hata olasılığını göstermektedir. Bu durumda hedefte alınan İGO değeri eşitlik (3.44)'te verilmektedir.

$$\gamma_r = \gamma_{sd} + \gamma_{r^1d} \quad (3.44)$$

Burada γ_{r^1d} seçilen en iyi link kalitesine sahip röleden gelen İGO'nu belirtmektedir. P_{coop} ifadesi MGF yaklaşımı ile türetildiğinde eşitlik (3.45)'teki gibi elde edilir.

$$P_{coop} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} M_{\gamma_{sd}} \left(\frac{1}{\sin^2(\theta)} \right) M_{\gamma_{r^1d}} \left(\frac{1}{\sin^2(\theta)} \right) d\theta \quad (3.45)$$

(3.45) eşitliğinde; $M_{\gamma_{r^1d}}(\cdot)$, C kümesi içerisinde seçilen en iyi link kalitesine sahip röleden hedefe gelen İGO γ_{r^1d} 'nin MGF fonksiyonudur.

Tanım 1: X_1, X_2, \dots, X_M M adet bağımsız rasgele değişken olsun. X rasgele değişkenlerinin ilgili sıra istatistiği büyükten küçüğe doğru sıralandığında X^1, X^2, \dots, X^M elde edilir. Burada X^1, X_i 'lerin en büyüğünü ifade etmektedir. N th sıra istatistiğinin olasılık yoğunluk fonksiyonu (3.46)'daki gibi verilir [17].

$$f_{X^N}(x) = M \binom{M-1}{N-1} [F(x)]^{M-N} [1 - F(x)]^{N-1} f(x) \quad (3.46)$$

Rayleigh kanal durumunda DF protokolü kullanan C kümesi içerisindeki N_r adet röle arasından en iyi bağlantı kalitesine sahip birinci röle seçileceğinden (3.46)'da $M = N_r$ ve $N=1$ yazılırsa γ_{r^1d} 'nin OYF ifadesi $f_{\gamma_{R^1D}}(\gamma_{r^1d})$ aşağıdaki gibi elde edilir.

$$f_{\gamma_{r^1d}}(\gamma_{r^1d}) = N_r [F_{\gamma_{rd}}(\gamma_{rd})]^{N_r-1} f_{\gamma_{rd}}(\gamma_{rd}) \quad (3.47)$$

(3.47) eşitliğinde; $f_{\gamma_{rd}}(\gamma_{rd})$ ve $F_{\gamma_{rd}}(\gamma_{rd})$ sırasıyla, M adet sıralanmamış özdeş bağımsız rasgele değişkenlerin olasılık yoğunluk ve olasılık dağılım fonksiyonlarını ifade etmektedir. Rayleigh kanalda DF protokolü kullanan röleler için olasılık yoğunluk fonksiyonu (3.48)'de, olasılık dağılım fonksiyonu (3.49)'da gösterilmektedir.

$$f_{\gamma_{rd}}(\gamma_{rd}) = \frac{1}{\gamma_{rd}} e^{-\frac{\gamma_{rd}}{\bar{\gamma}_{rd}}} \delta(\gamma_{rd}) \quad (3.48)$$

$$F_{\gamma_{rd}}(\gamma_{rd}) = (1 - e^{-\frac{\gamma_{rd}}{\bar{\gamma}_{rd}}} u(\gamma_{rd})) \quad (3.49)$$

Eşitlik (3.48)'de $\delta(\cdot)$ dürtü fonksiyonunu, (3.49)'da $u(\cdot)$ birim basamak fonksiyonunu ifade etmektedir.

(3.48) ve (3.49), eşitlik (3.47)'de yerine yazılırsa $f_{\gamma_{r^1d}}(\gamma_{r^1d})$ aşağıdaki gibi elde edilir.

$$f_{\gamma_{r^1d}}(\gamma_{r^1d}) = N_r \frac{1}{\bar{\gamma}_{r^1d}} \sum_{k=0}^{N_r-1} (-1)^k \binom{N_r-1}{k} e^{-\frac{\gamma_{r^1d}^{(k+1)}}{\bar{\gamma}_{r^1d}}} \quad (3.50)$$

Burada (\cdot) kombinasyonu ifade eder. (3.50) eşitliğinde verilen ifadenin MGF'si (3.51)'de verilmektedir.

$$M_{\gamma_{r^1d}}(s) = E \left\{ e^{-s\gamma_{r^1d}} f_{\gamma_{r^1d}}(\gamma_{r^1d}) \right\} = N_r \sum_{k=0}^{N_r-1} (-1)^k \binom{N_r-1}{k} \frac{1}{k+1+\bar{\gamma}_{r^1d}s} \quad (3.51)$$

P_{prop} , tek röleli sistem için türetilen (3.23)'teki yaklaşıma benzer olmakla birlikte, tek röle seçimli sistemde seçilen i . röle ile hedef arasındaki İGO artık üstel rasgele değişken değildir. Bu sistemde en iyi röle seçimi yapıldığı için seçilen en iyi rölenin istatistiği değişmektedir. Bu durumda P_{prop} (3.52)'deki gibi yazılabilir.

$$P_{prop} = \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{r^1d}} f_{\gamma_{sd}}(\gamma_{sd}) f_{\gamma_{r^1d}}(\gamma_{r^1d}) d\gamma_{sd} d\gamma_{r^1d} \quad (3.52)$$

Eşitlik (3.52)'de $f_{\gamma_{r^1d}}(\gamma_{r^1d})$, genel anlamda M adet röleden seçilen en iyi rölenin olasılık yoğunluk fonksiyonunu ifade etmektedir [17]. Bu durumda P_{prop} eşitlik (3.53)'teki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} P_{prop} &= \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{r^1d}} \frac{1}{\bar{\gamma}_{sd}} e^{-\gamma_{sd}/\bar{\gamma}_{sd}} \sum_{k=0}^{M-N_r} M \binom{M-1}{N_r-1} (-1)^k \binom{M-N_r}{k} \frac{1}{\bar{\gamma}_{r^1d}} e^{-\gamma_{r^1d}^{(k+1)}/\bar{\gamma}_{r^1d}} d\gamma_{sd} d\gamma_{r^1d} \\ &= \sum_{k=0}^{M-N_r} M \binom{M-1}{N_r-1} (-1)^k \binom{M-N_r}{k} \left(\frac{-\bar{\gamma}_{sd}}{\bar{\gamma}_{r^1d}^{(k+1)}\bar{\gamma}_{sd}} + \frac{1}{k+1} \right) \end{aligned} \quad (3.53)$$

Elde edilen denklemler kullanılarak uçtan uca hata olasılığı ifadesi (3.54)'teki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
BHO = & \left(1 - \exp\left(-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{sr}\right)\right)^M x Q\left(\sqrt{2\bar{\gamma}_{sd}}\right) + \sum_{i=1}^M \left[\exp\left(-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{sr}\right)^i \left(1 - \right. \right. \\
& \exp\left(-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{sr}\right)^{M-i} \left[\left(\frac{\bar{\gamma}_{r^1d}}{\bar{\gamma}_{r^1d} + \bar{\gamma}_{sd}}\right) x \left\{ Q\left(\sqrt{2\gamma_{th}}\right) - \right. \right. \\
& \exp\left(\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{sr}\right) \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{sr}}{1+\bar{\gamma}_{sr}}} Q\left(\sqrt{2\gamma_{th}\left(1 + \frac{1}{\bar{\gamma}_{sr}}\right)}\right) \left. \left. \right\} + \left\{1 - Q\left(\sqrt{2\gamma_{th}}\right) - \right. \right. \\
& \exp\left(\gamma_{th}/\bar{\gamma}_{sr}\right) \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{sr}}{1+\bar{\gamma}_{sr}}} Q\left(\sqrt{2\gamma_{th}\left(1 + \frac{1}{\bar{\gamma}_{sr}}\right)}\right) \left. \left. \right\} x 0.5 \left\{ M \sum_{k=0}^{M-1} \frac{(-1)^k}{k+1} \binom{M-1}{k} x \left(1 - \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. \frac{\bar{\gamma}_{r^1d}}{k+1} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{r^1d}}{1+\frac{\bar{\gamma}_{r^1d}}{k+1}}} + \frac{\bar{\gamma}_{sd}}{k+1} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{sd}}{1+\bar{\gamma}_{sd}}}\right) \right\} \right] \quad (3.54)
\end{aligned}$$

Optimum eşik değeri ifadesi bit hata olasılığını minimum yapan değerdir ve eşitlik (3.55)'teki yaklaşım ile ifade edilir.

$$\left(\frac{dBHO}{d\gamma_{th}} \Big|_{\gamma_{th} = \gamma_{opt}}\right) = 0 \quad (3.55)$$

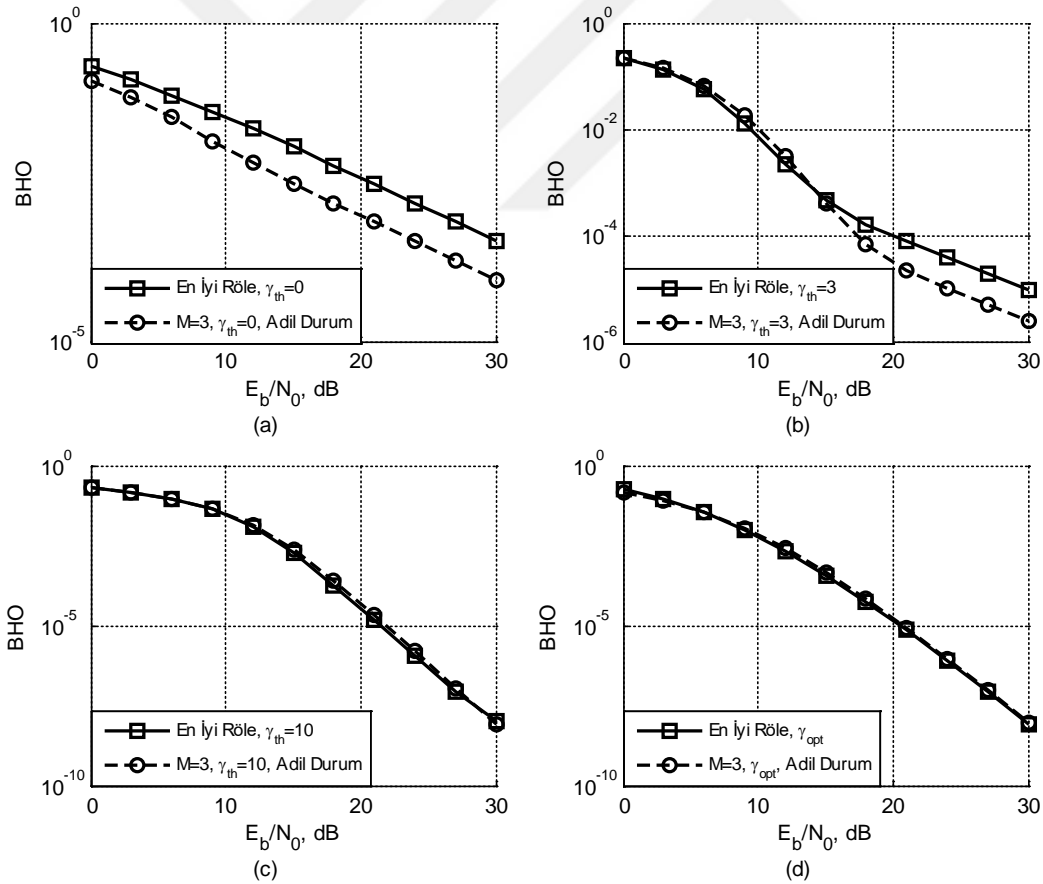
(3.55)'in analitik çözümü zor olduğundan nümerik olarak γ_{opt} değerleri elde edilmiştir. Şekil 3.12'de adil durum koşulunda ortamda üç rölenin bulunduğu ve üç rölenin de aktif olduğu sistem modeli ile en iyi rölenin seçildiği ve bu tek röleden iletişimin sağlandığı sistem modelinin teorik olarak karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Burada $\gamma_{th} = 0, 3, 10, \gamma_{opt}$ değişimine göre sistem performansı incelenmiştir.

