



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**ÇOK KULLANICILI İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ
AĞLARDA FIRSATÇI EŞ-KAYNAK SEÇİM METODU**

Volkan ÖZDURAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Bekir Sıddık Binboğa YARMAN

II. Danışman


Prof. Dr. John M. CIOFFI

Şubat, 2015

İSTANBUL

Bu çalışma 23/02/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik-Elektronik Mühendisliği programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi:


Prof. Dr. Bekir Sıddık Binboğa YARMAN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Aydın AKAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Hakan Ali ÇIRPAN
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi


Prof. Dr. Murat UYSAL
Özyeğin Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Ahmet AKSEN
Işık Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 21561 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Eğitim hayatımın çok önemli bir sürecinde birlikte çalışma fırsatı bulduğum, bilime ve bilimsel araştırmacıya sınırsız destek veren Prof. Dr. Bekir Sıddık Binboğa YARMAN gibi büyük bir isimle çalışmalarımı yapmamın sorumluluğu, çalışmalarımı her daim bir basamak yukarı taşımam için gerekli azim, kararlılık ve motivasyonu bulmamı sağlamıştır.

Stanford Üniversitesi, Stanford, Kaliforniya, A.B.D. Elektrik Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. John M. CIOFFI, “*The Father of DSL*”, Doktora çalışmalarımı yapmam için kendi yönetimindeki Dynamic Spectrum Management (DSM) araştırma grubuna kabul etmesinden dolayı kendisine samimi teşekkürlerimi sunarım. DSM araştırma grubu üyelerinden Dr. Jung-Bin Kim, Dr. Yong Guo, Dr. Borja Peleato ve Dr. Aankasha Chowdhery’nin grup toplantılarında çalışmalara ilişkin yaptıkları değerli katkı ve değerlendirmeler çalışmalarımı çok önemli bir noktaya taşımıştır.

Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü (California Institute of Technology-CALTECH), Pasadena, Kaliforniya, A.B.D. Elektrik Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. Babak HASSIBI’ye Doktora çalışmalarımı yapmam için kendi yönetimindeki araştırma grubuna dahil ettiği için ve araştırma grubu üyelerine içten teşekkürlerimi sunarım.

Princeton Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. H. Vincent POOR’a Doktora çalışmalarımı yapmam için kendi yönetimindeki araştırma grubuna dahil ettiği için ve araştırma grubu üyelerine içten teşekkürlerimi sunarım.

Sayın, Güneş Cömert’e bu süreçte verdiği destekten dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca Doktora öğrenimime ve çalışmalarımaya destek sağlayan İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne verdikleri katkıdan dolayı teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hep yanımda bulduğum sahip olmaktan büyük mutluluk ve onur duyduğum sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

şubat, 2015

VOLKAN ÖZDURAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	5
2.1. TEK YÖNLÜ RÖLE İLE VERİ ALIŞVERİŞİ İŞLEMİ.....	5
2.2. İKİ YÖNLÜ RÖLE İLE VERİ ALIŞVERİŞİ İŞLEMİ	6
2.3. HÜZMELEME YÖNTEMİ	11
2.4. SIFIRA-ZORLAMA YÖNTEMİ	12
2.5. KİRLİ KAĞIT KODLAMA YÖNTEMİ	13
2.6. DİKEY İLETİM YÖNTEMLERİ.....	13
2.6.1. Zaman Bölmeli Çoklu Erişim	13
2.6.2. Frekans Bölmeli Çoklu Erişim	14
2.6.3. Kod Bölmeli Çoklu Erişim	14
2.6.4. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama.....	14
2.6.5. Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim	14
3. MALZEME VE YÖNTEM	17
3.1. ÇOK KULLANICILI İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ HABER- LEŞME MODELİ	17
3.1.1. Aynı Anda İletim Modeli.....	18
3.1.2. Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu.....	21
3.1.3. Performans Analizi	23

3.1.3.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı	23
3.1.3.2. Hata Olasılığı	27
3.1.3.3. Başarılabilir Kapasite	29
3.1.3.4. Kapasite Analizi	31
3.1.3.5. Asimptotik Analiz	33
3.1.3.6. Çeşitlilik Ölçütü Analizi	35
3.1.3.7. Optimizasyon	36
3.2. ÇOK KULLANICILI KABLOSUZ İKİ YÖNLÜ RÖLELİ AĞLARDA KANAL DURUM BİLGİSİNİN MÜKEMMEL OLMAMASI	39
3.2.1. Kanal Durum Bilgisinin Mükemmel Olmaması	39
3.2.1.1. Geri Bildirim Gecikmesi	39
3.2.1.2. Kanal Kestirim Hatası	40
3.2.2. Aynı Anda İletim Modeli	42
3.2.2.1. Geri Bildirim Gecikmesi	42
3.2.2.2. Kanal Kestirim Hatası	45
3.2.3. Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu	47
3.2.3.1. Geri Bildirim Gecikmesi	48
3.2.3.2. Kanal Kestirim Hatası	49
3.2.4. Performans Analizi	50
3.2.4.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı	50
3.2.4.2. Asimptotik Analiz	56
3.2.4.3. Çeşitlilik Ölçütü Analizi	58
3.2.4.4. Optimizasyon	59
3.3. DIŞ KAYNAKLI EŞ-KANAL ETKİLEŞİMLERİN ÇOK KULLANICILI KABLOSUZ İKİ YÖNLÜ RÖLELİ MODELE ETKİLERİ	64
3.3.1. Aynı Anda İletim Modeli	65
3.3.2. Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu	69
3.3.3. Performans Analizi	71
3.3.3.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı	71
3.3.3.2. Asimptotik Analiz	75
3.3.3.3. Çeşitlilik Ölçütü Analizi	76

3.4. ÇOK KULLANICILI VE ÇOKLU İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ HABERLEŞME MODELİ	78
3.4.1. Aynı Anda İletim Modeli	78
3.4.2. Fırsatçı Ortak Eş-Kaynak ve Röle Seçim Metodu	80
3.4.3. Performans Analizi	82
3.4.3.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı	82
3.4.3.2. Hata Olasılığı	84
3.4.3.3. Asimptotik Analiz	86
3.4.3.4. Kapasite Analizi	87
3.4.3.5. Başarılabilir Kapasite	89
3.4.3.6. Çeşitlilik Ölçütü Analizi	89
3.4.3.7. Optimizasyon	90
4. BULGULAR	92
4.1. ÇOK KULLANICILI İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ HABERLEŞME MODELİNDE PERFORMANS ANALİZİ	92
4.1.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı	93
4.1.2. Hata Olasılığı	95
4.1.3. Başarılabilir Kapasite	97
4.1.4. Kapasite Analizi	99
4.2. KANAL DURUM BİLGİSİNİN MÜKEMMEL OLMADIĞI DURUMDA ÇOK KULLANICILI İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ MODELİNDE PERFORMANS ANALİZİ	101
4.2.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı	101
4.2.1.1. Geri Bildirim Gecikmesi	101
4.2.1.2. Kanal Kestirim Hatası	103
4.3. DIŞ KAYNAKLI EŞ-KANAL ETKİLEŞİMLERİN ÇOK KULLANICILI İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ MODELİ ÜZERİNE ETKİLERİ	106
4.3.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı	106
4.4. ÇOK KULLANICILI VE ÇOKLU İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ HABERLEŞME MODELİNDE PERFORMANS ANALİZİ	107
4.4.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı	107
4.4.2. Hata Olasılığı	110
4.4.3. Başarılabilir Kapasite	110

4.4.4. Kapasite Analizi	111
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	114
EKLER	125
A. EK-1.	125
A.1. AAİ Modelinde $F_{\gamma_{X_k^{ust}}}$ ve $F_{\gamma_{Y_k^{ust}}}$ İfadelerinin Hesaplaması	125
A.2. FEKS Metodunda $F_{\gamma_{X_k^{ust}}}$ ve $F_{\gamma_{Y_k^{ust}}}$ İfadelerinin Hesaplaması	128
A.3. AAİ Modeli İçin TK İfadesinin $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ İfadesine Dönüştürülmesi	129
A.4. $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ İfadesinin CDF Hesaplaması.....	130
A.5. FEKS Metodu İçin TK İfadesinin HO İfadesine Dönüştürülmesi	131
B. EK-2.	131
B.1. GBG Durumunda $\min(\gamma_{X_k^{ust}}, \gamma_{Y_k^{ust}})$ İfadesinin CDF Hesabı.....	131
B.2. KKH Durumunda $\min(\gamma_{X_k^{ust}}, \gamma_{Y_k^{ust}})$ İfadesinin CDF Hesabı	133
B.3. FEKS Metodunda KKH Durumunda $F_{\gamma_{X_k^{ust}}}$ ve $F_{\gamma_{Y_k^{ust}}}$ İfadelerinin Hesaplaması .	135
B.4. FEKS Metodunda GBG Durumunda $F_{\gamma_{X_k^{ust}}}$ ve $F_{\gamma_{Y_k^{ust}}}$ İfadelerinin Hesaplaması..	136
C. EK-3.	137
C.1. Dış Kaynaklı Etkileşimler Etkisinde AAİ Modelinde $F_{\gamma_{X_k^{ust}}}$ ve $F_{\gamma_{Y_k^{ust}}}$ İfadele- rinin Hesaplaması	137
C.2. Dış Kaynaklı Etkileşimler Etkisinde FEKS Metodunda $F_{\gamma_{X_k^{ust}}}$ ve $F_{\gamma_{Y_k^{ust}}}$ İfade- lerinin Hesaplaması	141
C.3. TK İfadesinin $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ İfadesine Dönüştürülmesi	143
C.4. Dış Kaynaklı Etkileşimler Altında AAİ Modeli İçin $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ İfadesi- nin CDF Hesaplaması	144
C.5. FEKS Metodu İçin $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ İfadesinin CDF Hesaplaması	145
D. EK-4.	146
D.1. FOEKRS Metodunda $F_{\gamma_{X^{ust}}}$ ve $F_{\gamma_{Y^{ust}}}$ İfadelerinin Hesaplanması	146
ÖZGEÇMİŞ	148

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Yarı-zamanlı tek yönlü röle ile veri alışverişi süreci.	6
Şekil 2.2. Yarı-zamanlı iki yönlü röle ile veri alışverişi süreci.	7
Şekil 3.1. Çok kullanıcıli iki yönlü kablosuz röleli ağ modeli.	18
Şekil 3.2. Sonlu sayıda dış kaynaklı etkileşimlerin etkisi altında çok kullanıcıli iki yönlü kablosuz röleli ağ haberleşme modeli.	64
Şekil 3.3. Çok kullanıcıli ve çoklu iki yönlü kablosuz röleli ağ haberleşme modeli.	78
Şekil 4.1. AAİ modeli ve FEKS metodunun servis dışı kalma olasılığı karşılaştırması.	93
Şekil 4.2. FEKS ile MM metodlarının servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırması.	95
Şekil 4.3. AAİ modeli ve FEKS metodunun hata olasılığı performans karşılaştırması.	96
Şekil 4.4. FEKS metodu ile MM metodunun hata olasılıkları karşılaştırması.	97
Şekil 4.5. AAİ modeli ve FEKS metodu başarılabilir oran değeri karşılaştırması.	98
Şekil 4.6. AAİ modeli ve FEKS metodunun sondan-sona kanal kapasitesi performans karşılaştırması.	99
Şekil 4.7. FEKS ve MM metodlarının sondan-sona kanal kapasitesi karşılaştırması.	100
Şekil 4.8. AAİ modeli ve FEKS metodunun GBG durumunda servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırması.	102
Şekil 4.9. Geri bildirim gecikmeli ortamda FEKS metodu ile MM metodunun karşılaştırması.	103
Şekil 4.10. AAİ modeli ve FEKS metodunun KKH durumunda servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırması.	104
Şekil 4.11. KKH'lı ortamda FEKS metodu ile MM metodunun karşılaştırması.	105
Şekil 4.12. N kullanıcıli ve M dış kaynaklı eş-kanal etkileşimin olduğu durumda AAİ modeli ve FEKS metodunun servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırması.	107
Şekil 4.13. FOEKRS ve MM metodlarının servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırması.	108

Şekil 4.14. M röleli FOEKRS metodu ile tek röleli FEKS metodlarının servis dışı kalma olasılığı karşılaştırması.	109
Şekil 4.15. FOEKRS, MM ve tek röleli FEKS metodlarının hata olasılığı karşılaştırması.	111
Şekil 4.16. N kullanıcı M röleli ve tek röleli FOEKRS modeline ilişkin başarılabılır oran değeri performans karşılaştırması.	112
Şekil 4.17. N kullanıcı, M röleli FOEKRS, MM metodlarının ve N kullanıcı tek röleli kanal kapasitesi karşılaştırması.	113

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler

Açıklama

α	: Alfa
β	: Beta
\geq	: Büyük Eşit
\prod	: Çarpım
$K_1(\cdot)$: Değiştirilmiş (modified) Birinci Tür Bessel Fonksiyonu
Δ	: Delta
\equiv	: Denk
f_d	: Doppler Frekansı
\in	: Eleman
γ_{th}	: Eşik Değer (FEKS Metoduna Ait)
γ_{th}^{TK}	: Eşik Değer (AAİ Modeline Ait)
γ_{th}^{MM}	: Eşik Değer (MM Metoduna Ait)
γ_{th}^{tk}	: Eşik Değer (Dış Kaynaklı Etkileşim Altındaki FEKS Metoduna Ait)
$=$: Eşittir
\neq	: Eşit Değil
$!$: Faktöriyel
Γ	: Gama
\mathcal{N}	: Gauss (Normal) Dağılım
\hat{h}	: h Kanalına Ait Kestirilmiş Kanal Durum Bilgisi
ε	: Hata Bileşeni
R	: Hedef İletim Değeri
\forall	: Her
\int	: İntegral Operatörü
\implies	: İse
\mathcal{C}	: Karmaşık
\leq	: Küçük Eşit
$F(x)$: Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (CDF)
ρ_{fk}	: Korelasyon Katsayısı
Λ	: Lamda
$ $: Mutlak ifadesi
$f(x)$: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF)
Ω	: Ortalama Değer
$\mathbb{E}[\cdot]$: Ortalama Değer (Beklenen Değer)
π	: Pi
ρ_e	: Pilot Sinyalin Gücü
$J_0(\cdot)$: Sıfırıncı Düzen Bessel Fonksiyonu
γ	: Sinyal Gürültü Oranı/Sinyal Etkileşim Gürültü Oranı

∞	: Sonsuz
\triangleq	: Tanım Gereği Eşit
\sum	: Toplam
$\frac{\partial}{\partial}$: Türev Operatörü
Exp	: Üstel
E_i	: Üstel İntegral
σ^2	: Varyans
\approx	: Yaklaşık

Kısaltmalar	Açıklama
-------------	----------

AAİ	: Aynı Anda İletim
ÇG	: Çöz-ve-Gönder
DFBÇ	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
DFBÇE	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
DS-KBÇE	: Doğrudan Sıralı-Kod Bölmeli Çoklu Erişim
FEKS	: Fırsatçı Eş-Kaynak Seçimi
FOEKRS	: Fırsatçı Ortak Eş-Kaynak ve Röle Seçimi
FG	: Filtrele-ve-Gönder
FBÇE	: Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
GBG	: Geri Bildirim Gecikmesi
HO	: Harmonik Ortalama
KKH	: Kanal Kestirim Hatası
KBÇE	: Kod Bölmeli Çoklu Erişim
MM	: Maksimum-Minimum
SGO	: Sinyal Gürültü Oranı
SEGO	: Sinyal Etkileşim Gürültü Oranı
SG	: Sıkıştır-ve-Gönder
TK	: Toplam Kapasite
UBÇE	: Uzay Bölmeli Çoklu Erişim
YG	: Yükselt-ve-Gönder
YOT	: Yüksek Ölçekli Terim
ZBÇE	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ÇOK KULLANICILI İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞLARDA FIRSATÇI EŞ-KAYNAK SEÇİM METODU

Volkan ÖZDURAN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bekir Sıddık Binboğa YARMAN

II.Danışman: Prof. Dr. John M. CIOFFI

Bu tez sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşan hücre-içi etkileşim problemi için fırsatçı eş-kaynak seçim (FEKS) metodunu incelemektedir. İnceleme çok kullanıcılı yükselt-ve-gönder (YG) tabanlı iki yönlü kablosuz röleli ağ sistem modelini kullanmaktadır. FEKS stratejisi her bir zaman aralığında maksimum toplam kapasiteye sahip uygun kullanıcı çiftinin seçilmesine dayanmaktadır. Analitik, asimptotik ve Monte-Carlo benzetim sonuçlarına göre FEKS stratejisi, hücre-içi etkileşim problemine optimuma yakın çözüm sağlamanın yanı sıra kullanıcı çifti sayısı artırıldığı takdirde her bir zaman aralığında maksimum kullanıcı çifti seçimi yüksek sinyal-gürültü oranı (SGO) bölgesinde çeşitlilik ölçütü oluşturmaktadır. Buna ek olarak, toplam kapasite tabanlı kullanıcı çifti seçim metodu, aynı anda iletim (AAİ) modeli ve maksimum-minimum (MM) tabanlı kullanıcı çifti seçim metoduna göre daha üstün performans sergilemektedir.

Çalışmanın devamında, kanal durum bilgisinin geri bildirim gecikmesinden (GBG) ve kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatadan (KKH) dolayı mükemmel olmamasının AAİ modeli ve FEKS metodu üzerine etkileri incelenmiştir. Analitik, asimptotik ve Monte-Carlo benzetim sonuçlarına göre GBG, başarılı olabilir çeşitlilik ölçütü değerini N'den 0 değerine düşürürken kodlama kazancında da kayıplara sebep olmaktadır. Sonuçlar aynı zamanda, KKH durumunun başarılı olabilir çeşitlilik ölçütü üzerinde herhangi bir etkisi olmadığını fakat düşük SGO bölgesinde kodlama kazancında kayıpların oluşmasına sebep olduğunu göstermektedir. Ayrıca, KKH'nın sistem kodlama kazancı üzerine etkileri yüksek SGO bölgesinde ihmal edilecek düzeylere gelmektedir. Buna ek olarak, GBG ve KKH

durumlarında FEKS metodu MM tabanlı kullanıcı çifti seçimine göre böyle bir sistem modelinde daha iyi başarımlar sağlamaktadır.

Tezin ilerleyen bölümünde, çalışmalar dış kaynaklı istasyonlardan kaynaklı eş-kanal etkileşimlerin AAİ modeli ve FEKS metodu üzerine olabilecek etkilerin belirlenmesine yönelik ilerletilmiştir. İncelemede çok kullanıcılı tek röleli ve sonlu sayıda dış kaynaklı etkileşimin olduğu sistem modeli kullanılmıştır. Analitik, asimptotik ve Monte-Carlo benzetim sonuçlarına göre dış kaynaklı etkileşimler, başarılabılır çeşitlilik ölçütü değerini N 'den 0 değerine düşürürken sistem kodlama kazancında da kayıplar oluşturmaktadır. Dış kaynaklı istasyonların farklı iletim güçlerine sahip olduğu ve röle istasyonuna kullanıcı çiftlerine etkiyenden daha fazla iletim gücüne sahip bir etkileşim olduğu durumda daha iyi sonuç vermektedir.

Tezin son kısmında, aynı seçim fikri çok kullanıcılı ve çoklu YG tabanlı iki yönlü kablosuz röleli sistem modeline uygulanmıştır. Fırsatçı ortak eş-kaynak ve röle seçim (FOEKRS) metodu, N aday kullanıcı çifti ve M röle içerisinden maksimum toplam kapasiteye sahip uygun kullanıcı çifti ve ilgili röle istasyonunu seçmektedir. Analitik, asimptotik ve Monte-Carlo benzetim sonuçlarına göre ortak seçim stratejisi, hücre-içi etkileşim probleminde optimuma yakın çözüm bulmasının yanısıra yüksek SGO bölgesinde çok kullanıcılı ve işbirlikçi çeşitlilik oluşturmaktadır. Buna ek olarak toplam kapasite tabanlı FOEKRS metodu MM tabanlı kullanıcı çifti ve röle seçimine göre daha iyi performans sergilemektedir.

Şubat 2015, 162 Sayfa.

Anahtar Kelimeler: Aynı anda iletim, Fırsatçı eş-kaynak seçimi, Maksimum-Minimum, Fırsatçı ortak eş-kaynak ve röle seçimi, Hücre-içi etkileşim, Mükemmel olmayan kanal durum bilgisi, Dış kaynaklı eş-kanal etkileşim.