Şekil 3.12 (a)'da $\gamma_{th} = 0$ durumu için, kaynaktan alınan verinin en iyi röle ile hedefe gönderilmesi durumunda sistem performansının kötüleştiği görülmektedir. Bunun nedeni, hata yayılımının etkin olduğu bölgede, rölelere ayrılan tüm gücün sadece en iyi röle üzerinde kullanılması ve buna bağlı olarak hata yayılımının sistem üzerinde daha da etkin olmasıdır. Yani en iyi röle seçimli sistemde $\gamma_{th} = 0$ durumu için, alıcıya ulaşan hatalı verilerin İGO değeri daha yüksektir.

Şekil 3.12 (b)'de, $\gamma_{th} = 3$ durumu için hata yayılımının sistem performansına etkisi daha net görülmektedir.

Yaklaşık 15 dB'ye kadar hata yayılımının etkisi az olduğu için, seçilen en iyi röleli sistemin hata performansı daha iyidir. 15 dB'den sonraki E_b/N_0 değerlerinde hata yayılımının etkisinin artmasına bağlı olarak en iyi röle üzerinden alıcıya ulaşan hatalı verilerin İGO değeri daha yüksek olacağından sistem performansı, üç röleli sisteme göre daha kötü sonuç vermektedir.

Şekil 3.12 (c) γ_{th} artışına ve (d)'de γ_{opt} kullanımına bağlı olarak yüksek E_b/N_0 değerlerinde hata yayılımı ortadan kaybolmaktadır. Bu durumda iki senaryo, her ne kadar birbirine yakın sistem performansı veriyor olsa da en iyi röle üzerinden iletim bir miktar daha iyi hata olasılığını sağlamaktadır.

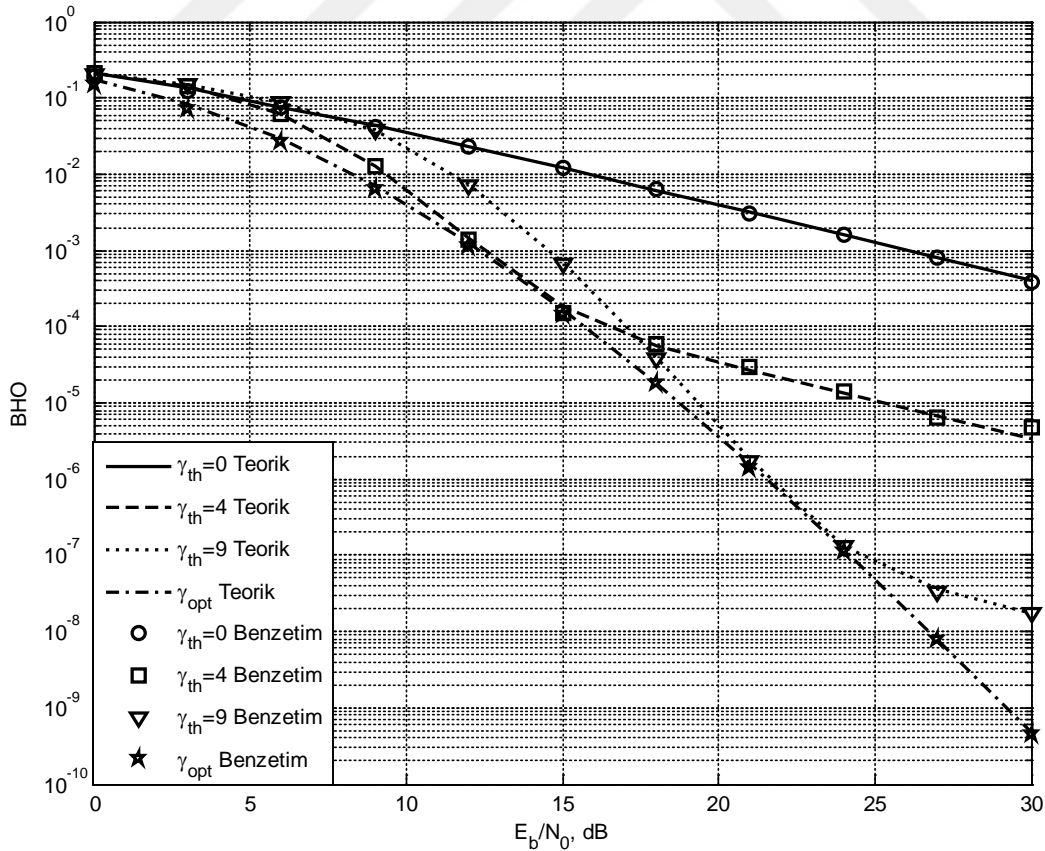


Şekil 3.12 Ortamda üç röle bulunması durumu ile en iyi rölenin seçilmesi durumunda $\gamma_{th} = 0, 3, 10, \gamma_{th}$ değerleri için adil durum sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 3.13'te ortamda dört rölenin bulunduğu ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2 = \sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$ olduğu durumda $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ değerlerine göre sistem performansının değişimi incelenmiştir.

Röle seçimsiz tek röleli sistemde, düşük E_b/N_0 değerlerinde yüksek γ_{th} , yüksek E_b/N_0 değerlerinde düşük γ_{th} kullanmak sistem performansını olumsuz etkilemesi, röle seçimli sistemde de görülmektedir. Düşük E_b/N_0 değerlerinde (yaklaşık 17 dB'ye kadar) $\gamma_{th} = 9$ olması, $\gamma_{th} = 4$ 'ten daha kötü sistem performansı sağlar. Çünkü düşük E_b/N_0 durumda γ_{th} 'ın artışına bağlı olarak, C kümesine röle girme olasılığı azalır.

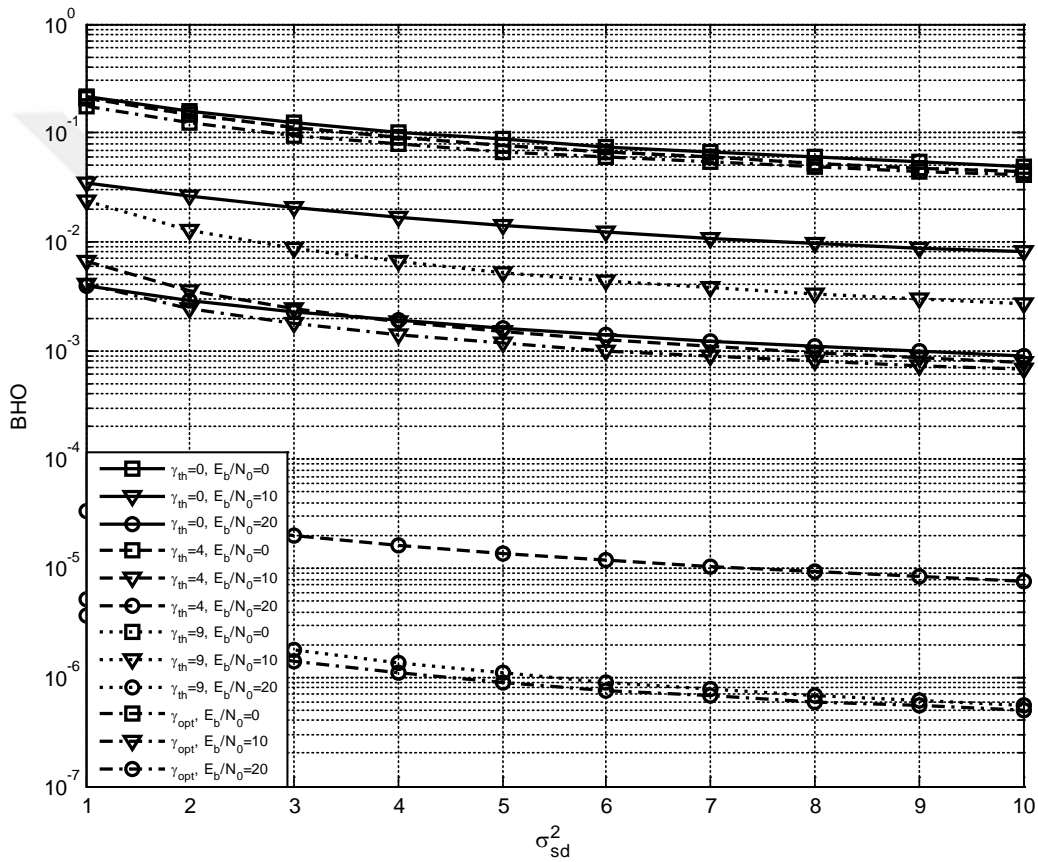
Yaklaşık 17 dB'den sonra ise, düşük γ_{th} değerine bağlı olarak rölenin hata yayılımı olasılığı artacağı için, C kümesine giren rölenin güvenilir röle olma olasılığını azalacaktır, bu nedenle yaklaşık 17 dB'den sonra $\gamma_{th} = 4$ değeri için sistem daha kötü hata performansı göstermektedir. Ek olarak, tüm E_b/N_0 değerlerinde γ_{opt} değerlerinin en iyi sistem performansını sağladığı görülmektedir.



Şekil 3.13 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2 = \sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ değerleri için sonuçlar.

Şekil 3.14, 3.15 ve 3.16'da kaynak-hedef arasındaki yol katsayısı varyansının sistem performansı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Şekil 3.14'te ortamda dört rölenin bulunduğu ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$, σ_{sd}^2 'nin $[1, 10]$ arasında değiştiği röle seçimli sistem modelinde $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ ile $E_b/N_0 = 0, 10, 20$ değerlerindeki hata performansı teorik olarak incelenmiştir. σ_{sd}^2 artışı ile direkt yol kalitesi arttırıldığı için sistemin hata olasılığı azalmaktadır. Tüm E_b/N_0 değerleri için en iyi performansı beklenildiği gibi γ_{opt} vermektedir.