SUMMARY

Ph.D. THESIS

OPPORTUNISTIC SOURCE-PAIR SELECTION (OSPS) METHOD FOR MULTIUSER BI-DIRECTIONAL WIRELESS RELAYING NETWORKS

Volkan ÖZDURAN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bekir Sıddık Binboğa YARMAN

Co-Supervisor : Prof. Dr. John M. CIOFFI

This thesis investigates the opportunistic source-pair selection (OSPS) strategy for the inter-cell interference (ICI) challenge that is caused by the other user-pairs in the system model. The investigation considers multiuser and single non-regenerative amplify-and-forward (AF) based bi-directional wireless relaying networks. The method relies upon selection of the appropriate source-pair node among N available source-pair nodes based on each source pairs maximum sum-capacity. According to analytical, asymptotic and Monte-Carlo simulation results the OSPS strategy, besides achieving the near optimal solution for the ICI challenge, and if the number of the user pair increases, also achieves diversity order by selecting the maximum sum-capacity user-pair in each time slot in high signal-to-noise ratio (SNR) regimes. Moreover, the sum-capacity based user-pair selection method outperforms the simultaneous transmission model and the maximum-minimum (MM) based user-pair selection method in such a system model.

In following study, the impacts of imperfect channel state information (CSI), that is caused by the feedback delay (FD) with time-variant channels and also by the channel estimation errors (CEE) are investigated over the simultaneous transmission and the OSPS strategy. According to analytical, asymptotic and Monte-Carlo simulation results the FD, degrades the achievable diversity order from N to 0 while affecting coding gain. The results also show that CEE case does not affect the achievable diversity order but it does affect the system coding gain in low SNR regimes. Moreover, CEE effects upon system coding gain become negligible levels in high SNR regimes. In addition to this, the OSPS strategy outperforms the MM based user-pair selection method in both FD and CEE cases in such a system model.

In the following part of the thesis, studies are extended to investigate the impacts of the external co-channel interference (CCI), that is caused by the external terminals over the OSPA strategy and simultaneous transmission models. The investigation considers multi user and single bi-directional relay and finite number of the external terminals in the system model. According to analytical, asymptotic and Monte-Carlo simulation results the external terminal interference, degrades the achievable diversity order from N to 0 while also affect the system coding gain. In the case that, external terminals have non-identical transmit powers and if the relay terminal interfered with more transmit power in comparison to user-pairs interfered give better performance values.

In the last part of the thesis, same selection idea is applied to multiuser pair and multiple bi-directional, non-regenerative, AF based wireless relaying system model. The opportunistic joint source-pair and relay selection (OJSPRS) strategy selects the appropriate user-pair and relay terminal among N candidate user-pairs and M available relays based on the maximum sum-capacity of each user-pair and related relay terminal. According to the analytical, asymptotic and Monte-Carlo simulation results this joint-selection strategy, besides achieving near-optimal solution for the ICI challenge, also achieves multiuser and cooperative diversity order in high SNR regimes. Moreover, the OJSPRS strategy outperforms the MM based user-pair and relay terminal selection method in such a system model.

February 2015, 162 Pages.

Keywords: Simultaneous transmission, Opportunistic source-pair selection, Maximum-minimum, Opportunistic joint source-pair and relay selection, Inter-cell interference, Imperfect channel state information, External co-channel interference.

1. GİRİŞ

İşbirlikçi haberleşme modeli, son yıllarda kablosuz haberleşme kanalının sönümlenme etkilerininin (channel fading effects) azaltılmasına yönelik alternatif bir teknoloji olarak yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Röleler ile sağlanan işbirlikçi haberleşme süreci özellikle kaynak ile hedef istasyonları arasında uzak mesafeler olduğunda, iki merkez arasında bulunan rölede kaynak istasyonundan alınan sinyal üzerinde sinyal işleme yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Rölede sinyal üzerinde yapılan bu sinyal işleme işlemleri hedef istasyonda alınan sinyalin kalitesinin artmasına sebep olmaktadır. En yaygın kullanım alanına sahip röle protokolleri, yükselt-ve-gönder (YG) (amplify-and-forward) [1], çöz-ve-gönder (ÇG) (decode-and-forward) [2], filtrele-ve-gönder (FG) (filter-and-forward) [3] ve sıkıştır-ve-gönder (SG) (compress-and-forward) [4]'dir. Tek yönlü veya iki yönlü olarak çalışan röle tipleri bulunmaktadır. İki yönlü kablosuz röleler, spektrumun etkin bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamasından dolayı tek yönlü rölelere göre öne çıkarak kablosuz haberleşme teknolojisinde son yıllar içerisinde yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. İki yönlü kablosuz haberleşme fikri ilk olarak Shannon [5] tarafından ortaya atılmıştır. Bu sistem modeli, iki kullanıcı düğümünün birbirleri arasında direkt bir hat olmadan röle yardımı ile veri alışverişi yapabilmesine dayanmaktadır. Söz konusu veri alışverişi işlemi iki, üç veya dört fazda da yapılabilmektedir [6]. İki yönlü röle düğümünde analog ağ kodlaması (analog network coding) [7], veri alışverişi işleminin toplamda iki fazda yapılmasına olanak sağlamaktadır. Birinci faz çoklu erişim fazı (multiple access phase) ve ikinci faz da yayılım fazı (broadcast phase) olarak adlandırılmaktadır. Çok kullanıcı sistemde, kullanıcı çiftlerinin aynı anda iki yönlü röle üzerinden veri alışverişi yapması sonucunda YG tabanlı çalışan röle düğümü, bütün kullanıcı çiftlerinden aldığı veriyi yükseltir ve ikinci fazda yayımlar. Bu süreç sonunda her bir kullanıcı kendi gönderdiği veriyi (self-interference) ve eş kullanıcılarının verisinin yanısıra sistem içerisinde bulunan diğer kullanıcı çiftlerinin verilerini de alır. Diğer kullanıcı çiftlerinin verileri herbir kullanıcıda hücre-içi etkileşim problemine yol açmaktadır. Literatürde hücre-içi etkileşim probleminin çözümüne yönelik birçok farklı türde teknik bulunmaktadır. Sıfıra-zorlama

(zero-forcing) ve hüzmleme (beamforming) yöntemleri bu alanda aktif kullanım alanına sahiptir [8–19]. Sıfıra zorlama ve hüzmleme yöntemlerinin uygulanabilmesi için tam kanal durum bilgisine (full channel state information (CSI)) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum hüzmleme ağırlık katsayılarının hesaplanması ve kanal durum bilgisinin verici kısmına iletilmesi yönünden sistem genel giderlerinin artmasına sebep olmaktadır. Diğer taraftan kullanıcı çiftlerinde ve rölede kullanılacak anten sayısının artması donanım maliyetlerinin (hardware costs) artmasına da sebep olabilmektedir. Çok kullanıcıli sistemlerde hücre-içi etkileşim probleminin çözümüne yönelik son dönemlerde alternatif olarak dikey iletim teknikleri (orthogonal transmission techniques) kullanılmaktadır. Aktif kullanım alanına sahip olan başlıca dikey iletim teknikleri dikgen frekans bölmeli çoğullama (DFBC)(orthogonal frequency division multiplexing) [21] ve kod/zaman/frekans/dikgen frekans (K/Z/F/DF/BÇE) bölmeli çoklu erişim (code/time/ frequency/ orthogonal frequency/ division multiple access (C/T/F/OF/DMA)) [20,22] olarak sıralanabilir. Literatürde dikey iletim teknikleri kullanılarak çok kullanıcıli röleli sistemlerde hücre-içi etkileşim probleminin giderilmesine yönelik başlıca çalışmalar mevcuttur [23–27]. Dikey iletim tekniklerinin hücre-içi etkileşim problemine çözüm olmasına rağmen kanalın iyi durumundan (good channel status) tam olarak fayda sağlamayabilir. Bunun yanı sıra, rölede bazı sinyal işleme süreçlerine gereksinim de duyulabilir. Röledeki sinyal işleme süreci güç tüketimini de arttırabilir. Literatürde hücre-içi etkileşim problemini alternatif olarak kullanıcı çifti seçimi ile giderilmesine yönelik çalışmalar da mevcuttur [28–30].

Sistem modelinde kullanılan iki yönlü rölenin, YG tabanlı çalışmasından dolayı alınan sinyalin yükseltme işleminin haricinde başka herhangi bir sinyal işleme sürecine izin vermemektedir. Diğer taraftan, her bir kullanıcı ve rölede bir adet çok yönlü (omni-directional) anten kullanılmasından dolayı hücre-içi etkileşim probleminin giderilmesine yönelik yukarıda bahsedilen yöntemlerin uygulanması rölede sinyal işleme gereksinimlerine ihtiyaç duyulmasından dolayı mümkün değildir. Bu amaçla, tez çalışmasında hücre-içi etkileşim problemine yukarıda bahsedilen yöntemlerden birçok yönden farklılıklar gösteren bir yöntem önerilmiştir. Yeni yöntem fırsatçı eş-kaynak seçim (FEKS) metodu olarak adlandırılmıştır [31]. Bu farklılıklardan ilki, rölede ve kullanıcı çiftlerinde çoklu anten kullanımı yerine yeni önerilen metod her bir terminalde tek bir anten kullanmaktadır. Veri alışverişi süreci yarı zamanlı (half-duplex) YG tabanlı röle aracılığı ile yapılmaktadır. Yeni yöntem, fırsatçı eş-kaynak seçimi stratejisi sağlamaktadır. Seçim yöntemi, sis-

tem içerisindeki kullanıcı çiftlerinin toplam kapasitelerinin (sum-capacity) hesaplanması ve her bir zaman aralığında N adet kullanıcı çifti arasından maksimum toplam kapasiteye sahip olan kullanıcı çiftinin seçilip veri alışverişi yapmasına dayanmaktadır. Bu süreç esnasında sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftleri sessiz kalarak haberleşme sürecine dahil olmamaktadır. Diğer kullanıcı çiftlerinin bu sürece dahil olmaması hücre-içi etkileşim problemini ortadan kaldırmaktadır. Kullanıcı çifti seçim işlemi yüksek SGO bölgesinde çeşitlilik ölçütü oluşturmaktadır. FEKS metoduna ilişkin matematiksel çıkarımlarda bulunularak AAİ modeline olan üstün yönleri birçok farklı performans ölçütü kullanılarak [32] ile ortaya koyulmuştur. Diğer taraftan, FEKS metodunun literatürde yaygın olarak kullanılan MM tabanlı seçim metoduna [33] olan üstün yönleri [32] ile ortaya koyulmuştur.

Kanal durum bilgisinin ölçülmesi, kullanıcı çiftlerinin toplam kapasitelerinin hesaplanması ve N adet kullanıcı çifti arasından maksimum toplam kapasiteye sahip olan kullanıcı çiftinin seçilmesi süreçleri merkezi birim tarafından yapılmaktadır. Bu süreçlerin başarılı bir şekilde yürütülmesi merkezi birimin ideal kanal durum bilgisine sahip olması ile gerçekleşmektedir. Fakat bu durum bir çok pratik uygulamada mümkün olmamaktadır. Kanal durum bilgisinin alıcı tarafında kestirimi sırasında kestirimden kaynaklı oluşan hatalar ve kestirimde bulunulmuş olan kanal durum bilgisinin verici kısmına geri bildirim yolu ile iletilmesi sırasında kanalın değişmesinden kaynaklı durumlar kanal durum bilgisinin mükemmeliyetini olumsuz yönde etkilemektedir. Literatürde hücre-içi etkileşim probleminin giderilmesine yönelik uygulanan yöntemlerin kanal durum bilgisinin mükemmel olmadığı durumdaki sistem performansına olan etkilerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Kanal durum bilgisinin kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatadan dolayı ve/veya geri bildirim gecikmesinden dolayı mükemmel olmadığı durumda kullanıcıların tek/iki yönlü röle/röleler vasıtasıyla veri alışverişi yapmalarına ilişkin çalışmalara [34–44]’te yer verilmiştir. Diğer taraftan sıfıra-zorlama ve hüzmeleme teknikleri kullanılarak bu alanda yapılan çalışmalara [45, 46], dikey iletim teknikleri kullanılarak yapılan çalışmalara da [47–49] ile değinilmiştir. Literatürde hücre-içi etkileşim problemini gidermek için kullanılan tekniklerden birçok yönde farklılıklar gösteren FEKS metodunun ve kullanıcı çiftlerinin aynı anda birbirleri ile veri alışverişi yaptığı AAİ modelinde kanal durum bilgisinin mükemmel olmadığı durumda sistem performansına olan etkileri [50]’de incelenmiştir. Diğer taraftan kanal durum bilgisinin mükemmel olmadığı durumda FEKS metodunun MM tabanlı seçim metoduna olan üstünlükleri yine [50] ile

ortaya koyulmuştur.

Çok kullanıcılı sistemlerde kullanıcı çiftlerinin iki yönlü kablosuz röle aracılığı ile veri alışverişi yapması sürecinde, sistem modeli içinde bulunan diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşan hücre-içi etkileşim probleminin yanı sıra dış kaynaklı istasyonlardan sistem modeline etkileşimler de olabilmektedir. Bu durum her bir kullanıcı çiftinde eş-kanal etkileşim problemi oluşturmaktadır. Dış kaynaklı etkileşimlerin sistem performansına olumsuz yönde etkileri olmaktadır. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalara [51–61]’de yer verilmiştir. Fakat bu çalışmalar genellikle tek kullanıcı çiftinin olduğu dış kaynaklı etkileşimlerin sadece röleye veya kullanıcı çiftlerine etkilediği durumlara göre yapılmıştır. Hem sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hücre-içi etkileşim probleminin giderilmesine hemde dış kaynaklı etkileşimlerin etkisinin belirlenmesine yönelik çalışma [62] ile ortaya koyulmuştur. Konuya ilişkin teorik çıkarımlara da [63]’te yer verilmiştir.

Pratik röle uygulamalarında, hücrenel kapsama alanlarındaki kullanıcı sayısının artmasına paralel olarak sistem modelleri birden fazla röle içermektedir. M adet röle içerisinde en iyi aday rölenin seçilmesi ve veri alışverişi işleminin seçilen röle üzerinden yapılması sistem genel giderlerinin (system overhead) azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Fakat bu durum çok kullanıcılı sistemlerde, sistem içerisinde bulunan kullanıcı çiftlerinin M adet röle içerisinde seçilen bir adet iki yönlü röle yardımıyla veri alışverişi yapması hücre-içi etkileşim problemi açısından güvenilir haberleşme imkanı sağlamamaktadır. Bu durum sistem performansını etkileyen önemli faktörlerin başında gelmektedir. Literatürde çok kullanıcılı ve çoklu iki yönlü röleli sistemlerde hücre-içi etkileşim probleminin sıfıra-zorlama ve hüzmleme teknikleri kullanılarak giderilmesine yönelik başlıca çalışmalara [64, 65], dikey iletim teknikleri kullanılarak [66–71] ve uygun kullanıcı ve röle seçimi ile [72, 73]’te yer verilmiştir.

Çok kullanıcılı ve çoklu iki yönlü YG tabanlı röleli sistemlerde, hücre-içi etkileşim probleminin çözümüne yönelik olarak literatürden farklı olarak fırsatçı ortak eş-kaynak ve röle seçim (FOEKRS) yöntemi [74]’te önerilmiştir. Diğer taraftan, MM tabanlı metod kullanan [73]’e göre birçok yönden üstünlükleri yine [74] ile ortaya koyulmuştur.

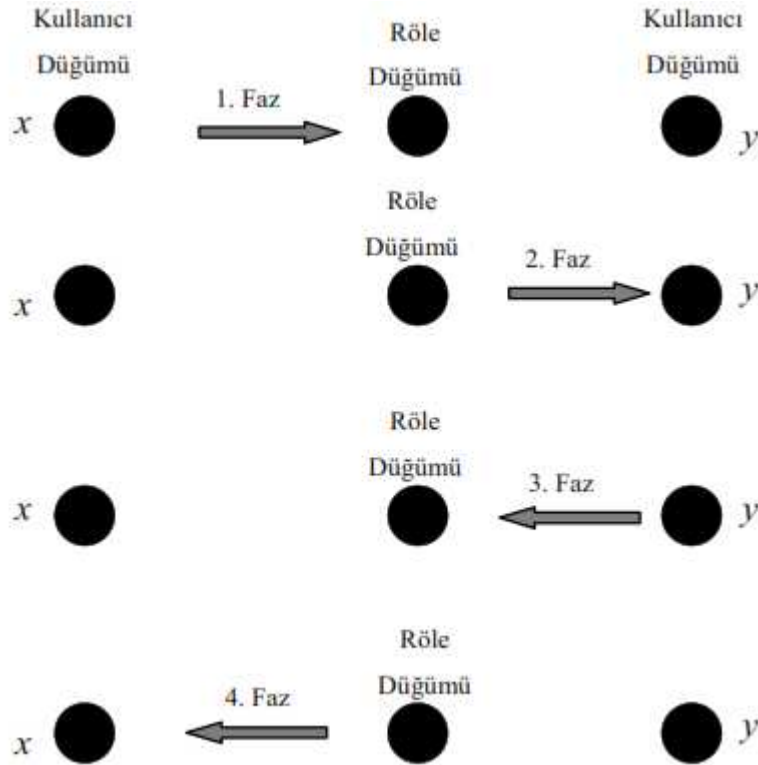
2. GENEL KISIMLAR

Çok kullanıcılı iki yönlü röleli sistemlerde, aynı frekans bandında çalışan kullanıcı çiftlerinin sistem içerisinde bulunan röle ve/veya röleler aracılığı ile veri alışverişi yapması sonucunda, her bir kullanıcı çifti kendi eş kullanıcılarının verisinin yanı sıra kendi gönderdiği veriyi ve diğer kullanıcı çiftlerinin verilerini de alır. Kendi gönderdiği veri, kendi etkileşim iptali (self interference cancellation) ile toplam sinyal içerisinde çıkarılabilir. Fakat diğer kullanıcı çiftlerinin verileri her bir kullanıcıda hücre-içi etkileşim probleminin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu bölümde hücre-içi etkileşim probleminin çözümüne yönelik literatürde kullanılan yöntemlere yer verilmektedir. Diğer taraftan kanal durum bilgisinin mükemmel olmadığı durumda sistem performansına olan etkilerinin belirlenmesine dönük çalışmalara da yer verilmektedir. Tezin ilerleyen kısımlarında dış kaynaklı istasyonlardan sistem modeline etki eden eş-kanal etkileşimlerin sistem performansına olan etkilerine yönelik çalışmalar incelenmiştir. Son olarak, kullanıcı çiftlerinin birden fazla röle vasıtasıyla veri alışverişi yaptığı sistem modeli incelenmiştir.

2.1. TEK YÖNLÜ RÖLE İLE VERİ ALIŞVERİŞİ İŞLEMİ

x ve y kullanıcılarının yarı zamanlı tek yönlü röle ile veri alışverişi yapması süreci şekil 2.1’de gösterilmiştir [18]. Şekil 2.1’de birinci fazda, x kullanıcısı kendi verisini röle istasyonuna gönderir. Röle düğümü x kullanıcısından aldığı veriyi röle protokolüne göre işledikten sonra ikinci fazda y kullanıcısına gönderir. Üçüncü fazda, y kullanıcısı kendi verisini röle düğümüne gönderir. Röle düğümü y kullanıcısından aldığı veriyi işledikten sonra x kullanıcısına gönderir. Bu süreç sonunda x ve y kullanıcılarının veri alışverişi süreci toplamda dört fazda tamamlanmış olur. Kullanıcı çifti sayısının çok olduğu sistem modelleri düşünüldüğünde (N adet kullanıcı çiftinin olduğu durumda), kullanıcı çiftlerinin veri alışverişi sürecini tamamlaması toplamda $4 \times N$ sürede gerçekleşmektedir. Bu durum spektrumun etkinliği yönünden dezavantaj oluşturmaktadır. Aynı zamanda güç tüketiminin artmasına da sebep olmaktadır. Bu kapsamda, [34] kaynak ve hedef istasyonun tek yönlü röle vasıtasıyla veri alışverişi yaptığı bir sistem modeli üzerinde çalışmakta-

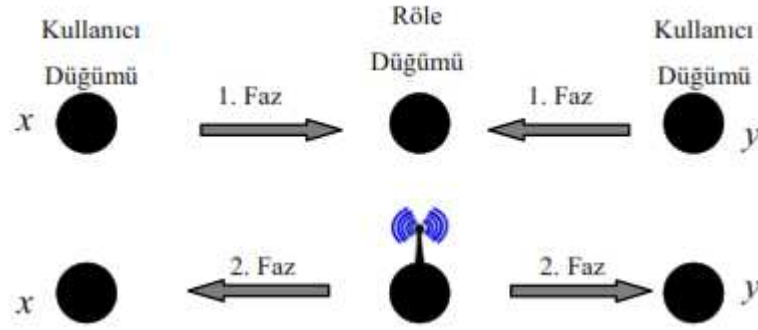
dır. [34] aynı zamanda kaynak ve hedef istasyonu arasında direkt bir hattın olduğu ve her bir istasyonun birden fazla antene sahip olduğunu farzetmektedir. Aynı zamanda, [34] kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatanın sistem modeli üzerine olan etkilerini incelemektedir. Benzer şekilde, [35] işbirlikçi haberleşme tekniğinin kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hata etkilerininin azaltılmasına olan etkileri incelemektedir. [35] inceleme sırasında kaynak ve hedef istasyonun N adet tek yönlü ÇG tabanlı röle vasıtasıyla veri alışverişi yaptığı bir sistem modeli kullanmaktadır. [35] aynı zamanda sistem modelinde kaynak ve hedef istasyonları arasında direkt bir hattın olduğunu varsaymaktadır. [48]'de kaynak istasyonu hedef istasyon ile YG tabanlı M adet tek yönlü röle vasıtasıyla haberleşmektedir. Dikey iletim tekniklerinden zaman bölmeli çoklu erişim metodunu kullanmaktadır. Her bir zaman aralığında seçilen röle üzerinden veri alışverişi yapmaktadır. Seçim stratejisi maksimum toplam SGO değerine dayanmaktadır.