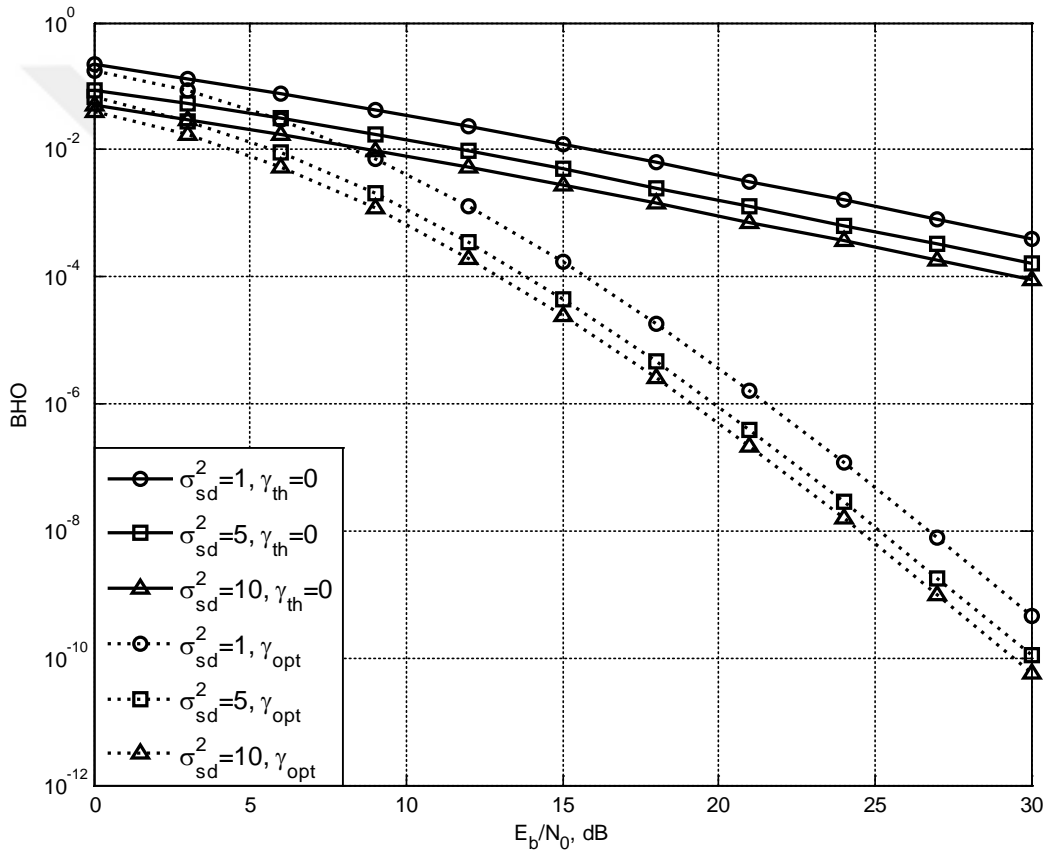


Şekil 3.14 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2 = [1, 10]$, $\sigma_{sr}^2 = 1$, $\sigma_{rd}^2 = 1$ durumlarında $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ ve $E_b/N_0 = 0, 10, 20$ değerleri için sonuçlar.

Şekil 3.15'te ortamda dört rölenin bulunduğu ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$, $\sigma_{sd}^2 = 1, 5, 10$ olduğu durumda $\gamma_{th} = 0, \gamma_{opt}$ değerleri için teorik olarak hata analizi yapılmıştır.

Eğer sistemde hata yayılımı etkin ise ($\gamma_{th} = 0$) σ_{sd}^2 'nin artırılması, çeşitleme kazancı bakımından sistemi etkilememektedir. Sadece γ_{sd} 'nin artışına bağlı olarak, hata yayılımında oluşacak iyileşmeden dolayı sistem performansında iyileşme görülmektedir.

Hata yayılımı ve hata yayılımı olasılığının değişimi Çizelge 3.1'de σ_{sd}^2 'nin artışına göre verilmiştir. Diğer taraftan optimum eşik değerinin kullanılması durumunda sistemde tam çeşitleme kazancı görülmektedir. Ayrıca bu durumda yine σ_{sd}^2 'nin artışına bağlı olarak sistemde hata olasılığı azalmaktadır.

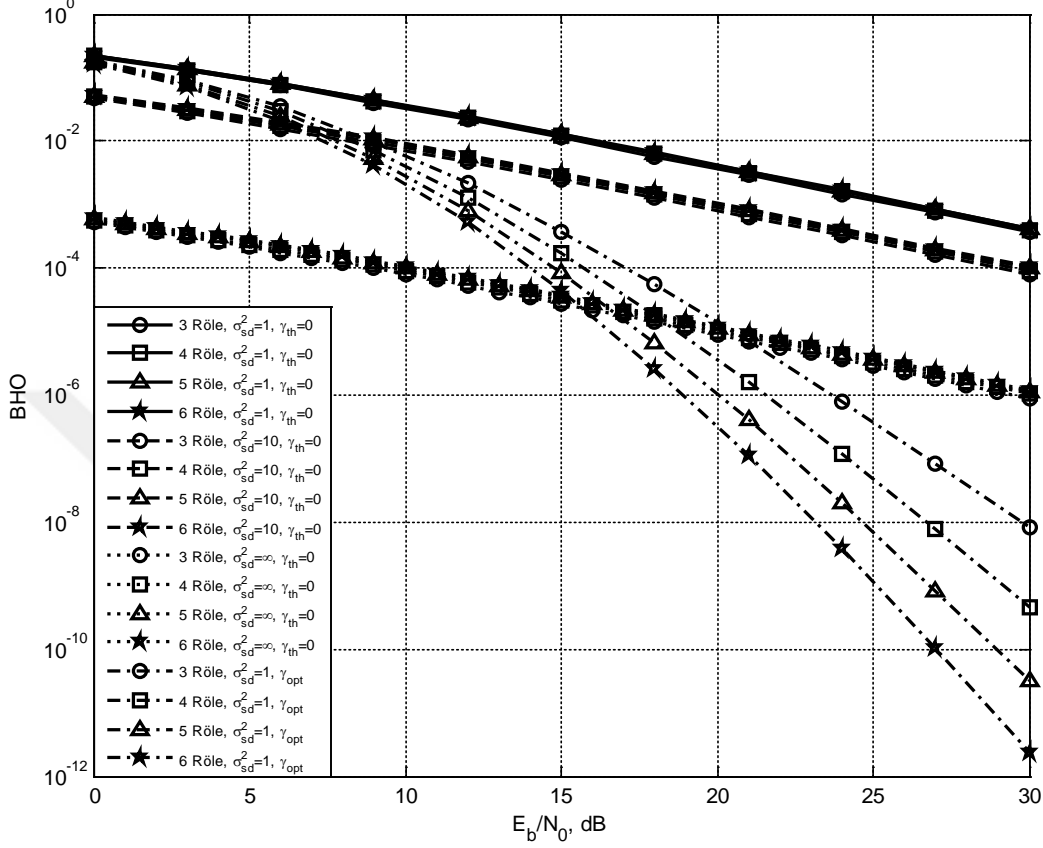


Şekil 3.15 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, 5, 10$, $\sigma_{sr}^2=1, \sigma_{rd}^2=1$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, \gamma_{opt}$ değerleri için sonuçlar.

Şekil 3.16'da hata performansı değişken röle sayısına bağlı olarak incelenmiştir. Burada da yine $\gamma_{th} = 0$ için, çeşitleme kazancı artan röle sayısı ile değişmemektedir.

Genel olarak, hata yayılımının etkin olduğu durumlarda γ_{sd} 'nin artışı ve röle sayısının artırılması çeşitleme kazancı yaratmamaktadır. γ_{opt} kullanılması durumunda, hata

yayılımının sistem üzerindeki etkisi azalmakta ve röle sayısının artmasıyla çeşitleme kazancı gözükmekte ve röle sayısına bağlı olarak hata eğrilerinin eğimi değişmektedir.



Şekil 3.16 Ortamda üç, dört, beş, altı rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, 10, \infty, \sigma_{sr}^2=1, \sigma_{rd}^2=1$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, \gamma_{opt}$ değerleri için sonuçlar.

Çizelge 3.1’de σ_{sd}^2 ’nin artışına bağlı olarak P_{prop} ve P_{SR} ’deki değişim verilmektedir. Kaynak-hedef arasındaki yol katsayısı varyansının artışının hata yayılımını (P_{prop}) azalttığı görülmektedir. Bunun nedeni alıcıda hem en iyi röleden gelen hem de direkt yoldan gelen sinyalin MRC’ye tabi tutulmasıdır. Yani hata yayılımında direkt yol kalitesi etkilidir. Çizelgede rölenin hatalı çözme olasılığının (P_{SR}) da azaldığı görülmektedir.

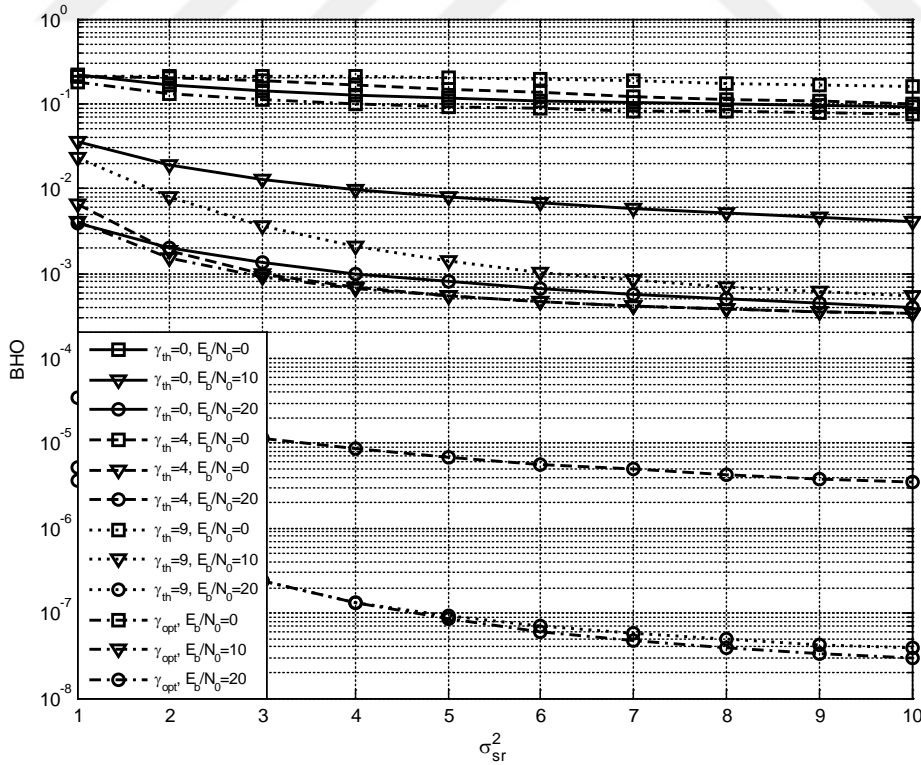
Çünkü P_{SR} olasılığı γ_{opt} ve γ_{sr} ’ye bağlı olarak; γ_{opt} değeri de röle sayısına, $\sigma_{sd}^2 - \sigma_{sr}^2 - \sigma_{rd}^2$ yol katsayılarının varyansına ve E_b/N_0 ’a bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle σ_{sd}^2 ’nin değişmesi γ_{opt} ’u değiştireceğinden P_{SR} hata olasılığı azalmaktadır.

Çizelge 3.1 E_b/N_0 ve σ_{sd}^2 'nin değişimine bağlı olarak P_{prop} ve P_{SR} hata olasılıkları.