Şekil 2.1: Yarı-zamanlı tek yönlü röle ile veri alışverişi süreci.

2.2. İKİ YÖNLÜ RÖLE İLE VERİ ALIŞVERİŞİ İŞLEMİ

x ve y kullanıcılarının iki yönlü röle aracılığı ile veri alışverişi yapmasına ilişkin süreç şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Yarı-zamanlı iki yönlü röle ile veri alışverişi süreci.

Birinci fazda, x ve y kullanıcıları verilerini aynı anda iki yönlü röleye gönderirler. Röle düğümünün YG tabanlı çalışmasından dolayı alınan veriye analog ağ kodlaması işlemi yapıldıktan sonra yükseltme işlemi yapılır. İkinci fazda, röle düğümü yükseltilmiş veri grubunu kullanıcı çiftlerine yayınlar. Bu süreç sonunda x ve y kullanıcılarının veri alışverişi süreci toplamda iki fazda tamamlanmış olur.

Literatürde değişik sistem modellerinin (baz istasyonunun tekli veya çoklu röleler aracılığı ile M adet kullanıcı ile veri alışverişi yapması v.b.) iki yönlü röle ile veri alışverişi yapılmasına dair çalışmalar mevcuttur. Örnek olarak [28], iki kullanıcının en geniş kanal normu (largest channel norm) ve rölede sinyallerin birbirine olan uzaklığı ile kullanıcı seçim işlemini yapmaktadır. Gürültü etkisi için ise rölede maksimum olasılık (maximum-likelihood) algılayıcı ve ağ kodlayıcı eşleştirici (network coding mapper) kullanmaktadır. Diğer taraftan [29], baz istasyonunun YG tabanlı röle vasıtası ile K adet mobil kullanıcı arasından seçilen bir adet kullanıcı ile haberleşmesine dayalı bir sistem modeli üzerinde çalışmaktadır. Seçim metodu olarak, mobil kullanıcıların maksimum anlık iletim oranını temel almaktadır. Bütün bunlara ek olarak baz istasyonu-röle istasyonu ve röle istasyonu-kullanıcı arasındaki kanal bilgisine sahip olduğunu farzetmektedir. Benzer şekilde, [30]'da baz istasyonunun birden fazla antene sahip olduğu ve K adet kullanıcı içinden M adet kullanıcının seçilmesi ve her bir kullanıcının da tek bir antene sahip olduğu bir sistem modeli üzerinde çalışmaktadır. Baz istasyonu ve kullanıcılar arasındaki veri alışverişi işlemi birden fazla antene sahip röle vasıtası ile yapılmaktadır. Röle istasyonunda ön kodlama işlemlerine yer verilmektedir. Seçim stratejisi olarak kanal korelasyonlarından faydalanılmaktadır.

Veri alışverişi sürecinde kanal durum bilgisinin ideal olmamasının sistem performansı

üzerine olan etkilerinin belirlenmesine yönelik olarak literatürde çalışmalar mevcuttur. [36] kanal kestirimi sırasında oluşan hatadan dolayı kanal durum bilgisinin mükemmel olmamasının iki yönlü röle ile olan haberleşme modeli üzerine olan etkilerini belirlenmeye çalışmaktadır. [36], tek kullanıcı çiftinin YG tabanlı iki yönlü röle ile veri alışverişi yaptığı sistem modelini kullanmaktadır. [37], röle terminalinin tam-zamanlı (full-duplex) çalıştığını varsayarak [36]'yı bir adım öteye taşımaktadır. Benzer şekilde [38], [37]'de olduğu gibi sistem modelinde tam zamanlı iki yönlü röle kullanmaktadır. [38] aynı zamanda kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hataların etkilerini de incelemektedir. [38]'de, [37]'den farklı olarak her bir istasyonda alıcı ve verici antenleri bulunmaktadır. [39], [36] ile aynı sistem yapısını kullanmaktadır. Bunun yanı sıra [39] kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hata etkilerini incelemektedir. [39], [36]'dan farklı olarak her bir istasyonda çoklu anten yapısını kullanmaktadır. [40] çalışmaları en iyi röle seçimi ile birlikte üç-faz analog ağ kodlamalı veri alışverişi üzerine ilerletmektedir. [40] aynı zamanda, kanal durum bilgisinin mükemmel olmadığı durumda sistem performansına olan etkileri belirlemeye çalışmaktadır. [41]'de kanal durum bilgisinin mükemmel olmadığı durumda K adet kullanıcı çifti, 2K antenli iki yönlü röle vasıtası ile veri alışverişi yapmaktadır. Çalışmada, yeni bir pilot iletim metodu ve güçlü bir filtre modeli önerilmektedir. [42]'de M antenli baz istasyonu, N adet tek antenli mobil istasyon arasından seçilen tek bir mobil istasyon ile tek antenli YG tabanlı iki yönlü röle vasıtası ile veri alışverişi yapmaktadır. Mobil kullanıcı seçimi ve baz istasyonundaki anten seçimi işlemi kanalın durumlarına göre yapılmaktadır. Aynı zamanda [42], Rayleigh sönümlmeli kanallarda kanal durum bilgisinin ideal olmadığı durumda sistem performansı üzerine olabilecek etkileri de incelemektedir. [43], kanalın zamanla değişimden kaynaklı ideal olmayan kanal durum etkilerinin K adet mobil istasyon içerisinden dağıtılmış kullanıcı seçimi üzerine olan etkileri incelemektedir. Seçim işlemi sonrasında en iyi mobil istasyon, baz istasyonu ile YG tabanlı iki yönlü röle vasıtası ile veri alışverişi yapmaktadır. [44], A ve B kullanıcılarının N adet iki yönlü röle içerisinden seçilen en iyi röle vasıtasıyla veri alışverişi yapmasına yönelik bir sistem modeli kullanmaktadır. Çalışmada aynı zamanda kanal durum bilgisinin kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatadan dolayı ve geri bildirim gecikmesinden kaynaklı mükemmel olmamasının sistem performansına olan etkileri belirlenmeye çalışılmaktadır. Yukarıda bahsedilen çalışmalardan farklı olarak çok kullanıcılı YG tabanlı tek röleli sistem modelinde kanal durum bilgisinin kanal kestirim hatasından ve geri bildirim gecik-

mesinden dolayı ideal olmaması durumlarının AAİ modeli ve FEKS metodu üzerine olan etkileri [50]'de incelenmiştir. [50] aynı zamanda MM tabanlı kullanıcı çifti seçimine ait analitik çıkarımlarda da bulunarak FEKS metodunun MM metoduna göre üstün yönlerini ortaya koymaktadır.

Literatürde dış kaynaklı istasyonların iki yönlü veri alışverişi üzerine olan etkilerini belirlemeye yönelik çalışmalar da mevcuttur. Örneğin, [51] tek kullanıcı çiftinin YG tabanlı iki yönlü röle yardımı ile veri alışverişi yaptığı sistem modelini kullanmaktadır. Dış kaynaklı terminallerden kaynaklı eş-kanal etkileşimlerin sistem performansı üzerine olan etkilerini belirlemeye çalışmaktadır. [52], [51] ile aynı sistem modelini kullanmaktadır. [51]'den farklı olarak [52], Nakagami- m sönümlmeli kanal yapısını kullanmaktadır. [52] aynı zamanda röle istasyonunun birden fazla dış kaynaklı eş-kanal etkileşimine maruz kaldığı bir sistem modelini kullanmaktadır. Diğer taraftan [52], kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatanın sistem performansı üzerine olan etkilerini de incelemektedir. [53], [51]'den farklı olarak veri alışveriş sürecini ÇG tabanlı röle vasıtasıyla yapmaktadır. [54] Nakagami- m sönümlmeli ortamda iki yönlü röle vasıtasıyla veri alışverişi yapan kullanıcı çiftinin olduğu sistem modeline dış kaynaklı etkileşimlerin olan etkilerini incelemektedir. [54] sadece röle istasyonun J adet dış kaynaklı etkileşime maruz kaldığını, kullanıcı çiftlerinin ise gürültü etkisinde olduğunu varsaymaktadır. Röle yükseltme kazancının hesaplanmasında [54] sadece kullanıcı çiftlerinin kazancını işleme dahil etmektedir. Röleye etkileyen dış kaynaklı etkileşimlerin kazançlarını dahil etmemektedir. [54]'te kullanılan sistem model perspektifi [55] tarafından geliştirilerek birbiri ile özdeş/özdeş olmayan güçlerdeki eş-kanal etkileşimlerin ve ideal olmayan kanal durum bilgisinin Rayleigh sönümlmeli ortamda YG tabanlı tek ve çoklu iki yönlü röleli sistem modeli üzerine olan etkilerini incelemektedir. Çalışmanın ilerleyen safhasında [55], sistem modeli içerisindeki röle sayısını artırarak çalışmaya devam etmektedir. Sistem modeli içerisinde kullanılan her bir rölenin aynı iletim gücüne sahip olduğu ve birbirine özdeş güce sahip aynı etkileşimlere maruz kaldığını varsaymaktadır. [56], [54, 55] ile aynı sistem modelini ve eş-kanal etkileşim/gürültü yapısını kullanmaktadır. [56], birbirinden bağımsız fakat özdeş dağılıma sahip olmayan Rayleigh kanalları kullanmaktadır. [56], röle yükseltme katsayısını hesaplarlarken [54]'ten farklı olarak röleye etkileyen etkileşimleri de hesaba katmaktadır. [57]'de kullanıcı çiftinin YG tabanlı iki yönlü röle yardımı ile veri alışverişi yaptığı sistem modeli kullanılmaktadır. Sistem modelinde [57] sadece kullanıcı çiftlerinin mobil kullanıcılar

veya komşu hücresele alandaki rölenin etkileşimine maruz kaldığını varsaymaktadır. Kullanıcı çiftlerinin veri alışverişi yaptığı rölenin ise sadece gürültü etkisi altında olduğunu varsaymaktadır. [58] röle yükseltme katsayısını hesaplarken [54] ve [57]'den farklı olarak dış kaynaklı etkileşimlerin etkisini de dahil etmektedir. Diğer taraftan, dış kaynaklı etkileşimlerin sistem modelindeki tüm istasyonları etkilediğini varsaymaktadır. [58], [51]'den farklı olarak servis dışı kalma olasılığı hesabı yaparken her iki kanalın kapasitesini gözönünde bulundurmaktadır. [59] kullanıcı çiftinin Rayleigh sönümlenmeli ortamda YG tabanlı röle vasıtasıyla veri alışverişi yaptığı ve her istasyonun birbirinden farklı güçlere sahip dış kaynaklı etkileşimlere maruz kaldığı bir sistem modeli kullanmaktadır. [59] sistemin performansını servis dışı kalma olasılığı performans ölçütünü kullanarak analiz etmektedir. [60] kaynak istasyonun N adet hedef istasyon arasından seçilen istasyon ile YG tabanlı tek yönlü röle vasıtası ile veri alışverişi yaptığını varsaymaktadır. [60] dış kaynaklı eş-kanal etkileşimlerinin sistem modeli üzerine olan etkilerini farklı senaryolar kullanarak incelemektedir. Bu senaryolar sırası ile etkileşimin sadece röle istasyonunu etkilediği, sadece hedef istasyonu etkilediği ve hem röleyi hem de hedef istasyonu etkilediği durumları kullanmaktadır. [61] kullanıcı çiftinin röle vasıtasıyla veri alışverişi yapması sürecine dış kaynaklı istasyondan kaynaklı etkileşimin müdahil olduğu bir sistem modeli kullanmaktadır. [61] aynı zamanda kanal durum bilgisinin kanal kestiriminden kaynaklı mükemmel olmamasının sistem performansı üzerine olabilecek etkilerini de belirlemeye çalışmaktadır. Eş-kanal etkileşim ve kanal kestirim hatasının olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için uyarlanabilir güç aktarım yöntemini önermektedir. Yukarıda bahsi geçen sistem modellerinden farklı olarak çok kullanıcılı tekli sistem modelinde dış kaynaklı etkileşimlerin AAİ modeli ve FEKS metodları üzerine olan etkileri [62]'de incelenmektedir. [63] ile analitik çıkarımlarda bulunularak [62] ilerletilmiştir.

Çok kullanıcılı ve çoklu röleli sistemlerde, [72]'de tek kaynak istasyonu M adet hedef istasyonu arasından seçilen hedef istasyonu ile N adet iki yönlü röle arasından seçilen tek röle aracılığı ile veri alışverişi yapmaktadır. [72] aynı zamanda dağıtılmış kaynak röle seçim modeli kullanmaktadır. [73] çok kullanıcılı YG tabanlı tek/çok röleli sistem modellerini kullanmaktadır. [73] aynı zamanda MM tabanlı kullanıcı çifti ve röle seçim metodunu kullanmaktadır. [74], [73]'ten farklı olarak toplam kapasiteye dayalı kullanıcı ve röle seçim metodunu kullanmaktadır. [74] aynı zamanda, MM tabanlı seçim metoduna ilişkin çıkarımlarda da bulunarak toplam kapasite tabanlı seçim metodunun MM

tabanlı metoda olan üstün yönlerini ortaya koymaktadır. Diğer taraftan [73], sadece servis dışı kalma olasılığı performans ölçütünü kullanırken [74] servis dışı kalma olasılığı performans ölçütünün yanı sıra hata olasılığı, başarılabılır oran, kapasite analizi ve röle istasyonun optimizasyonuna yer vermektedir. [74], [73]'ten farklı olarak çeşitlilik ölçütü analizine de yer vererek iki metod arasındaki performans farklılıklarının sebebini ortaya koymaktadır.

2.3. HÜZMELEME YÖNTEMİ

Hüzmeleme (Beamforming) yöntemi, hedef istasyona iletilmek istenilen sinyalin enerjisini sinyal işleme tekniklerini kullanarak antenler vasıtasıyla belirli hedef yöne doğru iletilmesi esasına dayalı bir tekniktir. Bu durum, sistem içerisindeki diğer kullanıcıların göndermek istenilen sinyalden etkilenmemesine ve hücre-içi etkileşim probleminin oluşmamasını sağlamaktadır. Bu işlem sonucunda, her bir kullanıcıya arzu edilen sinyalin gönderilmesinin yanı sıra daha güçlü sinyal iletimi ve güvenilir haberleşme imkanı sağlanmış olur [75]. Literatürde hüzmeleme yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur. [19]'da, çok kullanıcı ve her bir kullanıcının N adet antene sahip olduğu sistemde kullanıcılar M antenli iki yönlü röle aracılığı ile veri alışverişi yapmaktadır. Sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hücre-içi etkileşim problemini kullanıcılarda ve rölede bulunan çoklu antenler vasıtasıyla hüzmeleme tekniklerini kullanarak gidermeye çalışmaktadır. [8]'de her bir kullanıcıda çoklu antenin olduğu çok kullanıcı sistemde, kullanıcılar bir adet ÇG tabanlı röle aracılığı ile veri alışverişi yapmaktadır. Hücre-içi etkileşim problemi için rölede sıfıra-zorlama hüzmeleme (zero-forcing beamforming) yöntemini kullanmaktadır. [9]'da çok kullanıcı çiftler, çok antenli iki yönlü YG tabanlı yarı-zamanlı çalışan röle aracılığı ile veri alışverişi yapmaktadır. Aynı zamanda rölede, sıfıra-zorlama ve en küçük karesel ortalama (minimum mean square) yöntemlerini kullanmaktadır. [13] kullanıcı çiftlerinin iki yönlü röle vasıtasıyla veri alışverişi yaptığı ve her bir istasyonun çoklu antene sahip olduğu bir sistem modeli kullanılmaktadır. [13] ve genişletilmiş versiyonu olan [17], hücre-içi etkileşim problemine iletim ve alım hüzmele metodu için sinyal uzay sıralama (signal space alignment) tekniğini ve rölede de sıfıra-zorlama tekniğini kullanmaktadır. [14] tek antenli kullanıcı çiftlerinin çok antenli röle aracılığı ile veri alışverişi yaptığı bir sistem modeli ele almaktadır. Hücre-içi etkileşim problemi için [14], asimetric sinyal uzay sıralama (asymmetric

signal space alignment) tekniğini kullanmaktadır. [14] aynı zamanda toplam oranı arttırmak için ortak hüzmleme optimizasyon (joint beamforming optimizations) tekniğini kullanmaktadır. [15], K kullanıcı çiftinin iki yönlü röle vasıtasıyla veri alışverişi yaptığı bir sistem modeli ele almaktadır. [15] her bir istasyonun birden fazla antene sahip olduğunu varsaymaktadır. [15], hücre-içi etkileşim problemi için hüzmleme tekniğini kullanmaktadır. [16], [14] ile aynı sistem modelini kullanmaktadır. [14]'ten farklı olarak, [16] röle istasyonunda çok geniş ölçekte anten kullanmaktadır. [16], ayrıca hücre-içi etkileşim problemi için sıfıra-zorlama ve hüzmleme tekniklerini kullanmaktadır. [46], kanal durum bilgisinin geri bildirim gecikmesinden dolayı mükemmel olmadığı durumda Rayleigh kanallarda hüzmleme tekniğinin hata olasılığı performansı üzerine olabilecek etkilerini incelemektedir. [64], çok kullanıcı ve çok röleli sistem modelinde blok köşegenleştirme (block diagonalization) sıfıra-zorlama ve dikey iletim tekniklerinden zaman bölmeli çoklu erişim teknikleri kullanmaktadır. [65]'te sistem içerisinde dağıtılmış çok rölenin olduğu ve her bir düğümde tek bir antenin olduğu sistem modeli kullanılmaktadır. Hücre-içi etkileşim problemi için sıfıra zorlama yöntemi kullanılmaktadır. Sıfıra zorlama ve hüzmleme yöntemlerinin uygulanabilmesi için tam kanal durum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum hüzmleme ağırlık katsayılarının hesaplanması ve kanal durum bilgisinin verici kısmına iletilmesi yönünden sistem genel giderlerinin artmasına sebep olmaktadır. Diğer taraftan kullanıcı çiftlerinde ve rölede kullanılacak anten sayısının artması donanım maliyetlerinin artmasına da sebep olabilmektedir.

2.4. SIFIRA-ZORLAMA YÖNTEMİ

Sıfıra-zorlama (zero-forcing) yöntemi, en temel hali ile çok kullanıcı ve çok antenli sistemlerde hedef istasyona iletilmek istenen sinyalin dışında kalan sinyallerin sıfır değerine zorlanması şeklinde tanımlanmaktadır [76]. Sıfıra-zorlama yönteminin başarılı bir şekilde uygulanması ideal kanal durum bilgisine sahip olunması ile doğrudan ilişkilidir. Fakat bu durum sistem genel giderlerinin artmasına sebep olmaktadır. [45]'te önceden atanmış tek antenli M adet kaynak-hedef çiftleri aynı anda çok antenli, K, YG tabanlı tek yönlü röle vasıtası haberleşmektedir. Rölede sıfıra-zorlama ve hüzmleme metodları kullanılmakta ve kanal durum bilgisinin ideal olmadığı varsayılmaktadır. Kanal durum bilgisinin mükemmel olmamasından kaynaklı hedef terminalinde oluşan hücre-içi etkileşim problemine röle istasyonundaki anten sayısını arttırarak, ($K \geq M$), çözüm bulunmaktadır.

Çalışma içerisinde aynı zamanda, kapsamlı (exhaustive) ve en iyi (greedy) anten seçim stratejileri uygulanmaktadır.

2.5. KİRLİ KAĞIT KODLAMA YÖNTEMİ

Kirli kağıt kodlaması (Dirty paper coding) [77] tarafından ortaya atılmış bir tekniktir. Literatürde kirli kağıt kodlamasının uygulanması sırasında kanal durum bilgisinin mükemmel olmamasının sistem performansı üzerine olan etkileri [12]'de incelenmektedir. Baz istasyonu ile herbiri N adet antene sahip K adet mobil istasyon iki yönlü röle aracılığı ile sıfıra-zorlama ve kirli kağıt kodlaması yöntemlerini uygulanarak veri alışverişi yapmaktadır. Baz istasyonunun röle ile arasındaki kanalı bildiği varsayılmaktadır. Aynı zamanda mobil istasyon ve röle arasındaki kanalı kestirme kabiliyetine sahip olduğu ve geri bildirim ile kestirimde bulunulan kanal durum bilgisinin baz istasyonuna iletebildiği varsayılmaktadır. Kanal durum bilgisinin ideal olmadığı durumda sistem performansı üzerine olan etkileri de incelenmektedir.

2.6. DİKEY İLETİM YÖNTEMLERİ

Dikey iletim (orthogonal transmission) teknikleri, çok kullanıcıli sistemlerde, kullanıcı çiftlerinin birbirleri ile hücre-içi etkileşim problemi oluşturmadan veri alışverişi ve iletimi yapması temeline dayanmaktadır. En popüler dikey iletim teknikleri, zaman /frekans /kod/dik frekans/ bölmeli çoklu erişim ve dik frekans bölmeli çoğullama teknikleridir.

2.6.1. Zaman Bölmeli Çoklu Erişim

Zaman bölmeli çoklu erişim tekniğinde, haberleşme ortamı birbiri ile örtüşmeyen belirli zaman aralıklarına bölünerek her bir zaman aralığında sistem içerisindeki kullanıcılara kanal ataması yapılarak veri iletimi yapılmasına dayanmaktadır. ZBÇE tekniğinde, zaman aralıklarına bölünen kanallar arasında senkronizasyon hatalarına (synchronization error) ve çok yol (multipath) etkilerine karşı koruma bandı (guard band) kullanılmaktadır [20].

2.6.2. Frekans Bölmeli Çoklu Erişim

Frekans bölmeli çoklu erişim yönteminde, haberleşme ortamı birbirinden farklı belirli frekans aralıklarına bölünerek her bir kullanıcıya ayrı ayrı atanır. Kullanıcılar, hedef istasyon ile veri alışverişini kendilerine tahsis edilen kanallar ile sağlamaktadır. Kanalların birbiri ile olabilecek olan etkileşimlerin önüne geçmek için koruma bandı kullanılmaktadır [20].

2.6.3. Kod Bölmeli Çoklu Erişim

Kod bölmeli çoklu erişim yönteminde, sistem içerisinde bulunan farklı kullanıcıların verileri yayılma kodu (spreading codes) ile modüle edilir. Alıcı tarafında, yayılma kod yapısını ayrıştırarak yapı ile farklı kullanıcı verilerini birbirinden ayırabilir. Böylece hücre-içi etkileşimi olmadan veri haberleşmesi sağlanmış olur. KBÇE yönteminde en yaygın kullanım alanına sahip yayılma kodu “doğrudan sıralı” (direct sequence)’dır [20].

2.6.4. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama

Dikgen frekans bölmeli çoğullama yönteminde, veri alışverişi işlemi sırasında kullanılan haberleşme kanalı frekans bölgesinde birbirine dikgen N adet alt kanala bölünmektedir. Gönderilmek istenilen mesaj sinyali de N 'e bölünerek birbirine dikgen olarak bölünmüş olan alt kanallar üzerinden hedef istasyona iletimi yapılmaktadır. Hedef istasyonda ise N parçaya bölünmüş olan mesaj sinyali birleştirilerek bir bütün haline getirilir. DFBÇ tekniğinde belirli bir zaman aralığında sadece bir kullanıcı, mesaj sinyalini iletmek için mevcut bütün alt kanalları kullanmaktadır [21].

2.6.5. Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim

Dikgen frekans bölmeli çoklu erişim yöntemi, dikgen frekans bölmeli çoğullama tekniğinin çok kullanıcılı erişime açık versiyonudur. Diğer bir ifade ile DFBÇE tekniğinde, veri alışverişi sırasında kullanılan N adet alt kanal belirli bir zaman aralığında sistem içerisindeki bütün kullanıcıların erişimine açıktır [22].

Literatürde çok kullanıcılı sistemlerde, dikey iletim teknikleri kullanılarak, veri alışverişi işlemi yapılmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin [23], birinci faz sırasında

"doğrudan sıralı kod bölmeli çoklu erişim" (DS-KBÇE) tekniğini kullanmaktadır. Röle düğümünün kullanıcılarından aldığı sinyalleri demodülasyon ve XOR (joint demodulate-and-XOR forward (JD-XOR-F)) işlemine tabi tutulmasına dair röle protokolü önermektedir. Rölenin kısıtlı işlem kabiliyeti olması durumunda YG tabanlı çalışabileceği ve her bir kullanıcıda en küçük karesel ortalamalı hata (minimum mean square error) (MMSE) alıcı kullanarak hücre-içi etkileşim probleminin çözülebileceği gösterilmektedir. [24] ile çok kullanıcıli sistemlerde hücre-içi etkileşim problemine sistem içerisindeki kullanıcı çiftlerine frekans ve zaman bölmeli dikey iletim kanalları atayarak YG/ÇG/SG tabanlı röleler aracılığı ile veri alışverişinin yapılabileceği gösterilmektedir. Sistem içerisindeki her bir kullanıcıya güç aktarımı yapılmasına dair çalışmalar genişletilmiştir. [27] her bir istasyonun birden fazla antene sahip olduğu çok kullanıcıli ve iki yönlü tek röleli sistem modelini ele almaktadır. [27] ayrıca çoklu erişim ve yayınımlar için sırasıyla DFBÇE ve uzay bölmeli çoklu erişim-UBÇE (space division multiple access-SDMA)/DFBÇ tekniklerini kullanmaktadır. Benzer şekilde [26] da [27] ile aynı sistem modelini kullanmaktadır. [27]'den farklı olarak [26] her iki fazda da DFBÇE tekniğini kullanmaktadır.

Dikey iletim teknikleri kullanılarak iki yönlü röle vasıtasıyla veri alışverişi sürecinde kanal durum bilgisinin mükemmel olmamasının sistem performansı üzerine olabilecek etkiler [47]'de incelenmektedir. [47] tek bir kullanıcı çiftinin ve YG tabanlı iki yönlü J adet rölenin olduğu sistem modelini kullanmaktadır. Kanal kestirimi sırasında oluşan hatadan kaynaklı kanal durum bilgisinin mükemmel olmamasının röle seçimi ve dikey iletim teknikleri üzerine olabilecek etkileri incelenmektedir. Bu duruma ek olarak, kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatadan dolayı sistem performansındaki bozulmalarının önüne geçmek için uyarlamalı güç aktarımı kullanılmaktadır. [49], kullanıcı çiftinin YG tabanlı röle vasıtasıyla veri alışverişi yaptığı bir sistem modeli ele almaktadır. [49] veri alışverişi sürecinde hücre-içi etkileşim problemi için dik frekans bölmeli çoğullama tekniğini kullanmaktadır. [49] aynı zamanda birinci ve ikinci faz sırasında kullanılan kanalların karşılıklı kanallar olmadığını varsaymaktadır. [49] veri alışverişi için kullandığı sistem modeline ilişkin kanal kestirimi ve veri tespiti süreçlerini incelemektedir.

Literatürde çok kullanıcıli ve çoklu röleli sistemlerde, hücre-içi etkileşim probleminin önüne geçmek için çalışmalar mevcuttur. [66] çok kullanıcıli ve ÇG tabanlı çok röleli sistem modeli kullanmaktadır. Hücre-içi etkileşim problemi için [66], DFBÇE tekniğini ve ortak kaynak aktarımı kullanmaktadır. [67], [66] ile aynı sistem modelini ve DFBÇE

tekniklerini kullanmaktadır. [66]'dan farklı olarak [67] röle terminalinin YG tabanlı çalıştığını varsaymaktadır. [67], aynı zamanda herbir kullanıcı çiftine ve röle istasyonuna alt kanal ataması yapmaktadır. [67] güç aktarım tekniklerini kullanarak her bir kullanıcı çiftine atanan alt kanallarına ait toplam oran değerini maksimize ederek kullanıcı çifti ve röle istasyonuna ait en iyi alt kanalı seçmeye çalışmaktadır. [68] çok kullanıcı ve iki yönlü çok röleli sistem modelinde, kullanıcılar sistem içerisindeki röleler vasıtasıyla baz istasyonu ile veri alışverişi yapmaktadır. Hücre-içi etkileşim problemi için DFBÇE tekniğini kullanmaktadır. [69], K kullanıcı çiftinin M adet YG tabanlı iki yönlü röle vasıtasıyla veri alışverişi yaptığı bir sistem modelini ele almaktadır. Hücre-içi etkileşim problemi için ortak güç aktarımı ve DFBÇE tekniği yardımıyla alt taşıyıcılar atamaktadır. [70]'de herbiri tek bir antene sahip N adet kaynak istasyonunun hedef istasyon ile M adet röle içerisinden seçilen röle aracılığı ile veri alışverişi yapmaktadır. Seçim stratejisi olarak alınan SEGO değeri kullanılmaktadır. Hücre-içi etkileşim probleminin önüne geçmek için rölede KBÇE yöntemi kullanılmaktadır. [71]'de M adet kullanıcı çifti, K adet ÇG tabanlı iki yönlü röle aracılığı ile veri alışverişi yapmaktadır. Sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşacak olan hücre-içi etkileşim problemini ortak röle seçimi ve her bir kullanıcı çiftine birbirine dikey alt kanallar atayarak çözüm bulmaya çalışmaktadır.

Dikey iletim teknikleri, hücre-içi etkileşim problemine çözüm olmasına rağmen, kanalın iyi durumundan tam olarak fayda sağlamayabilir. Bunun yanı sıra, rölede bazı sinyal işleme süreçlerine de gereksinim duyulabilir. Diğer taraftan röledeki sinyal işleme süreci güç tüketimini de arttırabilir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Çok kullanıcılı YG tabanlı iki yönlü kablosuz röleli ağlarda, sistem içerisinde bulunan kullanıcı çiftleri aynı anda iki yönlü röle yardımı ile veri alışverişi yapmaktadır. Bu işlem sonucunda her bir kullanıcı çiftinde oluşan hücre-içi etkileşim probleminin çözümüne yönelik bölüm 2’de bahsedilen yöntemlerden farklı olarak alternatif bir metod önerilmiştir. Alternatif metod, her bir kullanıcı çiftinin toplam kapasitelerinin hesaplandığı ve her bir zaman aralığında maksimum toplam kapasiteye sahip olan kullanıcı çiftinin seçilerek haberleşmesine izin verilmesine dayanmaktadır. Bu süreç sırasında diğer kullanıcı çiftleri haberleşme sürecine katılmayarak sessiz kalmaktadır. Alternatif metod, FEKS metodu olarak adlandırılmaktadır. Diğer taraftan, literatürde yaygın bir kullanım alanına sahip MM tabanlı kullanıcı çifti seçimine ilişkin çıkarımlarda bulunulmuştur. FEKS metodu, AAİ modeli ve MM tabanlı kullanıcı çifti seçim stratejisi ile karşılaştırılarak üstün yönleri bölüm 3.1’de ortaya koyulmuştur.

Kanal durum bilgisi, kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatadan veya geri bildirim gecikmesinden dolayı ideal bir şekilde elde edilememektedir. Bu durumun AAİ modeli, FEKS ve MM metodları üzerine olabilecek etkileri bölüm 3.2’de incelenmiştir.

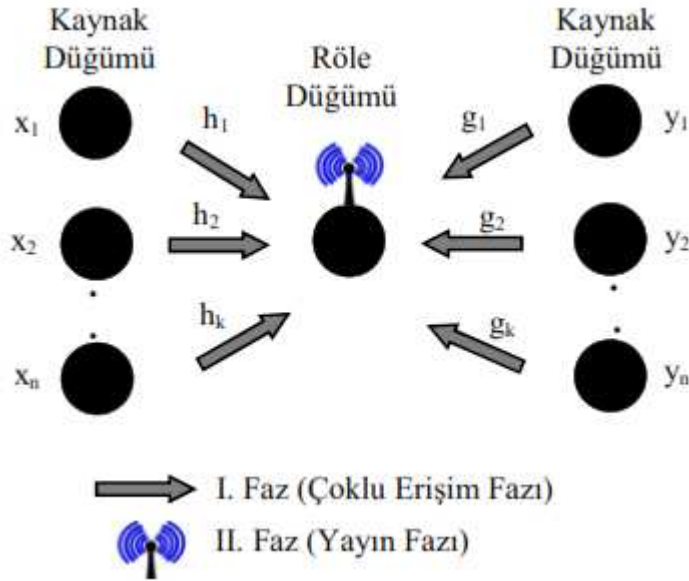
Sistem modeli içerisindeki diğer kullanıcılardan kaynaklı etkileşimlerin yanı sıra, dış kaynaklı istasyonlardan kaynaklı oluşabilecek eş-kanal etkileşimlerin AAİ modeli ve FEKS metodu üzerine olan etkileri bölüm 3.3’te incelenmiştir.

Bölüm 3.4’te sistem modelinin birden fazla röle içerdiği durum ile tek röleli durumdaki AAİ modeli, FOEKRS ve MM metodları ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Monte-Carlo benzetim sonuçları analitik ve asimptotik sonuçlar ile doğrulanmıştır.

3.1. ÇOK KULLANICILI İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ HABERLEŞME MODELİ

Çok kullanıcılı iki yönlü kablosuz röleli ağ haberleşme modeli şekil 3.1’de gösterilmiştir. Sistem modeli içerisinde bulunan x_k ve y_k , $k \in \{1, \dots, N\}$, birbirlerinin eş kullanıcıla-

rıdır. x_k ve y_k kullanıcıları arasında gölgeleme (shadowing) etkisinden dolayı herhangi bir direkt hat bulunmamaktadır. Veri alışverişi işleminin tamamı iki yönlü kablosuz röle aracılığı ile yapılmaktadır. Her bir istasyon bir adet çok-yönlü antene sahiptir. Kullanılan iki yönlü röle, yarı çift-yönlü (half-duplex) olarak çalışmaktadır. Diğer bir ifade ile röle istasyonu, sinyal alım ve iletim işlemlerini aynı anda yapamamaktadır. Kullanılan röle YG tabanlı çalışmaktadır.



Şekil 3.1: Çok kullanıcıli iki yönlü kablosuz röleli ağ modeli.

3.1.1. Aynı Anda İletim Modeli

AAİ modelinde veri alışveriş işleminin tamamı iki fazda gerçekleşmektedir. Birinci fazda (çoklu erişim fazı), sistem içerisinde bulunan bütün kullanıcılar verilerini aynı anda röle istasyonuna gönderirler. İkinci fazda (yayın fazı) röle istasyonu kullanıcı çiftlerinden aldığı veriyi yükseltip kullanıcı çiftlerine geri yayınlamaktadır. Birinci faz sonrasında röle istasyonunda alınan sinyal (3.1) ile ifade edilir.

$$Z_r = \sum_{k=1}^N x_k h_k \sqrt{P_s} + \sum_{k=1}^N y_k g_k \sqrt{P_s} + n_r \quad (3.1)$$

x_k ve y_k ifadeleri, eş kullanıcılar için verileri ifade etmektedir. Birim enerjiye sahiptirler ve $\mathbb{E}[|x_k|^2] = 1$, $\mathbb{E}[|y_k|^2] = 1$ ile ifade edilir. N ifadesi, sistem içerisinde bulunan toplam kullanıcı çifti sayısını ifade etmektedir. h_k ve g_k , $\forall k \in \{1, \dots, N\}$ sırasıyla x_k kullanıcısı

ile röle arasındaki kanal katsayısını ve y_k kullanıcısı ile röle arasındaki kanal katsayısını ifade etmektedir. Birinci faz sırasında kullanılan h_k ile ikinci faz sırasında kullanılan h_k birbiri ile aynı ve karşılıklı kanallardır. Bu durum g_k için de geçerlidir. h_k 'lar birbirinden bağımsız sıfır ortalamalı ve varyansı $\sigma_{h_k}^2$ olan karmaşık Gauss rastgele değişkenleridir. ($h_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{h_k}^2)$). Benzer şekilde g_k 'lar da birbirinden bağımsız ve ($g_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{g_k}^2)$). Bütün kanalların genliklerinin Rayleigh düz-sönümlmeli (Rayleigh flat-fading) dağılımına sahip olduğu varsayılmıştır. P_s , her bir kullanıcının iletim gücünü ifade etmektedir. n_r , rölede oluşan ısı gürültüyü (thermal noise) ifade etmektedir. n_r 'nin ortalaması sıfır ve varyansı N_o 'dır. Röle düğümü kullanıcı çiftlerinden gelen sinyalleri G yükseltme katsayısı ile yükseltir. Yükseltme katsayısı (3.2) ile ifade edilir.

$$G = \frac{\sqrt{P_r}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N P_s |h_k|^2 + \sum_{k=1}^N P_s |g_k|^2 + N_o}} \quad (3.2)$$

P_r , röle düğümünün iletim gücünü ifade etmektedir ve yayın fazında (II. fazda) yükseltilmiş sinyallerin kullanıcı çiftlerine iletimi sırasında kullanılır. II. faz sonrasında x_k ve y_k kullanıcılarında alınan sinyaller, Z_{X_k} ve Z_{Y_k} , sırasıyla (3.3) ve (3.4) ile ifade edilir.

$$Z_{X_k} = G Z_r h_k + n_{x_k} \quad (3.3)$$

$$Z_{Y_k} = G Z_r g_k + n_{y_k} \quad (3.4)$$

n_{x_k} ve n_{y_k} sırasıyla x_k ve y_k kullanıcılarında oluşan ısı gürültüleri ifade etmektedir. Z_r , (3.1), ifadesi (3.3) ve (3.4)'te yerine yazıldığında x_k ve y_k kullanıcılarında alınan sinyallerin genişletilmiş halleri sırasıyla (3.5) ve (3.6) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} Z_{X_k} &= G x_k h_k^2 \sqrt{P_s} + G y_k g_k h_k \sqrt{P_s} \\ &+ G \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i h_i h_k \sqrt{P_s} + G \sum_{i=1, i \neq k}^N y_i g_i h_k \sqrt{P_s} \\ &+ G h_k n_r + n_{x_k} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}
Z_{Y_k} &= Gy_k g_k^2 \sqrt{P_s} + Gx_k g_k h_k \sqrt{P_s} \\
&+ G \sum_{i=1, i \neq k}^N y_i g_i g_k \sqrt{P_s} + G \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i h_i g_k \sqrt{P_s} \\
&+ Gg_k n_r + n_{y_k}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

(3.5) ve (3.6)'da, birinci satır sol taraftaki ifadeler, x_k ve y_k kullanıcılarının kendi gönderdiği verilerdir. Bu ifadeler, kendi etkileşim iptali (self-interference cancellation) yöntemi veya yankı iptali (echo cancellation) yöntemi ile toplam sinyal içerisinde çıkarılabilir. Birinci satır sağ taraftaki ifadeler x_k ve y_k kullanıcılarının kendi eş kullanıcılarından beklediği veriyi ifade etmektedir. Başka bir ifade ile yararlı bilgiyi (useful information) ifade etmektedir. (3.5) ve (3.6)'da ikinci satırlar diğer kullanıcı çiftlerinden gelen verileri ifade etmektedir. Bu veri grubu her bir kullanıcıda hücre-içi etkileşim probleminin oluşmasına sebep olmaktadır. Başka bir ifadeyle her bir kullanıcıda yorucu veri (harmful information) olarak işlem görmektedir. Diğer taraftan, üçüncü satır sol taraftaki ifadeler sırası ile x_k ve y_k kullanıcılarına iletilen gürültünün yükseltilmiş halini ifade etmektedir. Bu duruma, rölenin YG tabanlı çalışmasından dolayı birinci faz sonrasında bütün kullanıcı çiftlerinden gelen veriler ile birlikte oluşan gürültünün yükseltilmesi sebep olmaktadır. YG tabanlı çalışan rölelerdeki en büyük dezavantaj, alınan sinyalin yükseltilmesinin yanısıra gürültünün de aynı zamanda yükseltilmesidir. Benzer şekilde, üçüncü satır sağ taraftaki ifadeler sırası ile x_k ve y_k kullanıcılarında oluşan ısı gürültüyü ifade etmektedir. (3.5) ve (3.6) yardımıyla, x_k ve y_k kullanıcılarındaki sinyal etkileşim gürültü oranı (SEGO) (signal-to-interference noise ratio-SINR) (3.7) ve (3.8) ile ifade edilir.