E_b/N_0 (dB)		0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$\sigma_{sd}^2=1$	P_{prop}	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	P_{SR}	0.1354	0.0624	0.0209	0.0049	8.1765e-04	1.0153e-04	9.8654e-06	7.8306e-07	5.3037e-08	3.1684e-09	1.7195e-10
$\sigma_{sd}^2=10$	P_{prop}	0.1826	0.1826	0.1826	0.1826	0.1826	0.1826	0.1826	0.1826	0.1826	0.1826	0.1826
	P_{SR}	0.0259	0.0130	0.0045	0.0010	1.6277e-04	1.9091e-05	1.7417e-06	1.3040e-07	8.3523e-09	4.7553e-10	2.4724e-11
$\sigma_{sd}^2 \rightarrow \infty$	P_{prop}	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021
	P_{SR}	2.8625e-04	1.4497e-04	5.8632e-05	1.7290e-05	3.3644e-06	4.3465e-07	4.0228e-08	2.9099e-09	1.7632e-10	9.4341e-12	4.6256e-13

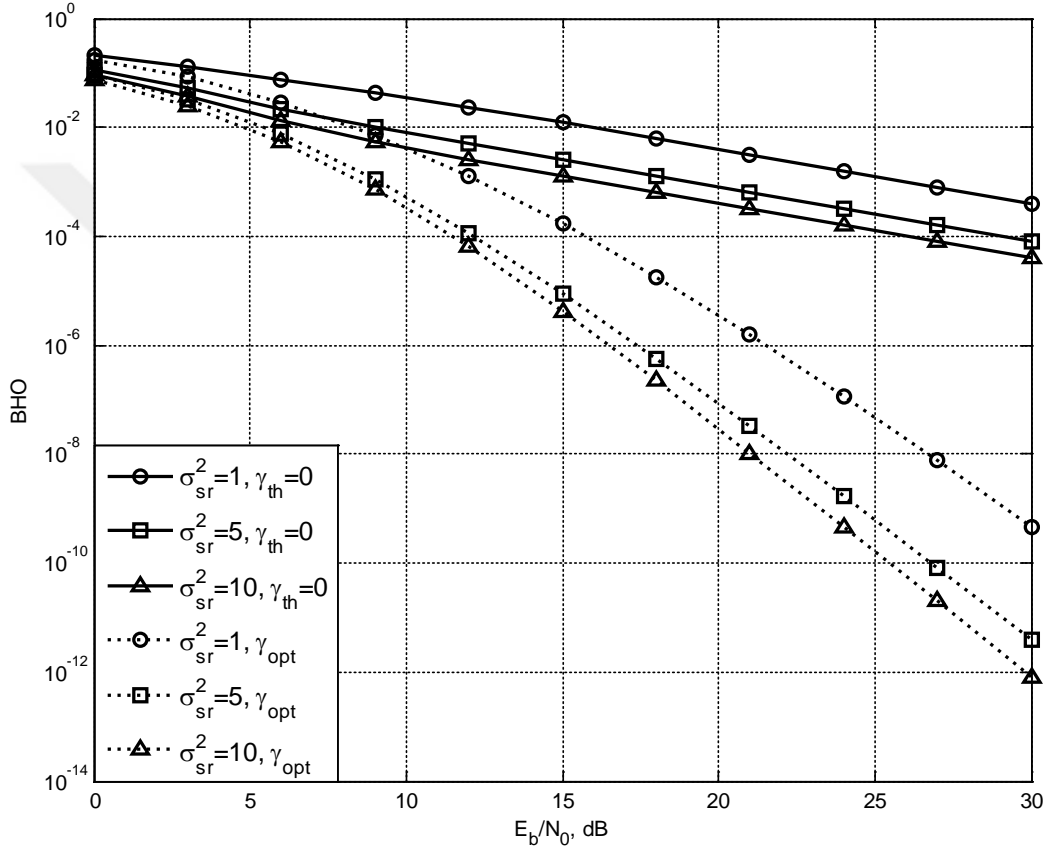
Şekil 3.17, 3.18 ve 3.19'da kaynak-röle arasındaki yol katsayısı varyansının sistem performansı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Şekil 3.17'de ortamda dört rölenin bulunduğu ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$, σ_{sr}^2 'nin $[1, 10]$ arasında değiştiği sistem modelinde $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ ile $E_b/N_0 = 0, 10, 20$ değerlerindeki hata performansı teorik olarak incelenmiştir. σ_{sr}^2 artışı ile kaynak-röle arasındaki yol kalitesi arttırıldığı için C kümesine giren güvenilir röle sayısı artacaktır. Bu nedenle σ_{sr}^2 artışı ile sistemin hata performansın iyileşmesi beklenen bir sonuçtur. Ek olarak tüm E_b/N_0 değerleri için en iyi performansı beklenildiği gibi γ_{opt} vermektedir.



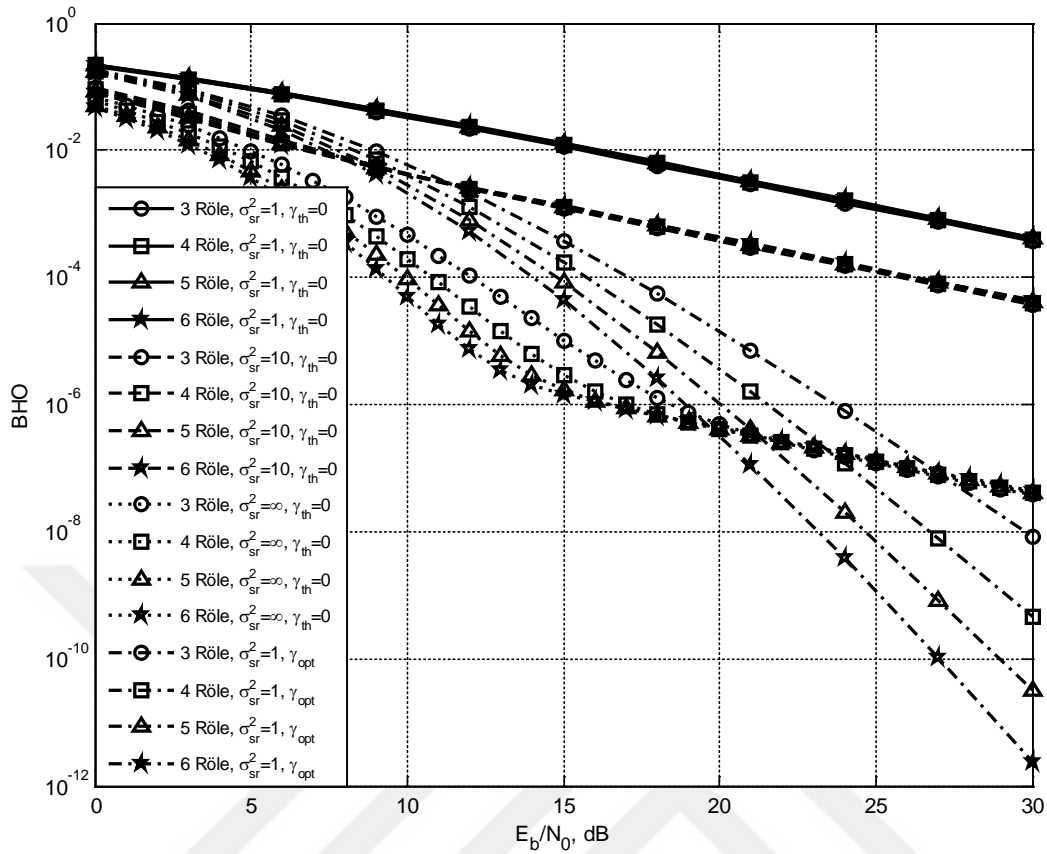
Şekil 3.17 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1$, $\sigma_{sr}^2=[1,10]$, $\sigma_{rd}^2=1$ durumlarında $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ ve $E_b/N_0 = 0, 10, 20$ değerleri için sonuçlar.

Şekil 3.18’de ortamda dört rölenin bulunduğu ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=\sigma_{rd}^2=1$, $\sigma_{sr}^2=1, 5, 10$ olduğu durumda $\gamma_{th} = 0, \gamma_{opt}$ değerleri için teorik olarak hata analizi yapılmıştır. Eğer sistemde hata yayılımı etkin ise ($\gamma_{th} = 0$) σ_{sr}^2 ’nin iyileştirilmesi, çeşitlilik kazancı bakımından sistemi çok etkilememektedir. Fakat kaynak-röle arasındaki link kalitesi artışının, hata performansı bakımından bir miktar iyileşmeye neden olduğu görülmektedir. γ_{opt} ’nin kullanılması durumunda hata yayılımının etkisi azalacağı için çeşitleme derecesi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.18 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, \sigma_{sr}^2=1, 5, 10, \sigma_{rd}^2=1$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, \gamma_{opt}$ değerleri için sonuçlar.

Şekil 3.19’da hata performansı değişken röle sayısına bağlı olarak incelenmiştir. Hata yayılımının olduğu durumlarda ($\gamma_{th} = 0$ ve düşük σ_{sr}^2 değerleri) röle sayısının artması sistem performansında herhangi bir değişikliğe neden olmamaktadır. σ_{sr}^2 değerinin sonsuza yaklaştırılması ile C kümesine giren rölelerin güvenilir röle olma olasılığını artmaktadır ve hata yayılımı olasılığını azalmaktadır. Bu durumda röle sayısının artmasıyla çeşitleme kazancı ve röle sayısına bağlı olarak eğri eğimi değişmektedir. γ_{opt} ’nin kullanılması durumunda ise hata yayılımının etkisi azalacağı için çeşitleme derecesi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.19 Ortamda üç, dört, beş, altı rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1$, $\sigma_{sr}^2=1, 10, \infty$, $\sigma_{rd}^2=1$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, \gamma_{opt}$ değerleri için sonuçlar.

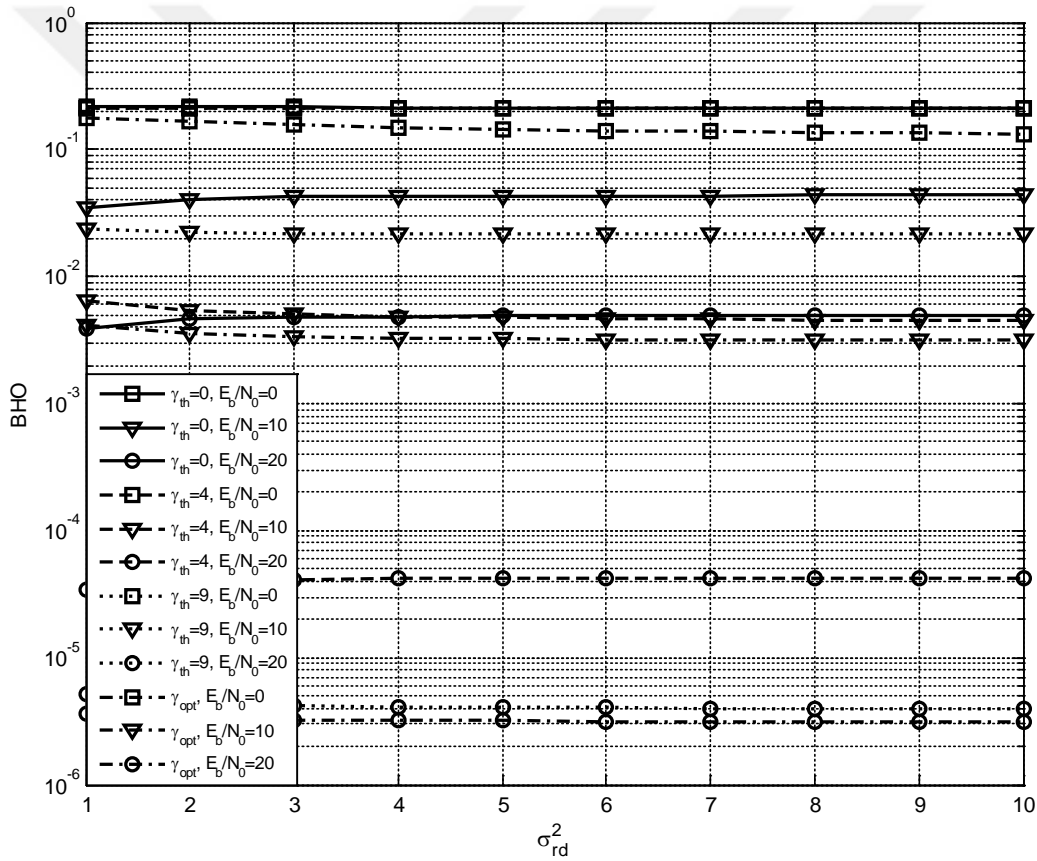
Çizelge 3.2’de σ_{sr}^2 ’nin artışına bağlı olarak P_{prop} ve P_{SR} ’deki değişim verilmektedir. Kaynak-röle arasındaki link kalitesi artışının hata yayılımını (P_{prop}) değiştirmedeği görülmektedir. Hata yayılımı σ_{sr}^2 ‘ye bağlı olmadığı için bu beklenen bir sonuçtur. Buna ek olarak σ_{sr}^2 artışı rölenin hatalı çözme olasılığını (P_{SR}) azaltmaktadır. Çünkü kaynaktan gönderilen veri daha iyi link kalitesine sahip yoldan röleye ulaşmaktadır.