$$\gamma_{X_k} = \frac{G^2 P_s |g_k|^2 |h_k|^2}{\left[G^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |h_i|^2 |h_k|^2 P_s + G^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |g_i|^2 |h_k|^2 P_s + G^2 |h_k|^2 N_0 + N_0 \right]} \tag{3.7}$$

$$\gamma_{Y_k} = \frac{G^2 P_s |g_k|^2 |h_k|^2}{\left[G^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |g_i|^2 |g_k|^2 P_s + G^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |g_k|^2 |h_i|^2 P_s + G^2 |g_k|^2 N_0 + N_0 \right]} \tag{3.8}$$

G yükseltme katsayısını (3.7) ve (3.8)'de yerine yazıldığında ve matematiksel işlemler sonucunda γ_{X_k} , (3.7), ifadesi (3.9) ile tekrar ifade edilir.

$$\gamma_{X_k} = \frac{\frac{P_s P_r |h_k|^2 |g_k|^2}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |h_i|^2 + \sigma^2 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |g_i|^2 + \sigma^2 \right]}}{\frac{P_r |h_k|^2}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |g_i|^2 + \sigma^2 \right]} + \frac{P_r |h_k|^2}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |h_i|^2 + \sigma^2 \right]} + \frac{P_s |h_k|^2 + P_s |g_k|^2}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |h_i|^2 + \sigma^2 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |g_i|^2 + \sigma^2 \right]}} + 1 \quad (3.9)$$

Sistem içerisindeki her bir kullanıcı çiftinin ve rölenin eş iletim gücüne sahip olduğu ve bu değer P 'ye eşit olduğu varsayılmıştır ($P_s = P_r = P$). Burada, $\gamma_x = \frac{P|h_k|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_y = \frac{P|g_k|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_{xi} = \frac{P|h_i|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_{yi} = \frac{P|g_i|^2}{\sigma^2}$, $\forall i \neq k$. (3.9) ifadesi, (3.10)'daki gibi sadeleştirilir.

$$\gamma_{X_k} = \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{x_i} + 1 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{y_i} + 1 \right]}}{\frac{\gamma_x}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{y_i} + 1 \right]} + \frac{\gamma_x}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{x_i} + 1 \right]} + \frac{\gamma_x + \gamma_y}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{x_i} + 1 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{y_i} + 1 \right]}} + 1 \quad (3.10)$$

Benzer şekilde, γ_{Y_k} ifadesi (3.11)'deki gibi ifade edilir.

$$\gamma_{Y_k} = \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{x_i} + 1 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{y_i} + 1 \right]}}{\frac{\gamma_y}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{y_i} + 1 \right]} + \frac{\gamma_y}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{x_i} + 1 \right]} + \frac{\gamma_x + \gamma_y}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{x_i} + 1 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{y_i} + 1 \right]}} + 1 \quad (3.11)$$

3.1.2. Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

FEKS metodu, kontrol biriminin veri alışverişi süreci başlamadan önce sistem içerisinde bulunan her bir kullanıcı çiftinin toplam kapasitesini hesaplayarak maksimum toplam kapasiteye sahip olan kullanıcı çiftinin seçilmesi işlemine dayanmaktadır. Her bir zaman aralığında sadece seçilen kullanıcı çiftinin veri alışverişi yapmasına izin verilmektedir. Diğer kullanıcı çiftlerinin veri alışverişi işlemine katılmasına izin verilmez. Bu süreç sonunda, sistem içerisinde bulunan diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşan hücre-içi etkileşim problemi ortadan kaldırılmış olur. Her bir kullanıcı çiftine ait toplam kapasite ifadesi (3.12) ile formülize edilir.

$$TK_k^{FEKS} = \frac{1}{2N} [\log_2 (1 + \gamma_{X_k}) + \log_2 (1 + \gamma_{Y_k})] \quad (3.12)$$

(3.12) ifadesindeki $\frac{1}{2}$ logaritma ön eki, veri alışverişi işleminin toplamda iki fazda (çoklu erişim fazı ve yayın fazı) tamamlandığını ifade etmektedir. N ifadesi, sistem içerisinde bulunan toplam kullanıcı çifti sayısını belirtmektedir. Her bir zaman aralığında N adet kullanıcı çifti arasından maksimum toplam kapasiteye sahip olan kullanıcı çiftinin seçilmesinden dolayı N ifadesi paydada bulunmaktadır. Bu durum toplam kapasite ifadesini kısıtlayan bir etmendir. Diğer bir ifade ile ceza faktörü (penalty factor) olarak da tanımlanır. Köşeli parantezin sol tarafındaki ifade x_k kullanıcıasına, sağ taraftaki ifade ise y_k kullanıcıasına ait kapasite eşitliğini temsil etmektedir. γ_{X_k} ve γ_{Y_k} ifadeleri, FEKS işleminin sonra x_k ve y_k eş kullanıcılarında kaydedilen SGO'yu ifade etmektedir. (3.12) ile sistem içerisinde bulunan her bir kullanıcı çiftine ait toplam kapasiteler hesaplanmaktadır. (3.13) ifadesi yardımıyla her bir zaman aralığında maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çifti seçilir ve sadece seçilen kullanıcı çiftlerinin veri alışverişi yapmasına izin verilir.

$$S = \arg \max_{k=1, \dots, N} [\text{TK}_1^{\text{FEKS}}, \dots, \text{TK}_N^{\text{FEKS}}] \quad \forall k \in \{1, \dots, N\} \quad (3.13)$$

(3.12) ve (3.13)'e göre uygun kullanıcı çifti seçim işlemi yapıldıktan sonra birinci faz sonrasında rölede alınan sinyal (3.14) ile ifade edilir.

$$Z_{s_r} = x_k h_k \sqrt{P_s} + y_k g_k \sqrt{P_s} + n_r \quad (3.14)$$

II. fazda röle düğümü (3.14)'i yükselterek kullanıcı çiftine yayınlar. G yükseltme katsayısı (3.15) ile tekrar hesaplanır.

$$G = \frac{\sqrt{P_r}}{\sqrt{P_s |h_k|^2 + P_s |g_k|^2 + N_0}} \quad \forall k \in \{1, \dots, N\} \quad (3.15)$$

II. faz sonrası x_k ve y_k kullanıcılarında alınan sinyaller (3.16) ve (3.17) ile ifade edilir.

$$Z_{X_k} = G x_k h_k^2 \sqrt{P_s} + G y_k g_k h_k \sqrt{P_s} + G h_k n_r + n_{x_k} \quad (3.16)$$

$$Z_{Y_k} = G y_k g_k^2 \sqrt{P_s} + G x_k g_k h_k \sqrt{P_s} + G g_k n_r + n_{y_k} \quad (3.17)$$

(3.16) ve (3.17) ifadelerinde, FEKS işleminden sonra x_k ve y_k kullanıcılarında diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşan hücre-içi etkileşim problemi bulunmamaktadır. (3.16) ve (3.17) ifadelerine mükemmel kendi etkileşim iptali uygulandığında, x_k ve y_k kullanıcı-

cılarında alınan SGO ifadeleri sırasıyla (3.18) ve (3.19) ile ifade edilir.

$$\gamma_{X_k} = \frac{G^2 P_s |g_k|^2 |h_k|^2}{G^2 |h_k|^2 N_o + N_o} \quad (3.18)$$

$$\gamma_{Y_k} = \frac{G^2 P_s |g_k|^2 |h_k|^2}{G^2 |g_k|^2 N_o + N_o} \quad (3.19)$$

G, (3.15), yükseltme katsayısı (3.18) ve (3.19)'da yerine yazılırsa x_k ve y_k kullanıcılarındaki SGO ifadeleri (3.20) ve (3.21)'deki gibi tekrar formülize edilir.

$$\gamma_{X_k} = \frac{P_r P_s |g_k|^2 |h_k|^2}{P_r |h_k|^2 + P_s (|h_k|^2 + |g_k|^2) + 1} \quad (3.20)$$

$$\gamma_{Y_k} = \frac{P_r P_s |g_k|^2 |h_k|^2}{P_r |g_k|^2 + P_s (|h_k|^2 + |g_k|^2) + 1} \quad (3.21)$$

3.1.3. Performans Analizi

3.1.3.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı

Bu alt bölüm sistem modelinin servis dışı kalma olasılığını (outage probability) incelemektedir. Servis dışı kalma olasılığı, başarılabilir kapasitenin önceden belirlenmiş hedef eşik değerini, (γ_{th}), (bit/saniye/Hz)(bits/sec /Hz) destekleyememe olasılığını vermektedir. Bir başka ifade ile servis dışı kalma olasılığı, SGO veya SEGO değerinin γ_{th} 'deki CDF'ine eşittir [51].

Aynı Anda İletim Modeli

AAİ modelinde, γ_{X_k} ve γ_{Y_k} ifadelerinin CDF'ini hesaplayabilmek için sırasıyla (3.10) ve (3.11) ifadeleri $\frac{X.Y}{X+Y} \leq \min(X, Y)$ ile (3.22) ve (3.23) ile üst-sınır yapılır.

$$\gamma_{X_k} \leq \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{\gamma_A \gamma_B}}{\frac{\gamma_x (\gamma_A + \gamma_B + 1) + \gamma_y}{\gamma_A \gamma_B}} = \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{(\gamma_A + \gamma_B + 1)}}{\gamma_x + \frac{\gamma_y}{(\gamma_A + \gamma_B + 1)}} \leq \gamma_{X_k}^{ust} = \min\left(\gamma_x, \frac{\gamma_y}{\gamma_A + \gamma_B + 1}\right) \quad (3.22)$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{(\gamma_A + \gamma_B + 1)}}{\gamma_y + \frac{\gamma_x}{(\gamma_A + \gamma_B + 1)}} \leq \gamma_{Y_k}^{ust} = \min\left(\gamma_y, \frac{\gamma_x}{\gamma_A + \gamma_B + 1}\right) \quad (3.23)$$

Burada, $\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{x_i} + 1 = \gamma_A$ ve $\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{y_i} + 1 = \gamma_B$ 'ye eşittir. $\gamma_{X_k}^{ust}$ ve $\gamma_{Y_k}^{ust}$ ifadelerinin alt

sınır CDF ifadeleri sırasıyla (3.24) ve (3.25) ile hesaplanır.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \left(\frac{((P\Omega_{gk})^2 / P\Omega_f)^M}{(\gamma + P\Omega_{gk} / P\Omega_f)^{2M+1}} \right) \exp \left(-\gamma \left(\frac{1}{P\Omega_{hk}} + \frac{3}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \quad (3.24)$$

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \left(\frac{((P\Omega_{hk})^2 / P\Omega_f)^M}{(\gamma + P\Omega_{hk} / P\Omega_f)^{2M+1}} \right) \exp \left(-\gamma \left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{3}{P\Omega_{hk}} \right) \right) \quad (3.25)$$

İspat: EK-1, Bölüm A.1.

(3.24) ve (3.25)'te, Ω_{g_k} , Ω_{h_k} ve $\Omega_f = \Omega_g = \Omega_h$ ifadeleri sırasıyla $|g_k|^2$, $|h_k|^2$ ve $(|g_i|^2, i \neq k$ ve $|h_i|^2, i \neq k)$ ifadelerinin ortalama değerini temsil etmektedir. AAİ modeli için toplam kapasite eşitliği, [78] 'deki yaklaşım metodu kullanılarak (3.26)'daki $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ problemine dönüştürülür.

$$\begin{aligned} \text{TK}_{(\text{AAI})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) &= \left[\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \log_2(1 + \gamma_{X_k}) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \log_2(1 + \gamma_{Y_k}) \right] \leq R \\ &\equiv \frac{\gamma_{X_k} \gamma_{Y_k}}{\gamma_{X_k} + \gamma_{Y_k}} \leq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \\ &\equiv \min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k}) \leq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Burada, $\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \triangleq \frac{2^R - 1}{2}$ değerine eşittir.

İspat: EK-1, Bölüm A.3.

$\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ ifadesinin CDF'i (3.27) ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} F_{\text{AAI}}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) &= 1 - \left[\left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N} e^{-\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left(\frac{3}{P\Omega_{hk}} + \frac{3}{P\Omega_{gk}} \right)} \right] \end{aligned} \quad (3.27)$$

İspat: EK-1, Bölüm A.4.

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

FEKS metodu uygulandıktan sonra x_k ve y_k kullanıcılarında elde edilen SGO ifadeleri, (3.20) ve (3.21), $\frac{X \cdot Y}{X+Y} \leq \min(X, Y)$ ile üst sınırları (3.28) ve (3.29) ile ifade edilir.

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{\text{ust}} = \min \left(\frac{P|g_k|^2}{2}, P|h_k|^2 \right) = \min (A, B) \quad (3.28)$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} = \min \left(\frac{P|h_k|^2}{2}, P|g_k|^2 \right) = \min (C, D) \quad (3.29)$$

$\gamma_{X_k}^{\text{ust}}$ ve $\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}$ ifadelerinin CDF'leri sırasıyla (3.30) ve (3.31) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp \left(-\gamma \left(\frac{1}{P\Omega_{h_k}} + \frac{2}{P\Omega_{g_k}} \right) \right) \quad (3.30)$$

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp \left(-\gamma \left(\frac{1}{P\Omega_{g_k}} + \frac{2}{P\Omega_{h_k}} \right) \right) \quad (3.31)$$

İspat: EK-1, Bölüm A.2.

Toplam kapasite ifadesi, [78] yardımı ile (3.32)'de gösterildiği gibi harmonik ortalama (HO) problemine dönüştürülür.

$$\begin{aligned} \text{TK}_{\text{FEKS}} &= \left[\frac{1}{2N} \log_2(1 + \gamma_{X_k}) + \frac{1}{2N} \log_2(1 + \gamma_{Y_k}) \right] \leq R \\ &\equiv \frac{2}{\frac{1}{\gamma_{X_k}} + \frac{1}{\gamma_{Y_k}}} \leq \gamma_{\text{th}} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Burada $\gamma_{\text{th}} \triangleq 2^{NR} - 1$ değerine eşittir.

İspat: EK-1, Bölüm A.5.

HO ifadesinin CDF'i [79] yardımıyla (3.33) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} F_{\text{FEKS}}(\gamma_{\text{th}}) &= 1 - \gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{P\Omega_{h_k}} + \frac{2}{P\Omega_{g_k}} \right) \left(\frac{2}{P\Omega_{h_k}} + \frac{1}{P\Omega_{g_k}} \right)} \\ &\quad \times \exp \left(\frac{-\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{3}{P\Omega_{h_k}} + \frac{3}{P\Omega_{g_k}} \right) \right) \\ &\quad \times K_1 \left(\gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{P\Omega_{h_k}} + \frac{2}{P\Omega_{g_k}} \right) \left(\frac{2}{P\Omega_{h_k}} + \frac{1}{P\Omega_{g_k}} \right)} \right) \end{aligned} \quad (3.33)$$

Burada, $K_1(\cdot)$ değiştirilmiş (modified) birinci tür Bessel fonksiyonunu [82, Eq. (8.432.1)] ifade etmektedir. Her bir zaman aralığında maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çifti seçim işlemine ait CDF ifadesi [80] yardımıyla (3.34) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{FEKS}}(\gamma_{\text{th}}) &= \prod_{k=1}^N \left[1 - \gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{gk}}}\right) \left(\frac{2}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{1}{P\Omega_{\text{gk}}}\right)} \right. \\
&\quad \times \exp\left(\frac{-\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{3}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{3}{P\Omega_{\text{gk}}}\right)\right) \\
&\quad \left. \times K_1\left(\gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{gk}}}\right) \left(\frac{2}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{1}{P\Omega_{\text{gk}}}\right)}\right) \right] \quad (3.34)
\end{aligned}$$

Maksimum-Minimum Metodu

Bu bölümde, en uygun kullanıcı çifti seçim işlemi MM tabanlı seçim metodu [33] kullanılarak sistem performansı değerlendirilmeye çalışılmaktadır. Her bir kullanıcı çiftine ait MM ifadesi (3.35) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{MM}}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) &= \Pr(\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}}) \leq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) \\
&= 1 - \Pr(\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}}) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) \\
&= 1 - \Pr\left(\min\left(\frac{P|g_k|^2}{2}, P|h_k|^2\right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}, \min\left(\frac{P|h_k|^2}{2}, P|g_k|^2\right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}\right) \\
&= 1 - \Pr\left(\min\left(P|g_k|^2 \geq 2\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}, P|h_k|^2 \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}, \right. \right. \\
&\quad \left. \left. P|h_k|^2 \geq 2\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}, P|g_k|^2 \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}\right)\right) \\
&= 1 - \left[1 - F_{|g_k|^2}\left(\frac{2\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}}{P}\right)\right] \left[1 - F_{|h_k|^2}\left(\frac{2\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}}{P}\right)\right] \\
&= 1 - \exp\left(-\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{2}{P\Omega_{g_k}} + \frac{2}{P\Omega_{h_k}}\right)\right) \quad (3.35)
\end{aligned}$$

Burada, $\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} = 2^{2NR} - 1$ değerine eşittir.

Sıralı istatistikler [80] yardımıyla, minimum SGO ifadesini maksimum yapan kullanıcı çifti (3.36) ile formülize edilir.

$$F_{\text{MM}}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) = \prod_{k=1}^N \left[1 - \exp\left(-\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{2}{P\Omega_{g_k}} + \frac{2}{P\Omega_{h_k}}\right)\right) \right] \quad (3.36)$$

3.1.3.2. Hata Olasılığı

Bu alt bölüm, sistem modelinin hata olasılığını incelemektedir. Hata olasılığı, kablosuz haberleşme sistemlerinde sistem performansını ölçmek için kullanılan önemli bir performans ölçütüdür. Analitik hata olasılığı hesaplamaları için standart CDF tabanlı hata olasılığı formülü, (3.37), kullanılmıştır [55].

$$\bar{P}_h = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{b}{\pi}} \int_0^\infty \frac{\exp(-bx)}{\sqrt{x}} F_X(x) dx \quad (3.37)$$

Burada, $a = b = 1$ durumu BPSK modülasyonunu, $a = b = 2$ durumu QPSK modülasyonunu ifade etmektedir. Tez çalışması sırasında hata olasılığı çıkarımlarında BPSK modülasyonu kullanılmıştır.

Aynı Anda İletim Modeli

AAİ modeline ait CDF ifadesinin, (3.27), karmaşık formundan dolayı Monte-Carlo benzetimi kullanılarak hata olasılığı performans analizine yer verilmiştir.

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

FEKS metodunda hata olasılığı ifadesini hesaplamak için (3.34) ifadesi yüksek SGO yaklaşımı ile Bessel fonksiyon ifadesi $K_1(\cdot) \approx \frac{1}{x}$ şeklinde ifade edilebilir [82]. Bu kapsamda, (3.34) ifadesi (3.38) ile ifade edilir.

$$F_{\text{FEKS}}(\gamma_{\text{th}}) = \prod_{k=1}^N \left[1 - \exp\left(\frac{-\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{3}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{3}{P\Omega_{\text{gk}}}\right)\right) \right] \quad (3.38)$$

(3.38) ifadesi özdeş çarpım (identity product) [81] gösterilimi, (3.39), ile (3.40)'taki gibi ifade edilir.

$$\prod_{k=1}^N (1 - x_k) = \sum_{k=0}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \dots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \prod_{p=1}^k (x_{n_p}) \quad (3.39)$$

$$\prod_{k=1}^N \left(1 - \exp \left(\frac{-\gamma_{th}}{2} A_k \right) \right) = \sum_{k=0}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \dots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(-\frac{x}{2} \sum_{p=1}^k A_{n_p} \right) \right) \quad (3.40)$$

Burada, $A_k = \frac{3}{P\Omega_{h_k}} + \frac{3}{P\Omega_{g_k}}$ 'dir.

(3.40) ifadesi, (3.37)'de yerine yazıldığında ve integral ifadesi [82, Eq. (3.361.2⁸)] yardımı ile çözüldüğünde (3.41) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned} \bar{P}_h^{\text{FEKS}} &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \dots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-x)}{\sqrt{x}} \left(\exp \left(-\frac{x}{2} \sum_{p=1}^k A_{n_p} \right) \right) dx \\ &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \dots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \int_0^{\infty} \frac{\exp \left(-\frac{x}{2} \left(\sum_{p=1}^k A_{n_p} + 2 \right) \right)}{\sqrt{x}} dx \\ &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \dots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \sqrt{\frac{\pi}{\left(\frac{1}{2} \sum_{p=1}^k \left(\left(\frac{3}{P\Omega_{g_{n_p}}} + \frac{3}{P\Omega_{h_{n_p}}} \right) + 2 \right) \right)}} \quad (3.41) \end{aligned}$$

Maksimum-Minimum Metodu

MM tabanlı CDF ifadesi, (3.36), özdeş çarpım gösterilimi kullanılarak (3.42) ile tekrar formülize edilir.

$$\prod_{k=1}^N (1 - x_k) = \sum_{k=0}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \dots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(-x \sum_{p=1}^k A_{n_p} \right) \right) \quad (3.42)$$

(3.42) ifadesi CDF tabanlı hata olasılığı formülünde, (3.37), yerine yazıldığında integral ifadesi [82, Eq. 3.361.2⁸] eşitliği yardımı ile çözümlenerek (3.43) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
\bar{P}_h^{\text{MM}} &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \cdots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \int_0^\infty \frac{\exp(-x)}{\sqrt{x}} \left(\exp \left(-x \sum_{p=1}^k A_{n_p} \right) \right) dx \\
&= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \cdots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \int_0^\infty \frac{\exp \left(-x \left(\sum_{p=1}^k A_{n_p} + 1 \right) \right)}{\sqrt{x}} dx \\
&= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \cdots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \sqrt{\frac{\pi}{\sum_{p=1}^k \left(\left(\frac{2}{P\Omega_{g_p}} + \frac{2}{P\Omega_{h_p}} \right) + 1 \right)}} \quad (3.43)
\end{aligned}$$

3.1.3.3. Başarılabilir Kapasite

Aynı Anda İletim Modeli

Kablosuz haberleşmede kullanılan diğer bir performans ölçütü ise başarılabilir kapasitedir. AAİ modeli için başarılabilir kapasite ifadesi (3.44) ile ifade edilir [55].

$$R = \frac{1}{2} \left[\mathbb{E} \left(\log_2 \left(1 + \gamma_{X_k}^{\text{ust}} \right) \right) + \mathbb{E} \left(\log_2 \left(1 + \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} \right) \right) \right] \quad (3.44)$$

x hattı kullanıcılarına ait başarılabilir kapasite değeri ve CDF tabanlı kapasite ifadesinin ortalama değer ifadeleri [55] yardımı ile sırasıyla (3.45) ve (3.46) ile ifade edilir.

$$R_{X_k^{\text{ust}}} = \frac{1}{2\ln_2} \left(1 + \gamma_{X_k}^{\text{ust}} \right) \quad (3.45)$$

$$\mathbb{E}(R_{X_k^{\text{ust}}}) = \frac{1}{2\ln_2} \int_0^\infty \frac{1 - F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma)}{1 + \gamma} d\gamma \quad (3.46)$$

(3.24) ifadesi (3.46)'da yazıldığında integral ifadesi karmaşık bir forma dönüştüğü için alternatif olarak başarılabilir kapasite ifadesi Jensen'in eşitsizliği (Jensen's inequality) kullanılarak (3.47) ile ifade edilir [51].

$$R \leq \frac{1}{2} \left[\log_2 \left(1 + \mathbb{E} \left(\gamma_{X_k}^{\text{ust}} \right) \right) + \log_2 \left(1 + \mathbb{E} \left(\gamma_{Y_k}^{\text{ust}} \right) \right) \right] \quad (3.47)$$

γ_{X_k} ifadesinin ortalama değeri (3.48) ile ifade edilir [51].

$$\mathbb{E}(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}) = \int_0^\infty (1 - F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(x)) dx \quad (3.48)$$

(3.24) ifadesi (3.48)'de yerine yazıldığında ve integral ifadesi [82, Eq. (3.353.2⁷)] yardımıyla çözümlenerek (3.49) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}) &= \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^{N-1} ((P\Omega_{g_k})^2 / P\Omega_g)^{N-1} \left[\frac{1}{(2N-2)!} \sum_{k=1}^{2N-2} (k-1)! \right. \\ &\quad \times \left(-\left(\frac{1}{P\Omega_{h_k}} + \frac{3}{P\Omega_{g_k}}\right) \right)^{2N-k-2} \left(\frac{P\Omega_{g_k}}{P\Omega_g}\right)^{-k} - \frac{\left(-\left(\frac{1}{P\Omega_{h_k}} + \frac{3}{P\Omega_{g_k}}\right)\right)^{2N-2}}{(2N-2)!} \\ &\quad \left. \times \exp\left(\left(\frac{P\Omega_{g_k}}{P\Omega_g}\right)\left(\frac{1}{P\Omega_{h_k}} + \frac{3}{P\Omega_{g_k}}\right)\right) \text{E}_i\left(-\left(\frac{P\Omega_{g_k}}{P\Omega_g}\right)\left(\frac{1}{P\Omega_{h_k}} + \frac{3}{P\Omega_{g_k}}\right)\right) \right] \end{aligned} \quad (3.49)$$

Benzer şekilde $\mathbb{E}(\gamma_{Y_k}^{\text{ust}})$ ifadesi (3.50) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}) &= \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^{N-1} ((P\Omega_{h_k})^2 / P\Omega_g)^{N-1} \left[\frac{1}{(2N-1)!} \sum_{k=1}^{2N-2} (k-1)! \right. \\ &\quad \times \left(-\left(\frac{1}{P\Omega_{g_k}} + \frac{3}{P\Omega_{h_k}}\right) \right)^{2N-k-2} \left(\frac{P\Omega_{h_k}}{P\Omega_g}\right)^{-k} - \frac{\left(-\left(\frac{1}{P\Omega_{g_k}} + \frac{3}{P\Omega_{h_k}}\right)\right)^{2N-2}}{(2N-2)!} \\ &\quad \left. \times \exp\left(\left(\frac{P\Omega_{h_k}}{P\Omega_g}\right)\left(\frac{1}{P\Omega_{g_k}} + \frac{3}{P\Omega_{h_k}}\right)\right) \text{E}_i\left(-\left(\frac{P\Omega_{h_k}}{P\Omega_g}\right)\left(\frac{1}{P\Omega_{g_k}} + \frac{3}{P\Omega_{h_k}}\right)\right) \right] \end{aligned} \quad (3.50)$$

(3.49) ve (3.50) ifadeleri (3.47)'de yerine yazıldığında, AAİ modeli için başarılabilir kapasite ifadesi elde edilir.

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

FEKS metodu için başarılabilir kapasite ifadesi (3.51) ile ifade edilir.

$$R = \frac{1}{2N} \left[\underbrace{\mathbb{E}(\log_2(1 + \gamma_{X_k}^{\text{ust}}))}_{R_{X_k}} + \underbrace{\mathbb{E}(\log_2(1 + \gamma_{Y_k}^{\text{ust}}))}_{R_{Y_k}} \right] \quad (3.51)$$

$$R_{X_k}^{\text{ust}} = \frac{1}{2N \ln 2} (1 + \gamma_{X_k}^{\text{ust}}) \quad (3.52)$$

$$\mathbb{E}(R_{X_k}^{\text{ust}}) = \frac{1}{2N \ln 2} \int_0^\infty \frac{1 - F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma)}{1 + \gamma} d\gamma \quad (3.53)$$

$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}$, (3.30), ifadesi (3.53)'te yerine yazıldığında integral ifadesi [82, Eq. (3.352.4)] yardımıyla çözüldüğünde (3.54) ifadesi elde edilir.

$$\mathbb{E}(R_{X_k}^{\text{ust}}) = \frac{1}{2N \ln 2} \left(\exp \left(\frac{1}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{gk}}} \right) \text{E}_i \left(\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{gk}}} \right) \right) \right) \quad (3.54)$$

Benzer şekilde, $\mathbb{E}(R_{Y_k}^{\text{ust}})$ ifadesi (3.55) ile ifade edilir.

$$\mathbb{E}(R_{Y_k}^{\text{ust}}) = \frac{1}{2N \ln 2} \left(\exp \left(\frac{1}{P\Omega_{\text{gk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{hk}}} \right) \text{E}_i \left(\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{gk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{hk}}} \right) \right) \right) \quad (3.55)$$

(3.54) ve (3.55) ifadeleri (3.51)'de yerine yazıldığında, başarılabılır kapasite ifadesi (3.56) ile ifade edilebilir.

$$R = \frac{1}{2N} \left[\log_2 e \left(\exp \left(\frac{1}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{gk}}} \right) \text{E}_i \left(\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{gk}}} \right) \right) \right) + \log_2 e \left(\exp \left(\frac{1}{P\Omega_{\text{gk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{hk}}} \right) \text{E}_i \left(\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{gk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{hk}}} \right) \right) \right) \right] \quad (3.56)$$

3.1.3.4. *Kapasite Analizi*

Diğer bir önemli performans ölçütü de kanal kapasitesidir. Kanal kapasitesi, hata olasılığının yeterince düşük olduğu durumdaki maksimum iletim oranını ifade etmektedir. Kanal kapasitesi analizi için sondan-sona CDF ifadesi kullanılmıştır.

Aynı Anda İletim Modeli

AAİ modeline ait CDF ifadesinin, (3.27), karmaşık formundan dolayı kapasite analizi Monte-Carlo benzetimi yardımıyla yapılmıştır.

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

Sondan-sona CDF ifadesi kullanılarak standart kapasite formülü (3.57) ile ifade edilir [55].

$$\bar{C}_{\text{FEKS}}(\gamma) = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1 - F_{\text{FEKS}}(\gamma)}{1 + \gamma} d\gamma \quad (3.57)$$

FEKS metodu için asimptotik CDF ifadesi, (3.38), özdeş çarpım gösteriliminde $k = 0$ durumunda (3.58) ile ifade edilir.

$$\prod_{k=1}^N (1 - x_k) = 1 + \sum_{k=1}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \dots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(-\frac{x}{2} \sum_{p=1}^k (x_{n_p}) \right) \right) \quad (3.58)$$

(3.58) ifadesi, (3.57) ifadesinde yerine yazılıp integral ifadesi [82, Eq. (3.352.4)] yardımıyla çözüldüğünde (3.59) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned} \bar{C}_{\text{FEKS}}(\gamma) &= \frac{1}{\ln 2} \sum_{k=1}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \dots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(\frac{1}{2} \sum_{p=1}^k \left(\frac{3}{P\Omega_{h_{n_p}}} + \frac{3}{P\Omega_{g_{n_p}}} \right) \right) \right) \\ &\times E_i \left(-\frac{1}{2} \sum_{p=1}^k \left(\frac{3}{P\Omega_{h_{n_p}}} + \frac{3}{P\Omega_{g_{n_p}}} \right) \right) \end{aligned} \quad (3.59)$$

Maksimum-Minimum Metodu

MM metodu için CDF ifadesi, (3.36), özdeş çarpım [81] ifadesi kullanılarak tekrar ifade edildiğinde ve $k = 0$ durumunda (3.60) ifadesi elde edilir.

$$\prod_{k=1}^N (1 - x_k) = 1 + \sum_{k=1}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \dots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(-x \sum_{p=1}^k (x_{n_p}) \right) \right) \quad (3.60)$$

(3.60) ifadesi (3.57)'de yerine yazıldığında ve integral ifadesi [82, Eq. (3.352.4)] yardımıyla çözüldüğünde kapasite eşitliği, (3.61) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} \bar{C}_{\text{MM}}(\gamma) &= \frac{1}{\ln 2} \sum_{k=1}^N \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^N \dots \sum_{n_k=1}^N}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(\sum_{p=1}^k \left(\frac{2}{P\Omega_{h_{np}}} + \frac{2}{P\Omega_{g_{np}}} \right) \right) \right) \\ &\times E_i \left(- \sum_{p=1}^k \left(\frac{2}{P\Omega_{h_{np}}} + \frac{2}{P\Omega_{g_{np}}} \right) \right) \end{aligned} \quad (3.61)$$

3.1.3.5. Asimptotik Analiz

Önceki bölümlerdeki performans ölçütlerine ilişkin elde edilen sonuçların değerlendirilmesi göreceli olarak daha zordur. Bu durumun yanısıra konuya ilişkin sınırlı bir fikir vermektedir. Bundan dolayı, bu alt bölüm Taylor serilerinin yardımıyla performans ölçütlerinin yüksek SGO bölgesindeki davranışlarını incelemektedir.

Servis Dışı Kalma Olasılığı

Aynı Anda İletim Modeli

Yüksek SGO bölgesinde, $\exp(x)$ ifadesi $\exp(x) \approx 1 + x$ şeklinde ifade edilir [82]. (3.27) ifadesinde gerekli dönüşüm işlemi yapıldığında (3.62) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned} F_{\text{AAI}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) &= 1 - \left[\left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{h_k}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{g_k}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right. \\ &\times \left. \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{h_k}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{g_k}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N} \left(1 - \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left(\frac{3}{P\Omega_{h_k}} + \frac{3}{P\Omega_{g_k}} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (3.62)$$

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

Yüksek SGO yaklaşımıyla $\exp(x) \approx 1 + x$ ve $K_1(\cdot) \approx \frac{1}{x}$ ifadeleri (3.34)'te yerine yazıldığında asimptotik CDF ifadesi (3.63) ile ifade edilir.

$$F_{\text{FEKS}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}) = \prod_{k=1}^N \left[\frac{\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{3}{P\Omega_{h_k}} + \frac{3}{P\Omega_{g_k}} \right) \right] \quad (3.63)$$

Maksimum-Minimum Metodu

(3.36) ifadesi yüksek SGO yaklaşımı ile $\exp(x) \approx 1 + x$, (3.64) ile tekrardan ifade edilir.

$$F_{MM}^{\infty}(\gamma_{th}^{MM}) = \prod_{k=1}^N \left[-\gamma_{th}^{MM} \left(\frac{2}{P\Omega_{g_k}} + \frac{2}{P\Omega_{h_k}} \right) \right] \quad (3.64)$$

Hata Olasılığı

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

(3.64) ifadesi, hata olasılığı formülünde, (3.37), yerine yazıldığında integral ifadesi [82, Eq. (3.351.3)] yardımıyla çözüldüğünde asimptotik hata analizi ifadesi (3.65) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} \bar{P}_{hFEKS}^{\infty}(\gamma) &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \prod_{k=1}^N \frac{3}{2} \left[\left(\frac{1}{P\Omega_{g_k}} + \frac{1}{P\Omega_{h_k}} \right) \right] \int_0^{\infty} x^{N-\frac{1}{2}} \exp(-x) dx \\ &= \frac{\Gamma(N + \frac{1}{2})}{2\sqrt{\pi}} \prod_{k=1}^N \left[\frac{3}{2} \left(\frac{1}{P\Omega_{g_k}} + \frac{1}{P\Omega_{h_k}} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.65)$$

Maksimum-Minimum Metodu

MM metoduna ilişkin asimptotik CDF ifadesi, (3.64), CDF tabanlı hata olasılığı formülünde, (3.37), yerine yazıldığında ve integral ifadesi [82, Eq. 3.351.3] eşitliği yardımı ile çözümlenerek asimptotik hata olasılığı, (3.66), ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned} \bar{P}_{hMM}^{\infty}(\gamma_{th}^{MM}) &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \prod_{k=1}^N \left[-\gamma_{th}^{MM} \left(\frac{2}{P\Omega_{g_k}} + \frac{2}{P\Omega_{h_k}} \right) \right] \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) \\ &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \prod_{k=1}^N \left[-\gamma_{th}^{MM} \left(\frac{2}{P\Omega_{g_k}} + \frac{2}{P\Omega_{h_k}} \right) \right] \left(\frac{1}{2}\sqrt{\pi}\right) \\ &= \frac{1}{4} \prod_{k=1}^N \left[-\gamma_{th}^{MM} \left(\frac{2}{P\Omega_{g_k}} + \frac{2}{P\Omega_{h_k}} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.66)$$

3.1.3.6. Çeşitlilik Ölçütü Analizi

Çeşitlilik ölçütü ve kodlama kazancı arasındaki ilişki (3.67) ile ifade edilir.

$$\bar{P}_G^\infty = (G_c \gamma)^{-G_d} \quad (3.67)$$

(3.67)'de G_d ifadesi, çeşitlilik ölçütünü ve G_c ifadesi de kodlama kazancını ifade etmektedir.

Aynı Anda İletim Modeli

AAİ modeline ilişkin asimptotik CDF ifadesi, (3.62), (3.68) şeklinde ifade edilir.

$$\begin{aligned} F_{AAI}^\infty(\gamma_{th}^{TK}) &= 1 - \underbrace{\left[\left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right]}_{\text{sabit terim}} \\ &\quad \times \underbrace{\left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N}}_{\text{sabit terim}} \left[\underbrace{1}_{P^0} - \underbrace{\gamma_{th}^{TK} \left(\frac{3}{P\Omega_{hk}} + \frac{3}{P\Omega_{gk}} \right)}_{YOT} \right] \\ &= (G_c P)^{-G_d} \end{aligned} \quad (3.68)$$

Burada, $G_d = 0$ ve $G_c = \text{sabit terim}$ olarak ifade edilmektedir.

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

FEKS metoduna ilişkin asimptotik CDF ifadesi, (3.63), (3.69) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} F_{FEKS}^\infty(\gamma_{th}) &= \prod_{k=1}^N \left[\frac{\gamma_{th}}{2} \left(\frac{3}{P\Omega_{hk}} + \frac{3}{P\Omega_{gk}} \right) \right] = \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{th} \frac{1}{P} \frac{1}{2} \underbrace{\left(\frac{3}{\Omega_{hk}} + \frac{3}{\Omega_{gk}} \right)}_{A_k} \right] \\ &= (G_c P)^{-G_d} \end{aligned} \quad (3.69)$$

Burada, $G_d = N$ ve $G_c = \left[\prod_{k=1}^N \gamma_{th} A_k \right]^{-\frac{1}{N}}$ 'dir.

Maksimum-Minimum Metodu

MM metoduna ilişkin asimptotik CDF ifadesi, (3.64), kullanılarak kodlama kazancı ve çeşitlilik ölçütü arasındaki ilişki (3.70) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 F_{\text{MM}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) &= \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{2}{P\Omega_{h_k}} + \frac{2}{P\Omega_{g_k}} \right) \right] = \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \frac{1}{\underbrace{\left(\frac{2}{\Omega_{h_k}} + \frac{2}{\Omega_{g_k}} \right)}_{A_k}} \right] \\
 &= (G_c P)^{-G_d} \tag{3.70}
 \end{aligned}$$

Burada, $G_d = N$ ve $G_c = \left[\prod_{k=1}^N \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} A_k \right]^{-\frac{1}{N}}$ 'dır.

3.1.3.7. Optimizasyon

Röle İstasyonu Pozisyonu

Aynı Anda İletim Modeli

x kullanıcısı ile röle arasındaki uzaklığın d değerine eşit olduğu, $x_k - R = d$, ve y kullanıcısı ile röle arasındaki uzaklığında $(1-d)$ değerine, $y_k - R = 1 - d$, eşit olduğu varsayılmıştır. Burada, $m = 1 - N$, $P\Omega_h = x$, $P\Omega_g = y$, $\left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{h_k}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{g_k}} \right) = a$, $\Omega_g = \frac{1}{d^v}$ ve $\Omega_h = \frac{1}{(1-d)^v}$ x ve y ifadeleri, $\frac{P}{(1-d)^v} = x$, $\frac{P}{d^v} = y$ şeklinde yazılır. Bu ifadeler (3.62) ifadesinde yerine yazıldığında (3.71) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
 F_{\text{AAI}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) &= 1 - \left[\underbrace{\left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1}}_{x^m} \underbrace{\left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1}}_{y^m} \underbrace{\left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{h_k}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{g_k}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N}}_{\left(a + \frac{1}{x}\right)^m} \right. \\
 &\quad \left. \times \underbrace{\left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{h_k}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{g_k}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N}}_{\left(a + \frac{1}{y}\right)^m} \left(1 - \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left(\frac{3}{P\Omega_{h_k}} + \frac{3}{P\Omega_{g_k}} \right) \right) \right] \\
 &= (ax + 1)^m (ay + 1)^m = \left[\left(\frac{aP}{(1-d)^v} + 1 \right) \left(\frac{aP}{d^v} + 1 \right) \right]^m \\
 &= \left[\left(\frac{a^2 P^2}{(d-d^2)^v} + \frac{aP}{(1-d)^v} + \frac{aP}{d^v} + 1 \right) \right]^m \tag{3.71}
 \end{aligned}$$

Burada, $A = [a^2 P^2]$ ve $B = [aP]$ 'dir. d ifadesine göre türev alındığında ve ifade sıfıra eşitlendiğinde (3.71) ifadesi (3.72) ile gösterilir.

$$\begin{aligned}
F_{AAI}^{\infty} &= \frac{\partial}{\partial d} \left[\left(\frac{A}{d^v (1-d)^v} + \frac{B}{(1-d)^v} + \frac{B}{(d)^v} + 1 \right) \right]^{1-N} \\
&= \left[\frac{A}{v d^{v-1} v (1-d)^{v-1}} + \frac{B}{v (1-d)^{v-1}} + \frac{B}{v (d)^{v-1}} \right]^{1-N} = 0 \\
&= \frac{A}{v d^{v-1} v (1-d)^{v-1}} = \frac{Bv (d)^{v-1}}{v (d)^{v-1} v (1-d)^{v-1}} + \frac{Bv (1-d)^{v-1}}{v (d)^{v-1} v (1-d)^{v-1}} \\
&= v (d)^{v-1} = v (1-d)^{v-1} \implies d = \frac{1}{2}
\end{aligned} \tag{3.72}$$

(3.72) ifadesine göre, röle istasyonunun en uygun pozisyonu kullanıcı çiftlerinin orta noktasında ve birbirine eşit mesafede olduğu noktadır.