Çizelge 3.2 E_b/N_0 ve σ_{sr}^2 ’nin değişimine bağlı olarak P_{prop} ve P_{SR} hata olasılıkları.

E_b/N_0 , dB	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$\sigma_{sr}^2=1$	P_{prop}	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	P_{SR}	0.1354	0.0624	0.0209	0.0049	8.1765e-04	1.0153e-04	9.8654e-07	7.8306e-07	5.3037e-08	3.1684e-10
$\sigma_{sr}^2=10$	P_{prop}	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	P_{SR}	0.0155	0.0046	9.5400e-04	1.2721e-04	1.1334e-05	7.4109e-07	3.9604e-08	1.8699e-09	8.2106e-11	3.4542e-12
$\sigma_{sr}^2 \rightarrow \infty$	P_{prop}	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	P_{SR}	1.4194e-04	3.9621e-05	7.4264e-06	8.6489e-07	6.4395e-08	3.4032e-09	1.4369e-10	5.3124e-12	1.8270e-13	6.0424e-15

Şekil 3.20, 3.21, 3.22’de röle-hedef arasındaki yol katsayısı varyansının sistem performansı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Şekil 3.20’de ortamda dört rölenin bulunduğu ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=\sigma_{sr}^2=1$, σ_{rd}^2 ’nin $[1, 10]$ arasında değiştiği sistem modelinde $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ ile $E_b/N_0 = 0, 10, 20$ değerlerindeki hata performansı teorik olarak incelenmiştir. σ_{rd}^2 ’nin artırılmasının sistem performansını, hata yayılımını altında bir miktar düşürdüğü görülmektedir. Bu durum beklenen bir sonuçtur. Bunun nedeni; özellikle düşük γ_{th} durumlarında, C kümesine P_{SR} hata olasılığı yüksek rölelerin (güvenilir olmayan röle) girmiş olmasıdır ve seçilen en iyi rölenin hatalı veriyi hedefe göndermesidir.

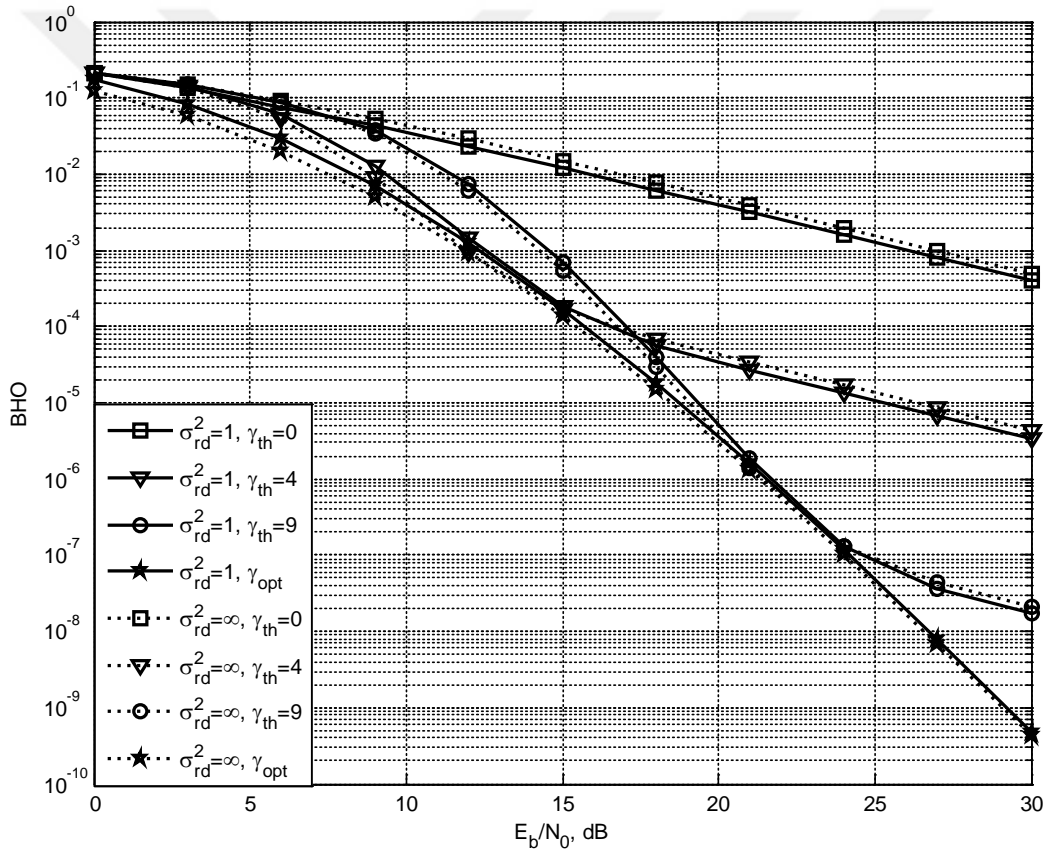


Şekil 3.20 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1$, $\sigma_{sr}^2=1$, $\sigma_{rd}^2=[1, 10]$ durumlarında $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ ve $E_b/N_0 = 0, 10, 20$ değerleri için sonuçlar.

Şekil 3.21’de ortamda dört rölenin bulunduğu ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=\sigma_{sr}^2=1$, $\sigma_{rd}^2=1, \infty$ olduğu sistem modelinde $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ değerlerindeki hata performansı teorik olarak incelenmiştir. Hata yayılımının etkin olduğu olduğu $\gamma_{th} = 0$ için σ_{rd}^2 ’nin artması sistem performansını kötüleştirmektedir.

Bunun nedeni hata yayılımına bağlı olarak rölenin hatalı çözdüğü verilerin, en iyi röle seçiminden kaynaklı hedefe daha da iyileştirilmiş yoldan iletilmesidir. Yani bu durumda alıcıya hatalı verinin İGO değeri yükseltilecek şekilde gönderilir. Bu nedenle Şekil 3.23'te görüldüğü üzere, $\gamma_{th} = 4$ 'te yaklaşık 15 dB'den sonra, $\gamma_{th} = 9$ 'da ise yaklaşık 24 dB'den sonra σ_{rd}^2 'nin artırılmasıyla sistem performansı kötüleşmektedir. Hata yayılımının olmadığı bölgede ise σ_{rd}^2 'nin artması sistem performansını iyileştirir. Çünkü bu durumda hata yayılımının etkisi az olduğu için rölenin doğru çözme olasılığı artar.

Böylece röle-hedef arasındaki link kalitesinin de artışıyla hedefe doğru verinin İGO değeri artırılarak iletilme olasılığı artar.

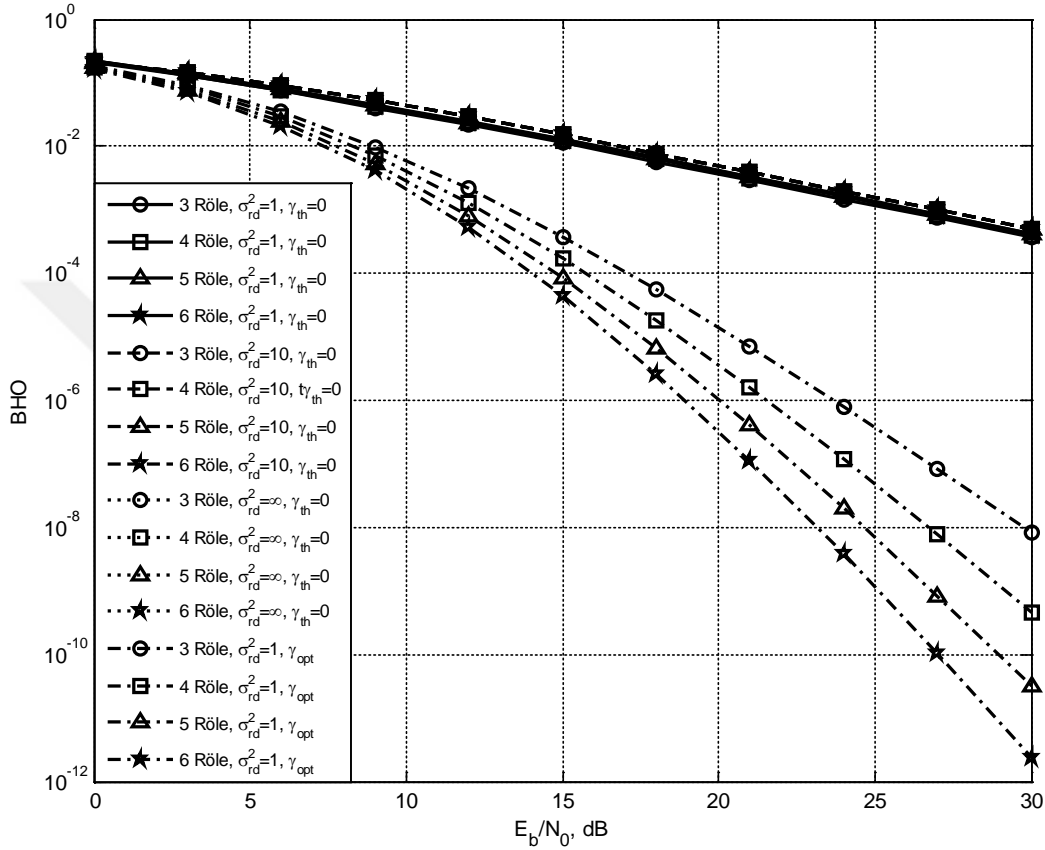


Şekil 3.21 Ortamda dört rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1$, $\sigma_{sr}^2=1$, $\sigma_{rd}^2=1, \infty$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, 4, 9, \gamma_{opt}$ değerleri için sonuçlar.

Şekil 3.22'de hata performansı değişken röle sayısına bağlı olarak incelenmiştir. Hata yayılımının olduğu durumlarda ($\gamma_{th} = 0$) röle sayısının artması sistem performansında herhangi bir değişikliğe neden olmamaktadır. Röle-hedef arasındaki link kalitesinin

arttırılması sistem performansını iyileştirmemekte ayrıca çeşitleme kazancı da sağlamamaktadır.

Hata yayılımının olmadığı (γ_{opt}) durumda röle sayısının artmasıyla çeşitleme kazancı gözükmemekte ve röle sayısına bağlı olarak eğri eğimi değişmektedir.



Şekil 3.22 Ortamda üç, dört, beş, altı rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1$, $\sigma_{sr}^2=1$, $\sigma_{rd}^2=1, 10, \infty$ olması durumlarında $\gamma_{th} = 0, \gamma_{opt}$ değerleri için sonuçlar.

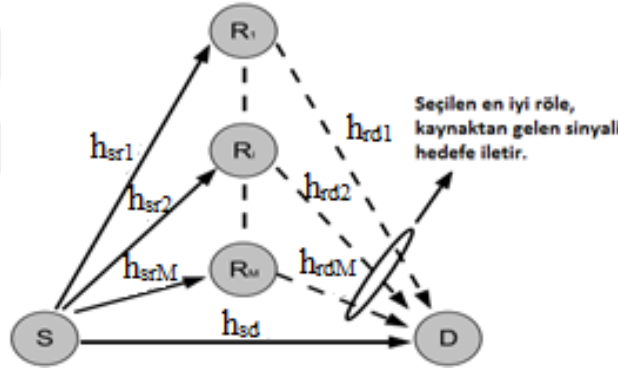
Çizelge 3.3'te σ_{rd}^2 'nin artışına bağlı olarak P_{prop} ve P_{SR} 'deki değişim verilmektedir. Röle-hedef arasındaki link kalitesi artışının hata yayılımını (P_{prop}) arttırdığı görülmektedir. Hata yayılımı σ_{rd}^2 'ye bağlı olduğu için bu beklenen bir sonuçtur. Buna ek olarak σ_{rd}^2 artışı rölenin hatalı çözme olasılığını (P_{SR}) azaltmaktadır. Çünkü P_{SR} olasılığı γ_{opt} ve γ_{sr} 'ye bağlı olarak; γ_{opt} değeri de röle sayısına, $\sigma_{sd}^2 - \sigma_{sr}^2 - \sigma_{rd}^2$ yol katsayıları varyansına ve E_b/N_0 'a bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle σ_{rd}^2 'nin değişmesi γ_{opt} 'u değiştireceğinden P_{SR} hata olasılığı azalmaktadır.