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

Benzer şekilde, $x_k - R = d$ ve $y_k - R = 1 - d$ olduğu ve $\Omega_{gk} = \frac{1}{d^v}$ ve $\Omega_{hk} = \frac{1}{(1-d)^v}$ değerine eşit olduğu varsayılmaktadır. Bu değerler FEKS metodunun asimptotik CDF ifadesinde, (3.63), yerine yazıldığında (3.73) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
F_{FEKS}^{\infty} (\gamma_{th}) &= \prod_{k=1}^N \left[\frac{\gamma_{th}}{2} \left(\frac{3}{(1-d)^v} + \frac{3}{(d)^v} \right) \right] \\
&= \prod_{k=1}^N \left[\frac{\gamma_{th}}{2} \left(\frac{3(1-d)^v}{P} + \frac{3(d)^v}{P} \right) \right] \\
&= \prod_{k=1}^N \left[\frac{\gamma_{th}}{2} \left(\frac{3(1-d)^v}{P} + \frac{3(d)^v}{P} \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.73}$$

Burada, $a = \left[\frac{\gamma_{th}}{2} \frac{3}{P} \right]$ ve $b = \left[\frac{\gamma_{th}}{2} \frac{3}{P} \right]$ 'dir. a ve b değerleri birbirine eşit değerlerde olduğundan (3.73) ifadesi (3.74) ile ifade edilir.

$$F_{FEKS}^{\infty} (\gamma_{th}) = [a (1-d)^v + a (d)^v]^N \tag{3.74}$$

(3.74) ifadesi d 'ye göre türev alındığında ve ifade sıfıra eşitlendiğinde (3.75) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{FEKS}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}) &= \frac{\partial}{\partial d} [a(1-d)^v + a(d)^v]^N = [va(1-d)^{v-1} + va(d)^{v-1}]^N = 0 \\
&= va(1-d)^{v-1} = va(d)^{v-1} \implies (1-d)^{v-1} = (d)^{v-1} \implies d = \frac{1}{2} \quad (3.75)
\end{aligned}$$

Benzer şekilde, (3.75) ifadesine göre en uygun röle pozisyonu, kullanıcı çiftlerinin orta noktası olarak bulunmuştur.

Maksimum-Minimum Metodu

x kullanıcısı ile röle arasındaki mesafe $x_k - R = d$ ve y kullanıcısı ile röle arasındaki mesafe $y_k - R = 1 - d$ olarak belirlenirse MM metoduna ilişkin asimptotik CDF ifadesinde, (3.64), $\Omega_{gk} = \frac{1}{d^v}$ ve $\Omega_{hk} = \frac{1}{(1-d)^v}$ ifadeleri yerine yazıldığında (3.76) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{MM}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) &= \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{2}{\frac{P}{(1-d)^v}} + \frac{2}{\frac{P}{(d)^v}} \right) \right] \\
&= \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{2(1-d)^v}{P} + \frac{2(d)^v}{P} \right) \right] \\
&= \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{2(1-d)^v}{P} + \frac{2(d)^v}{P} \right) \right] \quad (3.76)
\end{aligned}$$

Burada, $a = \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \frac{2}{P} \right]$ ve $b = \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \frac{2}{P} \right]$ 'dir.

a ve b birbirine eşit olduğundan (3.76) ifadesi (3.77) şeklinde tekrardan ifade edilir.

$$F_{\text{MM}}^{\infty} = [a(1-d)^v + a(d)^v]^N \quad (3.77)$$

(3.77) ifadesinin d'ye göre türevi alındığında ve ifade sifıra eşitlendiğinde optimum röle pozisyonu (3.78) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{MM}}^{\infty} &= \frac{\partial}{\partial d} [a(1-d)^v + a(d)^v]^N = [va(1-d)^{v-1} + va(d)^{v-1}]^N = 0 \\
&= va(1-d)^{v-1} = va(d)^{v-1} \implies (1-d)^{v-1} = (d)^{v-1} \implies d = \frac{1}{2} \quad (3.78)
\end{aligned}$$

(3.78) ifadesine göre MM metodu uygulandığında en uygun röle pozisyonu, AAİ ve FEKS metodlarında olduğu gibi kullanıcı çiftlerinin orta noktasıdır.

3.2. ÇOK KULLANICILI KABLOSUZ İKİ YÖNLÜ RÖLELİ AĞLARDA KANAL DURUM BİLGİSİNİN MÜKEMMEL OLMAMASI

Kullanıcı çiftlerinin birbiri ile yaptığı veri alışverişi süreci merkezi birim (central unit) tarafından kontrol edilmektedir. Bu süreç sırasında kanal durum bilgisinin ölçülmesi, her bir kullanıcı çiftine ait toplam kapasitelerin hesaplanması ve maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çiftinin seçilmesi işlemleri yapılmaktadır. Bu süreçlerin başarılı bir şekilde organize edilmesinde kontrol biriminin mükemmel kanal durum bilgisine (perfect channel state information) sahip olması önemli bir yer teşkil etmektedir. Fakat birçok pratik uygulamalarda kontrol birimi, kanal durum bilgisini mükemmel bir şekilde elde edemez. Bu duruma kestirimde bulunulmuş olan kanal durum bilgisinin alıcı kısmına iletilmesi sırasında oluşabilecek olan geri bildirim gecikmeleri sebep olabilmektedir. Diğer durum ise kanal durum bilgisinin kestirimi sırasında gürültüden kaynaklı oluşabilecek olan hatalardır. Bu iki durum sırasıyla literatürde geri bildirim gecikmesi (feedback delay) ve kanal kestirim hatası (channel estimation error) olarak ifade edilmektedir.

3.2.1. Kanal Durum Bilgisinin Mükemmel Olmaması

Bu alt bölüm kanal durum bilgisinin geri bildirim gecikmesinden ve kanal kestiriminden kaynaklı mükemmel olmaması durumlarına ilişkin detaylı açıklamalara yer vermektedir.

3.2.1.1. Geri Bildirim Gecikmesi

Zamanla değişen kanallarda (time-variant channels) kanal durum bilgisinin geri bildirim gecikmesinden kaynaklı mükemmel olmamasına ilişkin h ve g kanalları için kanal modelleri sırasıyla (3.79) ve (3.80)'de yer verilmiştir [44].

$$h_k = \rho_{f_{h_k}} \hat{h}_k + \sqrt{1 - \rho_{f_{h_k}}^2} \varepsilon_{h_k} \quad (3.79)$$

$$g_k = \rho_{f_{g_k}} \hat{g}_k + \sqrt{1 - \rho_{f_{g_k}}^2} \varepsilon_{g_k} \quad (3.80)$$

(3.79)'da ε_{h_k} hata bileşenini, \hat{h}_k ise kestirimde bulunulmuş olan kanal durum bilgisini ifade etmektedir. ε_{h_k} ve \hat{h}_k birbirinden bağımsız (independent) sıfır ortalamalı (zero mean) ve sırasıyla $\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2$ ve $\sigma_{\hat{h}_k}^2$ varyanslara sahip karmaşık Gauss rastgele değişkenlerdir. ($\varepsilon_{h_k} \sim$

$\mathcal{CN}(0, \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2)$ ve $\hat{h}_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{\hat{h}_k}^2)$. Benzer şekilde, (3.80)'de ε_{g_k} ve \hat{g}_k , $\varepsilon_{g_k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2)$ ve $\hat{g}_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{\hat{g}_k}^2)$. $\rho_{f_{g_k}}$ ve $\rho_{f_{h_k}}$ terimleri sırasıyla $h_k - \hat{h}_k$ ve $g_k - \hat{g}_k$ 'nin korelasyon katsayılarını (correlation coefficient) ifade etmektedir [44]. Tez çalışması sırasında $\rho_{f_{h_k}}$ ve $\rho_{f_{g_k}}$ 'nin ρ_{f_k} değerine eşit olduğu varsayılmıştır.

$$\rho_{f_k} = \rho_{f_{h_k}} = \rho_{f_{g_k}} \quad (3.81)$$

$\rho_{f_{h_k}}$ ve $\rho_{f_{g_k}}$ 'nin değerleri sırasıyla, (3.82) ve (3.83)'teki Jake'in otokorelasyon modeli ile hesaplanabilmektedir [44, 46].

$$\rho_{f_{h_k}} = J_0(2\pi f_{dh_k} T) \quad (3.82)$$

$$\rho_{f_{g_k}} = J_0(2\pi f_{dg_k} T) \quad (3.83)$$

(3.82) ve (3.83)'te $J_0(\cdot)$ sıfıncı düzendeki bessel fonksiyonunu ifade etmektedir [82]. f_{dh_k} and f_{dg_k} , Doppler frekansına (Doppler frequency) karşılık gelmektedir. T maksimum kapasiteye sahip eş-kaynak seçimi ile gerçek veri transferi arasındaki zaman farkını ifade etmektedir. $\rho_{f_{h_k}}$ ve $\rho_{f_{g_k}}$ belirli bir değer aralığına sahiptir. $0 \leq \rho_{f_{h_k}}, \rho_{f_{g_k}} \leq 1$. $\rho_{f_{h_k}}$ ve $\rho_{f_{g_k}}$ değerlerinin 1'e eşit olduğu durumda, kanal durum bilgisi mükemmeldir. 1 değerinden düşük olduğu durumda ise kanal durum bilgisi mükemmel değildir [44].

3.2.1.2. Kanal Kestirim Hatası

Kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatadan dolayı kanal durum bilgisinin mükemmel olmaması durumu h ve g kanalları için (3.84) ve (3.85) ile ifade edilir [44, 48].

$$\hat{h}_k = h_k + e_h \quad (3.84)$$

$$\hat{g}_k = g_k + e_g \quad (3.85)$$

(3.84)'te, h_k gerçek kanal bilgisini, \hat{h}_k ise kestirim sonucu elde edilen kanal bilgisini ifade etmektedir. Her ikisinde sıfır ortalamalı ve sırasıyla $\sigma_{h_k}^2$ ve $\sigma_{\hat{h}_k}^2$ varyanslarına sahip karmaşık Gauss rastgele değişkenleridir. ($h_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{h_k}^2)$ ve $\hat{h}_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{\hat{h}_k}^2)$). e_{h_k} , kestirimden kaynaklı hatayı ifade etmektedir ve $e_{h_k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{e_{h_k}}^2)$ 'dir. Kestirimde bulunmuş kanal durum bilgisi, \hat{h}_k , ile kestirimden kaynaklı oluşan hata, e_{h_k} , birbirinden bağımsız-

dır. Benzer şekilde, (3.85)'te g_k gerçek kanal bilgisini, \hat{g}_k ise kestirim sonucu elde edilen kanal bilgisini ifade etmekte ve sırasıyla $g_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{g_k}^2)$ ve $\hat{g}_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{\hat{g}_k}^2)$ şeklinde ifade edilir. $e_{g_k}, e_{\hat{g}_k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{e_{g_k}}^2)$, kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatayı ifade etmektedir. Benzer şekilde kestirim sonucu elde edilen kanal bilgisi, \hat{g}_k ve kestirimden kaynaklı oluşan hata e_{g_k} birbirinden bağımsızdır. Aralarındaki ilişki (3.86) ve (3.87) ile formülize edilir [44, 48].

$$h_k = \rho_e \hat{h}_k + \varepsilon_{h_k} \quad (3.86)$$

$$g_k = \rho_e \hat{g}_k + \varepsilon_{g_k} \quad (3.87)$$

(3.86)'da, \hat{h}_k ve ε_{h_k} birbirinden bağımsız ve sırasıyla, $\hat{h}_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{\hat{h}_k}^2)$ ve $\varepsilon_{h_k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2)$. ρ_e , korelasyon katsayısı [44] yardımıyla (3.88) ile formülize edilir.

$$\rho_e = \frac{\sigma_{h_k}^2}{\sigma_{\hat{h}_k}^2} \quad (3.88)$$

ρ_e terimi, aynı zamanda pilot iletim sinyalinin gücü, P artan fonksiyonu ile de ifade edilir [44]. Kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatanın varyansları $\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2$ ve $\sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2$ pilot iletim sinyalinin gücü ile ters orantılıdır [35].

$\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2$, (3.88) kullanılarak (3.89)'daki gibi tekrar formülize edilebilir [44].

$$\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2 = \sigma_{h_k}^2 - \rho_e^2 \sigma_{\hat{h}_k}^2 \quad (3.89)$$

(3.89) ifadesi, [44] yardımıyla (3.90) şeklinde tekrar formülize edilir.

$$\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2 = (1 - \rho_e) \sigma_{h_k}^2 \quad (3.90)$$

(3.90) ifadesinde, $\sigma_{h_k}^2$ 'nin değerinin 1'e eşit olması durumunda ρ_e (pilot sinyalin gücü)'nin değerinin SGO boyunca artması halinde kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatanın varyansı, $\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2$, da orantısız olarak azalır [44].

3.2.2. Aynı Anda İletim Modeli

Bu alt bölüm, kanal durum bilgisinin kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatadan ve geri bildirim gecikmesinden kaynaklı mükemmel olmaması durumlarının AAİ modeli üzerine olan etkilerini belirlemeye çalışmaktadır.

3.2.2.1. Geri Bildirim Gecikmesi

h_k , (3.79), ve g_k , (3.80), ifadeleri (3.5) ve (3.6) ifadelerinde yerine yazıldığında x_k ve y_k kullanıcılarında alınan geri bildirim gecikmeli ifadeler sırasıyla (3.91) ve (3.92) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
Z_{X_k}^{\text{GBG}} = & \underbrace{Gx_k \hat{h}_k^2 \sqrt{P_s \rho_{f_k}^2}}_{\text{kendi etkileşim}} + \underbrace{2Gx_k \sqrt{p_s} \rho_{f_k} \hat{h}_k \sqrt{1 - \rho_{f_k}^2} \varepsilon_{h_k} + Gx_k \sqrt{p_s} (1 - \rho_{f_k}^2) \varepsilon_{h_k}^2}_{\text{zararlı bilgi}} \\
& + \underbrace{Gy_k \hat{g}_k \hat{h}_k \sqrt{P_s \rho_{f_k}^2}}_{x_k \text{ kullanıcısı için faydalı bilgi}} + \underbrace{Gy_k \sqrt{P_s} \rho_{f_k} \hat{h}_k \sqrt{1 - \rho_{f_k}^2} \varepsilon_{g_k}}_{\text{zararlı bilgi}} \\
& + \underbrace{Gy_k \sqrt{p_s} (\rho_{f_k} \hat{g}_k) \sqrt{1 - \rho_{f_k}^2} \varepsilon_{h_k} + Gy_k \sqrt{p_s} (1 - \rho_{f_k}^2) \varepsilon_{h_k} \varepsilon_{g_k}}_{\text{zararlı bilgi}} \\
& + G \underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^N x_i (\rho_{f_i} \hat{h}_i + \sqrt{1 - \rho_{f_i}^2} \varepsilon_{h_i}) (\rho_{f_k} \hat{h}_k + \sqrt{1 - \rho_{f_k}^2} \varepsilon_{h_k}) \sqrt{P_s}}_{\text{diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hücre-ici etkileşimi}} \\
& + G \underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^N y_i (\rho_{f_i} \hat{g}_i + \sqrt{1 - \rho_{f_i}^2} \varepsilon_{g_i}) (\rho_{f_k} \hat{h}_k + \sqrt{1 - \rho_{f_k}^2} \varepsilon_{h_k}) \sqrt{P_s}}_{\text{diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hücre-ici etkileşimi}} \\
& + \underbrace{G(\rho_{f_k} \hat{h}_k + \sqrt{1 - \rho_{f_k}^2} \varepsilon_{h_k}) n_r}_{\text{yükseltilmiş gürültü}} + \underbrace{n_{x_k}}_{x_k \text{ da oluşan gürültü}} \tag{3.91}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{Y_k}^{\text{GBG}} = & \underbrace{Gy_k \hat{g}_k^2 \sqrt{P_s} \rho f_k^2}_{\text{kendi etkileşim}} + \underbrace{2Gy_k \sqrt{P_s} \rho f_k \hat{g}_k \sqrt{1 - \rho f_k^2 \varepsilon_{g_k}} + Gy_k \sqrt{P_s} (1 - \rho f_k^2) \varepsilon_{g_k}^2}_{\text{zararlı bilgi}} \\
& + \underbrace{Gx_k \hat{g}_k \hat{h}_k \sqrt{P_s} \rho f_k^2}_{y_k \text{ kullanıcısı için faydalı bilgi}} + \underbrace{Gx_k \sqrt{P_s} \rho f_k \hat{g}_k \sqrt{1 - \rho f_k^2 \varepsilon_{h_k}}}_{\text{zararlı bilgi}} \\
& + \underbrace{Gx_k \sqrt{P_s} (\rho f_k \hat{h}_k) \sqrt{1 - \rho f_k^2 \varepsilon_{g_k}} + Gx_k \sqrt{P_s} (1 - \rho f_k^2) \varepsilon_{h_k} \varepsilon_{g_k}}_{\text{zararlı bilgi}} \\
& + G \underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^N y_i (\rho f_i \hat{g}_i + \sqrt{1 - \rho f_i^2 \varepsilon_{g_i}}) (\rho f_k \hat{g}_k + \sqrt{1 - \rho f_k^2 \varepsilon_{g_k}}) \sqrt{P_s}}_{\text{diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hücre-ici etkileşimi}} \\
& + G \underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^N x_i (\rho f_i \hat{h}_i + \sqrt{1 - \rho f_i^2 \varepsilon_{h_i}}) (\rho f_k \hat{g}_k + \sqrt{1 - \rho f_k^2 \varepsilon_{g_k}}) \sqrt{P_s}}_{\text{diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hücre-ici etkileşimi}} \\
& + \underbrace{G(\rho f_k \hat{g}_k + \sqrt{1 - \rho f_k^2 \varepsilon_{g_k}}) n_r}_{\text{yükseltilmiş gürültü}} + \underbrace{n_{y_k}}_{y_k \text{ da oluşan gürültü}} \tag{3.92}
\end{aligned}$$

(3.91) ve (3.92) ifadelerinde, birinci satır x_k ve y_k ifadelerini içermesine rağmen mükemmel kendi etkileşim iptali uygulanamaz. Bu duruma, birinci satır sol baştan ikinci ve üçüncü ifadelerin hata bileşeni içermesi sebep olmaktadır. x_k ve y_k kullanıcıları hata bileşeninden dolayı kendilerine ait olan bu veri grubunu tanıyamaz ve zararlı veri olarak işlem yapar. Sadece birinci satır sol baştaki ilk ifade toplam sinyal içerisinden çıkarılır. İkinci ve üçüncü satırdaki ifadeler x_k ve y_k kullanıcılarının eş kullanıcılarına ait veriler içermektedir. (3.91) ve (3.92)'de sadece ikinci satır sol baştan ilk ifadeler x_k ve y_k tarafından faydalı veri olarak kullanılır geri kalan kısım hata bileşeni içerdiğinden dolayı zararlı veri grubuna girer. Dördüncü ve beşinci satırlar diğer kullanıcılardan kaynaklı hücre-ici etkileşim problemini ifade etmektedir. Son olarak (3.91) ve (3.92)'de altıncı satır sol baştan ilk ifadeler gürültünün yükseltilmesini, sağ taraftaki ifadeler ise x_k ve y_k kullanıcılarında oluşan ısı gürültüleri ifade etmektedir.