Çizelge 3.3 E_b/N_0 ve σ_{rd}^2 'nin değişimine bağlı olarak P_{prop} ve P_{SR} hata olasılıkları.

E_b/N_0 , dB	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$\sigma_{rd}^2=1$	P_{prop}	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	P_{SR}	0.1354	0.0624	0.0209	0.0049	8.1765e-04	1.0153e-04	9.8654e-06	7.8306e-07	5.3037e-08	3.1684e-09
$\sigma_{rd}^2=10$	P_{prop}	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990
	P_{SR}	0.1222	0.0535	0.0169	0.0038	6.3953e-04	8.0673e-05	8.0217e-06	6.5396e-07	4.5300e-08	2.7629e-09
$\sigma_{rd}^2 \rightarrow \infty$	P_{prop}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	P_{SR}	0.1151	0.0510	0.0163	0.0037	6.2137e-04	7.8689e-05	7.8526e-06	6.4168e-07	4.4596e-08	2.7231e-09

3.4.2.2 Max-Min Yöntemi ile Röle Seçimine Bağlı Hata Olasılığı Hesabı

Şekil 3.23'teki sistem modelinde ortamda R_i ($i=1,2,\dots,M$) adet röle bulunmaktadır. Bu sistemde iletişim iki fazda gerçekleşmektedir. İlk zaman diliminde kaynaktan gönderilen sinyal, doğrudan hedefe ve seçilen en iyi i . röleye iletilmektedir. Hedefte ve seçilmiş en iyi i . rölede alınan sinyaller sırasıyla eşitlik (3.56)'da verilmektedir.



Şekil 3.23 En iyi rölenin seçimine bağlı sistem modeli.

$$y_{sd} = \sqrt{P_s} h_{sd} x + n_{sd} , \quad y_{sr_i} = \sqrt{P_s} h_{sr_i} x + n_{sr_i} \quad (3.56)$$

Burada x vericiden gönderilen sinyali, P_s verici gücünü, n_{sd} ve n_{sr} sırasıyla kaynak-hedef ve röle-hedef arasındaki çift yönlü güç spektral yoğunluğu $N_0/2$ olan toplanır beyaz Gauss gürültüsünü, h_{sd} ve h_{sr_i} sırasıyla kaynak-hedef ve kaynak-seçilmiş en iyi i . röle arasındaki σ_{sd}^2 ve $\sigma_{sr_i}^2$ varyanslı sönmüleme katsayılarını ifade etmektedir.

İkinci zaman diliminde ise seçilmiş en iyi i . röleden hedefe gönderilen işaret (3.57)'de verilmektedir.

$$y_{r_i d} = \sqrt{P_{r_i}} h_{r_i d} x_{r_i} + n_{r_i d} \quad (3.57)$$

Burada x_{r_i} DF protokolü kullanan seçilmiş en iyi i . rölenin kaynaktan gelen sinyali çözüp tekrar modülasyon işlemine tabi tutması sonucunda oluşan sembolü, P_{r_i} seçilmiş en iyi i . rölenin gücünü, $h_{r_i d}$ seçilmiş en iyi i . röle-hedef arasındaki $\sigma_{r_i d}^2$ varyanslı sönümlenme katsayısını, $n_{r_i d}$ çift yönlü güç spektral yoğunluğu $N_0/2$ olan toplanır beyaz Gauss gürültüsünü ifade etmektedir.

Direkt yoldan ve seçilmiş en iyi i . röleden olmak üzere hedefe iki sinyal ulaşmaktadır. Kanalin hedefte bulunduğu varsayımı altında MRC yöntemi kullanılarak hedef çıkışındaki İGO değeri maksimize edilir ve hedefte alınan işaret (3.58)'deki gibi olur.

$$y = a_1 y_{sd} + a_2 y_{r_i d} \quad (3.58)$$

Burada a_1 ve a_2 MRC katsayılarıdır ve (3.59)'da verilmektedir.

$$a_1 = \frac{\sqrt{P_s} h_{sd}^*}{N_0}, \quad a_2 = \frac{\sqrt{P_{r_i}} h_{r_i d}^*}{N_0} \quad (3.59)$$

Max-Min yöntemi ile en iyi rölenin seçilmesi durumundaki uçtan uca hata olasılığı eşitlik (3.60)'daki gibi verilmektedir.

$$P_{e2e} = P_{dec} P_{coop} + (1 - P_{dec}) P_{prop} \quad (3.60)$$

Buradaki P_{coop} , rölenin hata yapmadığı durumdaki işbirlikli iletişimi belirtmektedir ve eşitlik (3.61)'deki gibi verilmektedir.

$$P_{coop} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} M_{Y_{sd}} \left(\frac{1}{\sin^2(\theta)} \right) M_{Y_{max-min}} \left(\frac{1}{\sin^2(\theta)} \right) d\theta \quad (3.61)$$

$M_{Y_{sd}}$ eşitlik (3.16)'da verilmektedir.

Sistemde en iyi röle Max-Min kuralına göre seçildiği için röle-kaynak arasındaki kanal artık Rayleigh sönümlenmeye sahip değildir. Eşitlik (3.61)'de $M_{\gamma_{max-min}}$, Max-Min yöntemine göre seçilen en iyi röleden kaynağa gelen işaretin İGO'su $\gamma_{max-min}$ 'nin MGF fonksiyonudur. γ_{sr_i} ve γ_{r_id} rasgele değişkenleri, ortalamaları sırasıyla $E[\gamma_{sr_i}] = \bar{\gamma}_{sr_i}$ ve $E[\gamma_{r_id}] = \bar{\gamma}_{r_id}$ olan bağımsız iki üstel fonksiyon olmak üzere $\bar{\gamma}_{min} = \min(\bar{\gamma}_{sr_i}, \bar{\gamma}_{r_id})$, $i = 1, \dots, M$ şeklinde yeni bir rasgele değişken tanımlansın. Bu durumda γ_{min} rasgele değişkeninin ortalaması $\bar{\gamma}_{min} = E[\gamma_{min}] = \frac{1}{\frac{1}{\bar{\gamma}_{sr_i}} + \frac{1}{\bar{\gamma}_{r_id}}}$ olur. Eşitlik (3.62)'de γ_{min} rasgele değişkeni için olasılık dağılım fonksiyonu verilmektedir.

$$F_{\gamma_{min}}(\gamma_{min}) = 1 - e^{-\gamma_{min}\left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{sr_i}} + \frac{1}{\bar{\gamma}_{r_id}}\right)} \quad (3.62)$$

Buradan olasılık yoğunluk fonksiyonu (3.63)'teki gibi elde edilir.

$$f_{\gamma_{min}}(\gamma_{min}) = \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{sr_i}} + \frac{1}{\bar{\gamma}_{r_id}}\right) e^{-\gamma_{min}\left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{sr_i}} + \frac{1}{\bar{\gamma}_{r_id}}\right)} \quad (3.63)$$

$\bar{\gamma}_{sr_i} = \bar{\gamma}_{r_id} = \bar{\gamma}$ olduğu durum için $\bar{\gamma}_{min} = \bar{\gamma}/2$ 'dir [35]. Bu durumda OYF eşitlik (3.64)'teki gibi elde edilir.

$$f_{\gamma_{min}}(\gamma_{min}) = \frac{1}{\bar{\gamma}/2} e^{\left(\frac{-\gamma_{min}}{\bar{\gamma}/2}\right)} \quad (3.64)$$

Bu durumda seçilen en iyi i . rölenin İGO'su $\bar{\gamma}_{max-min} = \max(\bar{\gamma}_{i,min})$, $i = 1, \dots, M$ olarak verilir. Tanım 1'de verilen sıra istatistiği yöntemi ve buna bağlı elde edilen (3.47) eşitliği kullanılarak $\gamma_{max-min}$ 'nin OYF eşitlik (3.65)'teki gibi elde edilir.

$$f_{\gamma_{max-min}}(\gamma_{max-min}) = M \frac{1}{\bar{\gamma}/2} x \sum_{k=0}^{M-1} (-1)^k \binom{M-1}{k} \exp\left(\frac{-\gamma_{max-min}(k+1)}{\bar{\gamma}/2}\right) \quad (3.65)$$

Burada M ortamdaki röle sayısını ifade etmektedir. En iyi rölenin MGF'si olarak ifade edilen $M_{Y_{max-min}}$, (3.65)'te verilmiş olan olasılık yoğunluk fonksiyonunun Laplace dönüşümü alınarak (3.66)'daki gibi elde edilmektedir [35].

$$M_{Y_{max-min}}(s) = M \sum_{k=0}^{M-1} (-1)^k \frac{\binom{M-1}{k}}{k+1+\bar{\gamma}_s/2} \quad (3.66)$$

(3.60)'taki P_{prop} ifadesi, seçilen i .rölenin vericiden gönderilen işareti doğru çözemeyip, alıcıya yanlış veri gönderdiği durumda alıcıdaki hata olasılığını belirtmektedir ve aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P_{prop} = \int_0^{\infty} \int_0^{Y_{max-min}} f_{Y_{sd}}(Y_{sd}) f_{Y_{max-min}}(Y_{max-min}) dY_{sd} dY_{max-min} \quad (3.67)$$

P_{prop} , eşitlik (3.67) kullanılarak (3.68)'deki gibi elde edilir.

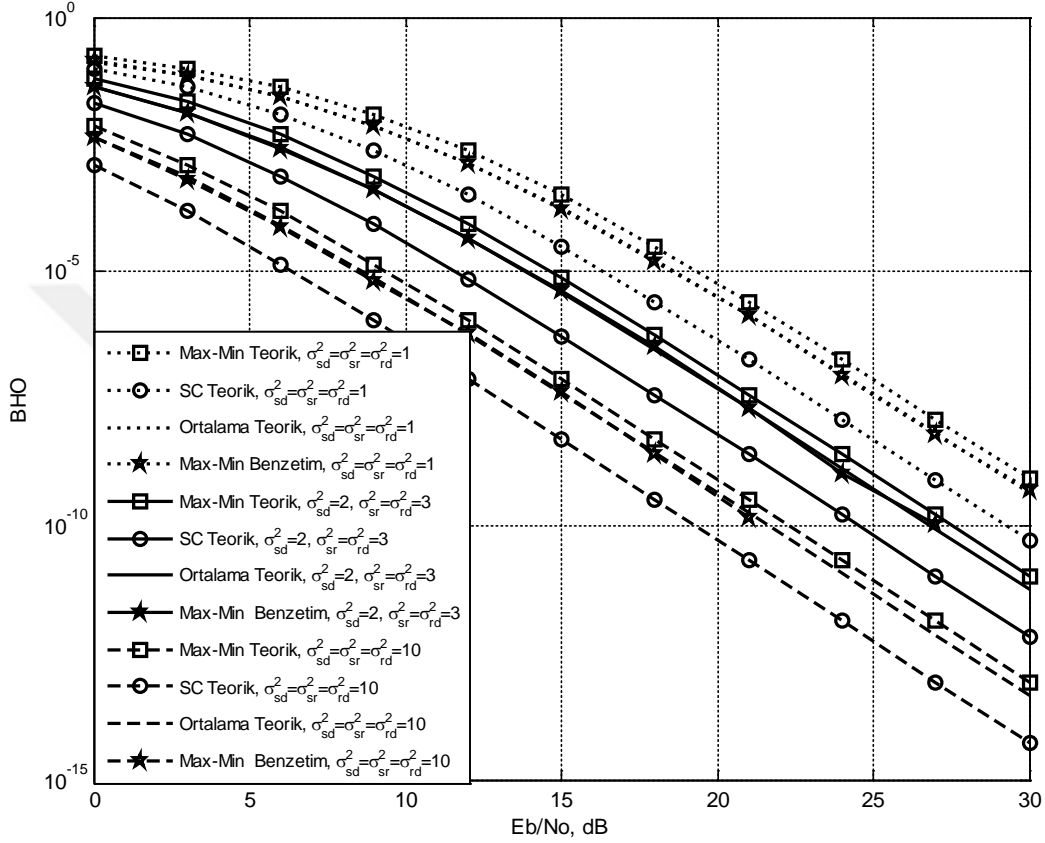
$$P_{prop} = \sum_{k=0}^{M-1} M (-1)^k \binom{M-1}{k} \left(\frac{-2\bar{\gamma}_{sd}}{\bar{\gamma} + 2(k+1)\bar{\gamma}_{sd}} + \frac{1}{k+1} \right) \quad (3.68)$$

Seçilen i .rölenin vericiden gönderilen işareti doğru çözüme olasılığı P_{dec} , $\max \left[\min \left(\bar{\gamma}_{sr_i}, \bar{\gamma}_{r_{id}} \right) \right]$ kuralına göre seçilen en iyi rölenin, kaynaktan gönderilen veriyi hatalı çözüme olasılığını ifade etmektedir. P_{dec} 'in olasılık yoğunluk fonksiyonu, $\max \left[\min \left(\bar{\gamma}_{sr_i}, \bar{\gamma}_{r_{id}} \right) \right]$ seçimine bağlı olarak değiştiği için Rayleigh kanal modeli ile modellenememektedir. Bu nedenle P_{dec} olasılığı için yaklaşık bir ifade elde edilmiştir.

$P_{dec_1} = \max \left[\min \left(\bar{\gamma}_{sr_i}, \bar{\gamma}_{r_{id}} \right) \right]$ ve $P_{dec_2} = \max(\bar{\gamma}_{sr_i})$ olarak düşünüldüğünde yaklaşık $P_{dec} = \frac{P_{dec_1} + P_{dec_2}}{2}$ ifadesi eşitlik (3.69)'daki gibi elde edilir.

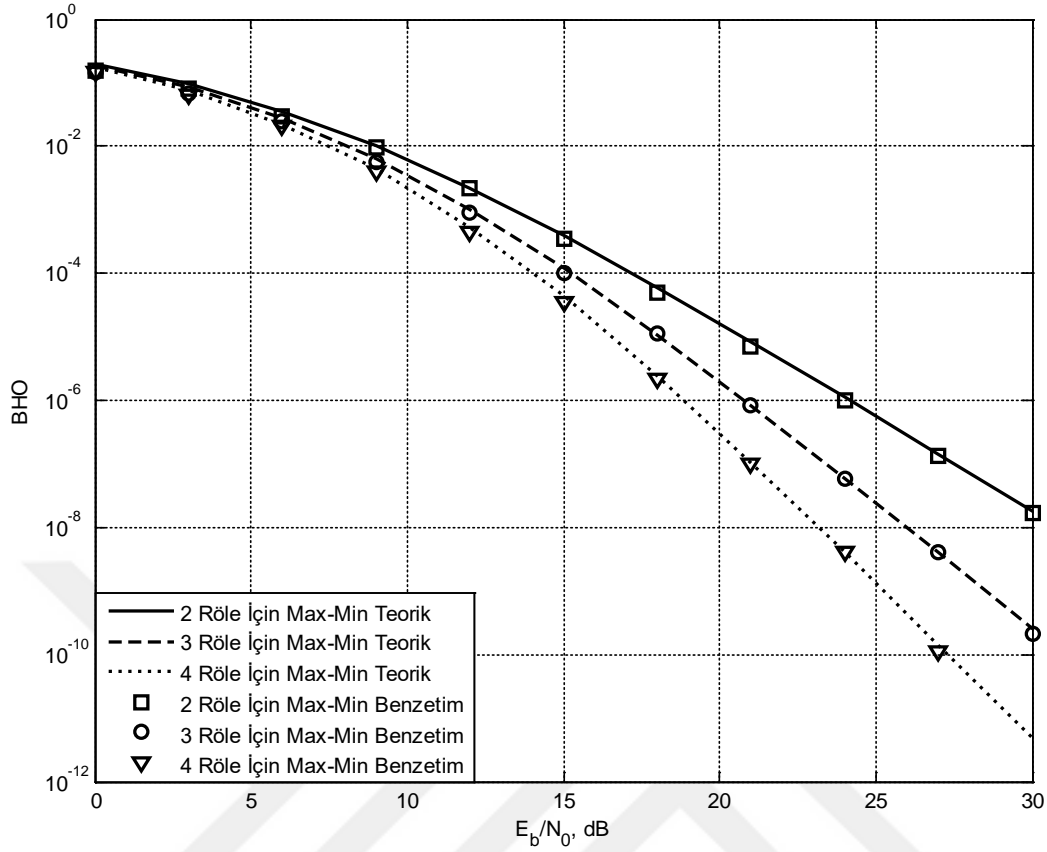
$$P_{dec} = \frac{1}{\pi} M \left[\frac{\left(\int_0^{\pi/2} \frac{1}{k+1 + \frac{\bar{\gamma}}{2 \sin^2(x)}} dx \right) + \left(\int_0^{\pi/2} \frac{1}{k+1 + \frac{\bar{\gamma}_{sd}}{\sin^2(x)}} dx \right)}{2} \right] \quad (3.69)$$

Şekil 3.24'te ortamda dört rölenin bulunduğu ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, 2, 10$, $\sigma_{sr}^2=1, 3, 10$, $\sigma_{rd}^2=1, 3, 10$ olduğu sistem modeli için, düşünülen yaklaşık $P_{SR_{Max-Min}}$ hata olasılığı teorik olarak ve kaynaktan röleye gelen sinyalin röle de çözüldükten sonraki hata olasılığı benzetim olarak çizdirilerek incelenmiştir. Elde edilen benzetim sonucu ile yaklaşık teorik sonucun tam olarak çakıştığı görülmektedir.



Şekil 3.24 Ortamda dört röle bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2=1, 2, 10$, $\sigma_{sr}^2=1, 3, 10$, $\sigma_{rd}^2=1, 3, 10$ olması durumunda Max-Min, SC ve ortalamalarının karşılaştırılması.

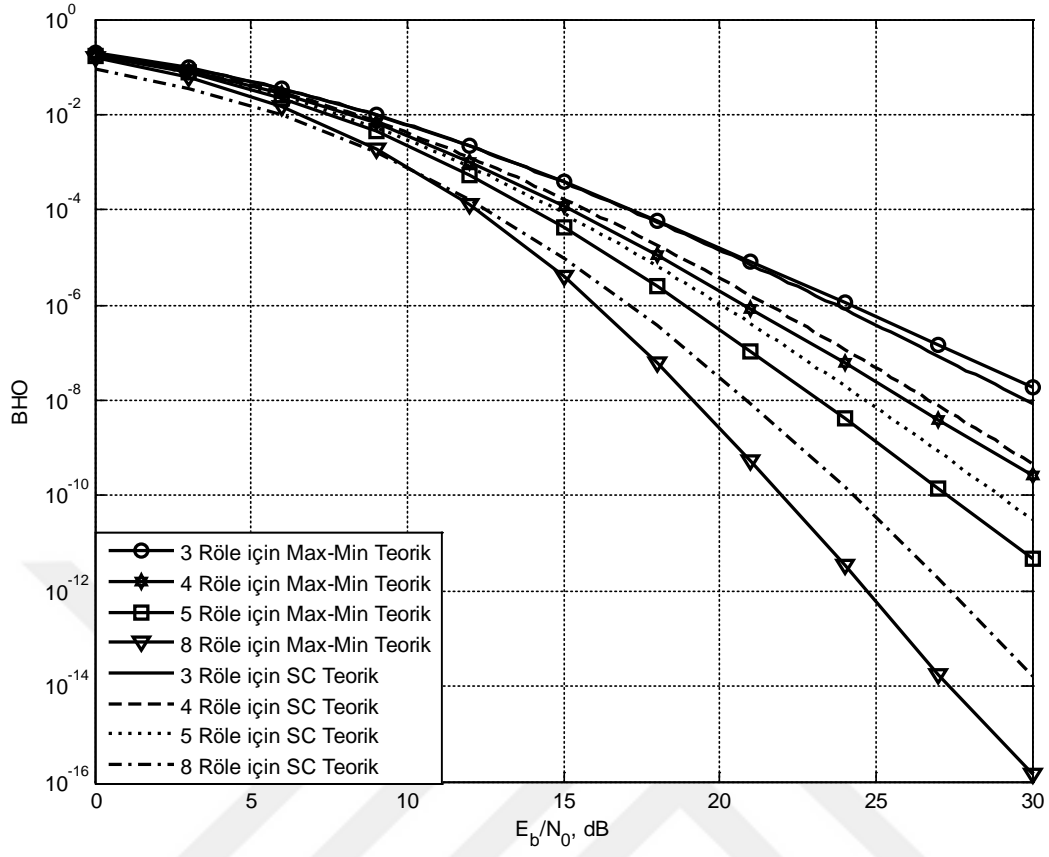
Şekil 3.25'te ortamda iki, üç, dört röle olması durumunda Max-Min röle seçim tekniğinin teorik olarak hata analizi yapılmıştır. Röle sayısı artışının sistem performansını iyileştirdiği, aynı zamanda röle sayısının artışına bağlı olarak çeşitleme derecelerinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 3.25 Ortamda iki, üç, dört röle olması durumunda Max-Min röle seçim tekniği teorik-benzetim sonuçları.

Şekil 3.26'da ortamda üç, dört, beş, sekiz rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2 = \sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$ olması durumunda, Max-Min ve SC yöntemlerinin teorik olarak sistem performansına etkileri karşılaştırılmıştır. Röle sayısının az olduğu durumda SC röle seçim tekniği daha iyi sistem performansı verirken, röle sayısı arttıkça Max-Min röle seçim tekniği hata performansını iyileştirmektedir.

Bunun nedeni SC röle seçim tekniğinin kullanıldığı bir sistemde hata yayılımına bağlı olarak, çeşitleme derecesi tam olarak $M+1$ değil $[M, M+1]$ arasında elde edilmesidir. Buna karşılık Max-Min röle seçim tekniğinin kullanıldığı sistem modelinde tam olarak $M+1$ çeşitleme derecesi elde edilir. Bu yüzden yüksek röle sayılarında çeşitleme derecelerinden dolayı Max-Min röle seçim tekniği öne geçmektedir.



Şekil 3.26 Ortamda üç, dört, beş, sekiz rölenin bulunması ve yol katsayıları varyansının $\sigma_{sd}^2 = \sigma_{sr}^2 = \sigma_{rd}^2 = 1$ olması durumunda Max-Min ve SC yönteminin karşılaştırılması.



BÖLÜM 4

SONUÇLAR

Bu çalışmada, röle seçimli işbirlikli haberleşme sistemlerinin hata yayılımı altında analizleri hem teorik hem de benzetim olarak yapılmıştır. İlk olarak DF protokolünü kullanan tek röleli sistem modeli için, uçtan uca hata olasılığı ifadesi çıkartılarak teorik ve benzetim sonuçları ile analiz edilmiştir. DF rölede kullanılan eşik İGO değeri (γ_{th}) sistemin hata performansı üzerinde etkili olup, doğru belirlenememesi durumunda rölede hataya sebep olmaktadır. Bu hata hedefe aktarılmakta ve dolayısıyla uçtan uca hata olasılığı artmaktadır. Rölede, γ_{th} 'a bağlı yapılan ve hedefe de ulaşan bu hata “Hata Yayılımı” olarak adlandırılmaktadır. Teorik ve benzetim sonuçlarından, düşük E_b/N_0 değerlerinde yüksek γ_{th} , yüksek E_b/N_0 değerlerinde düşük γ_{th} kullanımının sistem performansını olumsuz etkilediği, bu nedenle eşik γ_{th} değerlerinin E_b/N_0 değerlerine, uçtan uca sistem hata olasılığını minimum yapacak şekilde, göre ayrı ayrı seçilmesi gerektiği görülmüştür. Bu γ_{th} değeri optimum eşik değeri olarak adlandırılmaktadır. Tek röleli sistem için optimum eşik değeri hem teorik hem de nümerik olarak bulunmuş ve analiz edilmiştir.

İkinci olarak, çok röleli sistem yapısı için uçtan uca hata olasılığı ifadesi, ortamda üç röle bulunması ve hepsinin aktif olması durumuna göre özelleştirilmiştir. Bu sistem modeli için uçtan uca sistem hata performansı ve hata yayılımı olasılık ifadeleri türetilmiştir. Çok röleli sistemde, optimum eşik değerinin teorik olarak elde edilmesi karmaşık olduğu için nümerik optimum eşik değeri kullanılmıştır. Üç röleli sistem modeli için; adil güç kullanımı ve adil olmayan güç kullanımı durumlarında farklı eşik değerleri için analizler yapılmıştır.

Son olarak ortamda M adet rölenin bulunduğu ve bu röleler içerisinde en iyi link kalitesine sahip tek rölenin seçildiği sistem modelleri incelenmiştir. Röle seçim kuralları için SC ve Max-Min yöntemleri kullanılmıştır. SC röle seçim tekniğine göre BHO ifadeleri türetilmiştir. En iyi rölenin seçildiği sistem ile üç rölenin de kullanıldığı sistem modelleri karşılaştırılmıştır.

SC ve Max-Min röle seçim kurallarına göre link kalitesinin, eşik değerlerinin ve röle sayısı değişiminin sistem performansına etkisi analiz edilmiştir.

SC röle seçimli sistemde düşük eşik değerleri için yüksek E_b/N_0 bölgelerinde hata yayılımının etkin olduğu, düşük E_b/N_0 bölgelerinde ise yüksek eşik değerlerinde röle seçimi yapılan C kümesine güvenilir rölelerin girme olasılıklarının azaldığı, bundan dolayı her iki durum için sistem performansının kötüleştiği, çeşitleme derecesinin kaybolduğu görülmüştür. Hata yayılımının sistem üzerinde etkili olduğu durumlarda yol katsayıları varyansının kalitelerinin ve röle sayısının artışı çeşitleme kazancı sağlamamaktadır. Optimum eşik değerinin kullanılması durumunda ise sistem performansının iyileştiği ve sistemde tam çeşitleme sağlandığı gösterilmiştir.

Son olarak Max-Min röle seçimli sistem için kaynak-röle arasında meydana gelen hata olasılığı yaklaşık olarak bulunmuş ve uçtan uca hata olasılığı ifadesi türetilmiştir. Max-Min röle seçimli sistemin SC röle seçimli sistemden daha iyi sistem performansı sağladığı görülmüştür.

Çok röleli sistemde Seçme İşbirliği yönteminin kullanılması durumunda elde edilen hata olasılığından faydalanılarak optimum eşik değeri için teorik ifade çıkartımı; rölelerin ortamda rasgele dağıldığı sistem modelinde en iyi rölenin seçilmesi ve hata yayılımı altında uçtan uca hata olasılığı ifadesinin türetilmesi; bu çalışmada incelenen iki atlamalı sistem modeli geliştirilerek, çok atlamalı sistem modelinde hata yayılımının etkisinin incelenmesi gelecek çalışmalar olarak verilebilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Laneman J N and Wornell G W, David N C** (2001) An Efficient Protocol for Realizing Cooperative Diversity in Wireless Networks. *IEEE International Symposium on Information Theory*, 294.
- [2] **Sendonaris A, Erkip E and Aazhang B** (2003) User Cooperation Diversity-Part II: Implementation Aspects and Performance Analysis. *IEEE Trans. Commun.*, 51 (11): 1939-1948.
- [3] **Nosratinia A and Hunter T E** (2006) Diversity Through Coded Cooperation. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 5: 283-289.
- [4] **Bletsas A, Khisti A, Reed D P and Lippman A** (2006) A Simple Cooperative Diversity Method Based on Network Path Selection. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 24: 659-672.
- [5] **Adinoyi A, Fan Y, Yanikomeroglu H, Poor H V and Al-Shaalán F** (2009) Performance of Selection Relaying and Cooperative Diversity. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 8: 5790-5794.
- [6] **Alexandropoulos G C, Papadogiannis A and Berberidis K** (2010) Performance Analysis of Cooperative Networks with Relay Selection over Nakagami-m Fading Channels. *IEEE Signal Process. Lett.*, 17: 441-444.
- [7] **Beres E and Adve R** (2008) Selection Cooperation in Multi-Source Cooperative Networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 7: 118-127.
- [8] **Ibrahim A S, Sadek A K, Su W and Liu K J R** (2006) Relay Selection in Multi-Node Cooperative Communications: When to cooperate and whom to cooperate with? *IEEE GLOBECOM*.
- [9] **Laneman J N, David N C and Wornell G W** (2004) Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 50 (12): 3062-3080.
- [10] **Ikki S and Ahmed M H** (2010b) On the Performance of the Cooperative Diversity Networks with the Nth Best-Relay Selection Scheme. *IEEE Trans. On Commun.*, 58 (11): 3062-3069.
- [11] **Su W, Sadek A K and Liu K J R** (2005) SER Performance Analysis and Optimum Power Allocation for Decode and Forward Cooperation Protocol in Wireless Networks. *IEEE WCNC.*, 984-989.

KANAKLAR (devam ediyor)

- [12] **Su W, Sadek A K and Liu K J R** (2008) Cooperative Communication Protocols in Wireless Networks: Performance Analysis and Optimum Power Allocation. *Wireless Personal Communications*, 44: 181-217.
- [13] **Kim Y G and Beaulieu N C** (2011) Exact Closed-Form Solutions for the BEP of Decode and Forward Cooperative Systems in Nakagami-m Fading Channels. *IEEE Trans. Commun.*, 59 (9): 2355-2361.
- [14] **Lee Y and Tsai M H** (2009) Performance of Decode and Forward Cooperative Communications over Nakagami-m Fading Channels. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 58 (3): 1218-1228.
- [15] **Lee Y, Tsai M H and Sou S I** (2009) Performance of Decode and Forward Cooperative Communications with Multiple Dual-Hop Relays over Nakagami-m Fading Channels. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 8 (6): 2853-2859.
- [16] **Duong T Q, Bao V N Q and Zepernick H-J** (2009) Performance of Selection Decode and Forward Relay Networks over Nakagami-m Fading Channels. *IEEE Commun. Lett.*, 13 (3): 172-174.
- [17] **Ikki S and Ahmed M H** (2009b) On The Performance of Adaptive Decode and Forward Cooperative Diversity with the Nth Best-Relay Selection Scheme. *IEEE Global Telecommunications Conference*, USA, 1-6.
- [18] **Ikki S and Ahmed M H** (2009a) Performance Analysis of Generalized Selection Combining for Amplify and Forward Cooperative Diversity Networks. *IEEE Int. Conf. On Commun.*, USA, 3621-3626.
- [19] **Ikki S ve Ahmed M H** (2010a) Performance Analysis of Generalized Selection Combining for Decode and Forward Cooperative Diversity Networks. *VTC Fall*, Canada, 1-5.
- [20] **Onat F A, Adinoyi A, Fan Y, Yanikomeroglu H, Thompson J S and Marsland I D** (2008) Threshold Selection for SNR-Based Selective Digital Relaying in Cooperative Wireless Networks. *IEEE Trans. On Wirel. Commun.* 7 (11): 4226-4237.
- [21] **Ikki S and Ahmed M H** (2007) Performance of Decode and Forward Cooperative Diversity Networks over Nakagami-m Fading Channels. *IEEE Global Telecommunications Conference*.
- [22] **Onat F A, Fan A, Yanikomeroglu H and Poor H V** (2008) Threshold Based Relay Selection in Cooperative Wireless Networks. *GLOBECOM-IEEE Global Telecommunications Conference*, 1-5.
- [23] **Michalopoulos D and Karagiannidis G** (2008) Performance Analysis of Single Relay Selection in Rayleigh Fading. *IEEE Trans. On Wirel. Commun.*, 7 (10): 3718-3724.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [24] **Rappaport T** (2001) *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2th edition, ISBN: 978-0130422323, Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA.
- [25] **Proakis John G** (2002) *Fundamentals of Communication Systems*. 1th edition, ISBN: 978-0131471351, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey.
- [26] **Simon K Marvin and Alouini Slim Mohamed** (2005) *Digital Communication over Fading Channels*. ISBN: 0-471-20069-7, A Wiley-Interscience Publication, USA.
- [27] **Proakis John G and Salehi Masoud** (2008) *Digital Communications*. 5th edition, ISBN: 978-0-07-295716-7, McGraw Hill. Pres.
- [28] **Goldsmith A** (2005) *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
- [29] **Su Weifeng, Sadek Ahmed K, Liu K and Ray J** (2008) Cooperative Communication Protocols in Wireless Networks: Performance Analysis and Optimum Power Allocation. *Wireless Pers. Commun.* 44: 181-217.
- [30] **Oturak A, Kaya H ve Öztürk E** (2011) Alamouti Uzay-Zaman Kodlu ve Kuvvetlendir-Aktar Röleli Çeşitlemelerin OFDM İşaretleri için Başarım Karşılaştırması. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, Araştırma Makalesi, 47-54.
- [31] **Proakis John G and Salehi M** (1994) *Communications Systems Engineering*. ISBN: 978-0130617934, Prentice Hall, New York.
- [32] **Kulaç S** (2012) Kablosuz İletişimde İşbirlikçi Çeşitleme Yöntemlerinin Araştırılması. *Doktora Tezi*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği, Ankara.
- [33] **Herhold P, Zimmermann E and Fettweis G** (2004) A Simple Cooperative Extension to Wireless Relaying. *International Zurich Seminar*.
- [34] **Papoulis A and Pillai S U** (2002) *Random Variables and Stochastic Process*. 4th edition, ISBN: 0-07-048477-5, McGraw Hill, USA.
- [35] **Ikki S and Ahmed M H** (2009) On the Performance of Amplify-and-Forward Cooperative Diversity with the Nth Best-Relay Selection Scheme. *IEEE International Conference*.



ÖZGEÇMİŞ

Ezgi ŞANLI 1993’de Zonguldak’ta doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Kozlu Anadolu Lisesi’nden mezun olduktan sonra 2011 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümüne girdi ve 2015 yılında mezun oldu. 2015 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

ADRES BİLGİLERİ:

Adres : Meşrutiyet Mahallesi, Yağcılar Caddesi, Kuzey Apartmanı, B-Blok, Kat:5, Daire:
17 Merkez/Zonguldak
Tel : (+90) 541 619 33 34
E-posta : ezgisanli93@gmail.com