(3.91) ve (3.92)'de ρ_{f_k} ifadesinin değeri 1'e eşitlendiğinde hata bileşenleri sıfıra eşitlenir ve kanal durum bilgisi mükemmel olarak elde edilmiş gibi işlem görür. Diğer taraftan ρ_{f_k} ifadesinin değeri 1'den küçük bir değer aldığı anda kanal durum bilgisi mükemmel olarak elde edilmemiş olur ve hata bileşenleri içerir. Geri bildirim gecikmesi durumunda röle

istasyonundaki G yükseltme katsayısı (3.93) ile ifade edilir.

$$G = \frac{\sqrt{P_r}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N P_s |\hat{h}_k|^2 + \sum_{k=1}^N P_s \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2 + \sum_{k=1}^N P_s |\hat{g}_k|^2 + \sum_{k=1}^N P_s \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2 + N_0}} \quad (3.93)$$

G ifadesi, (3.93), (3.91) ve (3.92) ifadelerinde yerine yazıldığında x_k ve y_k kullanıcılarındaki SEGO ifadeleri sırasıyla (3.94) ve (3.95)'teki gibi hesaplanır. (3.94) ve (3.95)'te hata bileşeni içeren ifadeler SEGO hesaplamasında paydada yer almaktadır.

$$\begin{aligned} \gamma_{X_k}^{\text{GBG}} &= \\ &= \frac{\frac{\gamma_x \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} \right]} \left[\frac{\gamma_y \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{4P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{f_i}^2 + \gamma_B \rho_{f_i}^2 + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]} \right]}{\frac{\gamma_x \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} \right]} + \frac{\gamma_y \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{4P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{f_i}^2 + \gamma_B \rho_{f_i}^2 + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]}} + \Delta \end{aligned} \quad (3.94)$$

$$\begin{aligned} \Delta &= \\ &= \frac{\left[\frac{PP(1-\rho_{f_k}^2)^2 \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^4}{N_0 N_0} + \frac{PP(1-\rho_{f_k}^2)^2 \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2 \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0 N_0} + \frac{P \gamma_A \rho_{f_i}^2 (1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} \right]}{\left[\frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} \right] \left[\frac{4P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{f_i}^2 + \gamma_B \rho_{f_i}^2 + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]} \\ &+ \frac{\left[\frac{PP(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_A}^2 (1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0 N_0} + \frac{P \gamma_B \rho_{f_i}^2 (1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \frac{PP \sigma_{\varepsilon_B}^2 \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2 (1-\rho_{f_k}^2) (1-\rho_{f_i}^2)}{N_0 N_0} \right]}{\left[\frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} \right] \left[\frac{4P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{f_i}^2 + \gamma_B \rho_{f_i}^2 + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]} \end{aligned} \quad (3.95)$$

Benzer şekilde, $\gamma_{Y_k}^{\text{GBG}}$ ifadesi (3.96) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} \gamma_{Y_k}^{\text{GBG}} &= \\ &= \frac{\frac{\gamma_x \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{4P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{f_i}^2 + \gamma_B \rho_{f_i}^2 + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]} \left[\frac{\gamma_y \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} \right]} \right]}{\frac{\gamma_x \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{4P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{f_i}^2 + \gamma_B \rho_{f_i}^2 + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]} + \frac{\gamma_y \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} \right]}} + \Lambda \end{aligned} \quad (3.96)$$

$$\begin{aligned}
\Lambda &= \\
&= \left[\frac{PP(1-\rho_{jk}^2)^2\sigma_{\varepsilon_{gk}}^4}{N_0N_0} + \frac{PP(1-\rho_{jk}^2)^2\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0N_0} + \frac{P\gamma_A\rho_{ji}^2(1-\rho_{jk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{jk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} \right] \\
&= \left[\frac{P(1-\rho_{jk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} \right] \left[\frac{4P(1-\rho_{jk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{jk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A\rho_{ji}^2 + \gamma_B\rho_{ji}^2 + \frac{(1-\rho_{ji}^2)P\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{ji}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right] \\
&\quad + \left[\frac{PP(1-\rho_{ji}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2(1-\rho_{jk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0N_0} + \frac{P\gamma_B\rho_{ji}^2(1-\rho_{jk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{PP\sigma_{\varepsilon_B}^2\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2(1-\rho_{jk}^2)(1-\rho_{ji}^2)}{N_0N_0} \right] \\
&+ \left[\frac{P(1-\rho_{jk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} \right] \left[\frac{4P(1-\rho_{jk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{jk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A\rho_{ji}^2 + \gamma_B\rho_{ji}^2 + \frac{P(1-\rho_{ji}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{ji}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right] \\
&\hspace{15em} (3.97)
\end{aligned}$$

3.2.2.2. Kanal Kestirim Hatası

(3.86) ve (3.87) ifadeleri, sırasıyla (3.5) ve (3.6)'da yerine yazıldığında x_k ve y_k kullanıcılarında kanal kestiriminden kaynaklı mükemmel olmayan kanal durum bilgisi ile ilişkili veriler (3.98) ve (3.99) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
Z_{X_k}^{\text{KKH}} &= \underbrace{Gx_k\hat{h}_k^2\sqrt{P_s}\rho_e^2}_{\text{kendi etkilesim}} + \underbrace{2Gx_k\sqrt{P_s}\rho_e\hat{h}_k\varepsilon_{h_k}}_{\text{zararlı bilgi}} + \underbrace{Gx_k\sqrt{P_s}\varepsilon_{h_k}^2}_{x_k \text{ kullanıcısı için faydalı bilgi}} + \underbrace{Gy_k\hat{g}_k\hat{h}_k\sqrt{P_s}\rho_e^2}_{\text{y kullanıcıları için faydalı bilgi}} \\
&+ \underbrace{Gy_k\sqrt{P_s}\rho_e\hat{g}_k\varepsilon_{h_k}}_{\text{zararlı bilgi}} + \underbrace{Gy_k\sqrt{P_s}\rho_e\hat{h}_k\varepsilon_{g_k}}_{\text{zararlı bilgi}} + \underbrace{Gy_k\sqrt{P_s}\varepsilon_{g_k}\varepsilon_{h_k}}_{\text{zararlı bilgi}} + \underbrace{G(\rho_e\hat{h}_k + \varepsilon_{h_k})n_r}_{\text{yükseltilmiş veri}} \\
&+ \underbrace{n_{x_k}}_{x'_k \text{ da oluşan gürültü}} + \underbrace{G \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i(\rho_e\hat{h}_i + \varepsilon_{h_i})(\rho_e\hat{h}_k + \varepsilon_{h_k})\sqrt{P_s}}_{x \text{ hattındaki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hucre-ici etkilesimi}} \\
&+ \underbrace{G \sum_{i=1, i \neq k}^N y_i(\rho_e\hat{g}_i + \varepsilon_{g_i})(\rho_e\hat{h}_k + \varepsilon_{h_k})\sqrt{P_s}}_{y \text{ hattındaki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hucre-ici etkilesimi}} \hspace{10em} (3.98)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{Y_k}^{\text{KKH}} = & \underbrace{Gy_k \hat{g}_k^2 \sqrt{P_s \rho_e^2}}_{\text{kendi etkileşim}} + \underbrace{2Gy_k \sqrt{P_s} \rho_e \hat{g}_k \varepsilon_{g_k} + Gy_k \sqrt{P_s} \varepsilon_{g_k}^2}_{\text{zararlı bilgi}} + \underbrace{Gx_k \hat{g}_k \hat{h}_k \sqrt{P_s} \rho_e^2}_{y_k \text{ kullanıcısı için faydalı bilgi}} \\
& + \underbrace{Gx_k \sqrt{P_s} \rho_e \hat{h}_k \varepsilon_{g_k} + Gx_k \sqrt{P_s} \rho_e \hat{g}_k \varepsilon_{h_k} + Gx_k \sqrt{P_s} \varepsilon_{h_k} \varepsilon_{g_k}}_{\text{zararlı bilgi}} + \underbrace{G(\rho_e \hat{g}_k + \varepsilon_{g_k}) n_r}_{\text{yükseltilmiş gürültü}} \\
& + \underbrace{n_{y_k}}_{y_k \text{ da oluşan gürültü}} + \underbrace{G \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i (\rho_e \hat{h}_i + \varepsilon_{h_i}) (\rho_e \hat{g}_k + \varepsilon_{g_k}) \sqrt{P_s}}_{x \text{ hattındaki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hücre-ici etkileşimi}} \\
& + \underbrace{G \sum_{i=1, i \neq k}^N y_i (\rho_e \hat{g}_i + \varepsilon_{g_i}) (\rho_e \hat{g}_k + \varepsilon_{g_k}) \sqrt{P_s}}_{y \text{ hattındaki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hücre-ici etkileşimi}} \quad (3.99)
\end{aligned}$$

(3.98) ve (3.99)'da birinci satır sol baştan ilk ifadeler hata bileşeni içermediğinden dolayı toplam sinyal içerisinde çıkarılır. İkinci ve üçüncü ifadeler hata bileşeninden dolayı yorucu bilgi olarak toplam sinyal içerisinde kalır. Birinci satır dördüncü terim x_k ve y_k kullanıcılarının eş-kullanıcılarına ait veriler içermektedir ve hata bileşeni içermediğinden dolayı x_k ve y_k tarafından faydalı veri olarak kullanılır. İkinci satırda sol baştan ilk üç ifade zararlı veri olarak işlem görür. Dördüncü terim ise sırasıyla gürültünün yükseltmesini ifade etmektedir. Üçüncü satır sol baştan ilk ifadeler x_k ve y_k kullanıcılarında oluşan ısıl gürültüyü ifade etmektedir. Üçüncü satır sağ taraftaki ifade ve dördüncü satırdaki ifadeler sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşan hücre-ici etkileşim verilerini içermektedir.

Kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hataların varyansları pilot iletim sinyalinin gücü ile ters orantılı olmasından dolayı (3.90) ifadesinde ρ_e değerinin 1'e eşit olması durumunda hatanın varyansı sıfır değerine eşit olacaktır. G ifadesi, (3.93), (3.98) ve (3.99) ifadelerinde yerine yazıldığında x_k ve y_k kullanıcılarındaki SEGO değerleri (3.100) ve (3.101) ile ifade edilir.

$$\gamma_{X_k}^{\text{KKH}} = \frac{\frac{\gamma_x \rho_e^2}{\left[\frac{P \sigma_{\varepsilon}^2 h_k}{N_0} \right]} \left[\frac{\gamma_y \rho_e^2}{\left[\frac{4P \sigma_{\varepsilon}^2 h_k}{N_0} + \frac{P \sigma_{\varepsilon}^2 g_k}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P \sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P \sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]} \right]}{\frac{\gamma_x \rho_e^2}{\left[\frac{P \sigma_{\varepsilon}^2 h_k}{N_0} \right]} + \frac{\gamma_y \rho_e^2}{\left[\frac{4P \sigma_{\varepsilon}^2 h_k}{N_0} + \frac{P \sigma_{\varepsilon}^2 g_k}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P \sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P \sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}} + \alpha \quad (3.100)$$

(3.101), $\gamma_{X_k}^{\text{KKH}}$ 'nın hata bileşenini ifade etmektedir.

$$\alpha = \frac{\frac{PP\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^4}{N_0 N_0} + \frac{PP\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2 \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0 N_0} + \frac{\gamma_A \rho_e^2 P \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \frac{PP\sigma_{\varepsilon_A}^2 \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0 N_0} + \frac{P\gamma_B \rho_e^2 \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \frac{PP\sigma_{\varepsilon_B}^2 \sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0 N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0}}{\left[\frac{P\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} \right] \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]} \quad (3.101)$$

Burada, $\gamma_x = \frac{p|\hat{h}_k|^2}{N_o}$, $\gamma_y = \frac{p|\hat{g}_k|^2}{N_o}$, $\gamma_A = \frac{i=1, i \neq k}{N_o}$, $\gamma_B = \frac{i=1, i \neq k}{N_o}$ ve $\sigma_A^2 = \sum_{i=1, i \neq k}^N \sigma_{\varepsilon_{h_i}}^2$, $\sigma_B^2 = \sum_{i=1, i \neq k}^N \sigma_{\varepsilon_{g_i}}^2$. Her bir kullanıcı çiftinin ve röle istasyonunun aynı iletim gücünde olduğu ve bu değerin P'ye eşit olduğu varsayılmıştır ($P_s = P_r = P$). Benzer şekilde $\gamma_{Y_k}^{\text{KKH}}$ ifadesi (3.102) ile ifade edilir.

$$\gamma_{Y_k}^{\text{KKH}} = \frac{\frac{\gamma_x \rho_e^2}{\left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]} \left[\frac{\gamma_y \rho_e^2}{\left[\frac{P\sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} \right]} \right]}{\left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]} + \frac{\gamma_y \rho_e^2}{\left[\frac{P\sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} \right]} + \beta \quad (3.102)$$

(3.103), $\gamma_{Y_k}^{\text{KKH}}$ ifadesinin hata bileşenini ifade etmektedir.

$$\beta = \frac{\frac{PP\sigma_{\varepsilon_{g_k}}^4}{N_0 N_0} + \frac{PP\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2 \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0 N_0} + \frac{\gamma_A \rho_e^2 P \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \frac{PP\sigma_{\varepsilon_A}^2 \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0 N_0} + \frac{P\gamma_B \rho_e^2 \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \frac{PP\sigma_{\varepsilon_B}^2 \sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0 N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0}}{\left[\frac{P\sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} \right] \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]} \quad (3.103)$$

3.2.3. Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

Kanal durum bilgisinin ideal olmaması durumunda, sistem içerisindeki kullanıcı çiftlerinin toplam kapasitelerinin hesaplanmasında (3.12) ifadesinden farklı olarak SGO yerine SEGO ifadesi kullanılmıştır. Bu duruma ideal olmayan kanal durum bilgisindeki hata bileşenleri sebep olmaktadır. Maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çifti seçim işlemi ise (3.13) ile yapılmaktadır.

3.2.3.1. Geri Bildirim Gecikmesi

Uygun kullanıcı çifti seçim işleminden sonra birinci faz sonrasında x_k ve y_k kullanıcılarında alınan geri bildirim gecikmeli ifadeler sırasıyla (3.104) ve (3.105) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
Z_{X_k}^{\text{GBG}} = & \underbrace{Gx_k \hat{h}_k^2 \sqrt{P_s} \rho f_k^2}_{\text{kendi etkileşim}} + \underbrace{2Gx_k \sqrt{p_s} \rho f_k \hat{h}_k \sqrt{1 - \rho f_k^2} \varepsilon_{h_k} + Gx_k \sqrt{p_s} (1 - \rho f_k^2) \varepsilon_{h_k}^2}_{\text{zararlı veri}} \\
& + \underbrace{Gy_k \hat{g}_k \hat{h}_k \sqrt{P_s} \rho f_k^2}_{x_k \text{ kullanıcısı için faydalı veri}} + \underbrace{Gy_k \sqrt{P_s} \rho f_k \hat{h}_k \sqrt{1 - \rho f_k^2} \varepsilon_{g_k}}_{\text{zararlı veri}} \\
& + \underbrace{Gy_k \sqrt{p_s} (\rho f_k \hat{g}_k) \sqrt{1 - \rho f_k^2} \varepsilon_{h_k} + Gy_k \sqrt{p_s} (1 - \rho f_k^2) \varepsilon_{h_k} \varepsilon_{g_k}}_{\text{zararlı veri}} \\
& + \underbrace{G(\rho f_k \hat{h}_k + \sqrt{1 - \rho f_k^2} \varepsilon_{h_k}) n_r}_{\text{yükseltilmiş gürültü}} + \underbrace{n_{x_k}}_{x'_k \text{ da oluşan gürültü}} \tag{3.104}
\end{aligned}$$

(3.104) ifadesinde görüleceği üzere, x_k kullanıcısı diğer kullanıcı çiftlerine ait verileri içermemesine rağmen GBG'den kaynaklı hata bileşenleri veri alışveriş sürecine etki etmektedir. Birinci satır, sol baştaki ilk ifade toplam sinyal içerisinden çıkarılabilir geri kalan kısım zararlı veri olarak işlem görür. Benzer şekilde, ikinci ve üçüncü satırlar y_k kullanıcısına ait veriler içermektedir. Sadece ikinci satır sol baştan ilk ifade x_k kullanıcısı tarafından faydalı veri olarak kullanılır. Geri kalan kısım zararlı veri olarak işlem görür ve SEGO hesaplamasında paydada bulunur. Dördüncü satır sol baştan birinci ifade gürültünün yükseltilmesini, ikinci ifade ise x_k kullanıcısında oluşan ısı gürültüyü ifade etmektedir. Benzer şekilde, y_k kullanıcısında alınan sinyal (3.105) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
Z_{Y_k}^{\text{GBG}} = & \underbrace{Gy_k \hat{g}_k^2 \sqrt{P_s} \rho f_k^2}_{\text{kendi etkileşim}} + \underbrace{2Gy_k \sqrt{p_s} \rho f_k \hat{g}_k \sqrt{1 - \rho f_k^2} \varepsilon_{g_k} + Gy_k \sqrt{p_s} (1 - \rho f_k^2) \varepsilon_{g_k}^2}_{\text{zararlı veri}} \\
& + \underbrace{Gx_k \hat{g}_k \hat{h}_k \sqrt{P_s} \rho f_k^2}_{y_k \text{ kullanıcısı için faydalı veri}} + \underbrace{Gx_k \sqrt{P_s} \rho f_k \hat{g}_k \sqrt{1 - \rho f_k^2} \varepsilon_{h_k}}_{\text{zararlı veri}} \\
& + \underbrace{Gx_k \sqrt{p_s} (\rho f_k \hat{h}_k) \sqrt{1 - \rho f_k^2} \varepsilon_{g_k} + Gx_k \sqrt{p_s} (1 - \rho f_k^2) \varepsilon_{h_k} \varepsilon_{g_k}}_{\text{zararlı veri}} \\
& + \underbrace{G(\rho f_k \hat{g}_k + \sqrt{1 - \rho f_k^2} \varepsilon_{g_k}) n_r}_{\text{yükseltilmiş gürültü}} + \underbrace{n_{y_k}}_{x'_k \text{ da oluşan gürültü}} \tag{3.105}
\end{aligned}$$

FEKS metodu uygulandıgında geri bildirim gecikmesi durumunda röle istasyonundaki G yükseltme katsayısı (3.106) ile hesaplanır.

$$G = \frac{\sqrt{P_r}}{\sqrt{P_s|\hat{h}_k|^2 + P_s\sigma_{\varepsilon_{h_k}}^2 + P_s|\hat{g}_k|^2 + P_s\sigma_{\varepsilon_{g_k}}^2 + N_0}} \quad (3.106)$$

G ifadesinin, (3.106), (3.104) ve (3.105) ifadelerinde yerine yazılmasıyla x_k ve y_k kullanıcılarındaki SEGO ifadeleri [44] yardımıyla sırasıyla (3.107) ve (3.108) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} \gamma_{X_k}^{\text{GBG}} &= \frac{P_r P_s |\hat{g}_k|^2 |\hat{h}_k|^2 \rho_{fk}^4}{|\hat{h}_k|^2 (4P_r P_s \rho_{fk}^2 (1 - \rho_{fk}^2) \varepsilon_{h_k}^2 + P_r P_s \rho_{fk}^2 (1 - \rho_{fk}^2) \varepsilon_{g_k}^2 + P_r \rho_{fk}^2 + P_s)} \\ &+ |\hat{g}_k|^2 (P_r P_s \rho_{fk}^2 (1 - \rho_{fk}^2) \varepsilon_{h_k}^2 + P_s) + P_r P_s (1 - \rho_{fk}^2)^2 \varepsilon_{h_k}^4 + P_r P_s (1 - \rho_{fk}^2)^2 \varepsilon_{h_k}^2 \varepsilon_{g_k}^2 \\ &+ P_r (1 - \rho_{fk}^2) \varepsilon_{h_k}^2 + 1 \end{aligned} \quad (3.107)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{Y_k}^{\text{GBG}} &= \frac{P_r P_s |\hat{g}_k|^2 |\hat{h}_k|^2 \rho_{fk}^4}{|\hat{g}_k|^2 (4P_r P_s \rho_{fk}^2 (1 - \rho_{fk}^2) \varepsilon_{g_k}^2 + P_r P_s \rho_{fk}^2 (1 - \rho_{fk}^2) \varepsilon_{h_k}^2 + P_r \rho_{fk}^2 + P_s)} \\ &+ |\hat{h}_k|^2 (P_r P_s \rho_{fk}^2 (1 - \rho_{fk}^2) \varepsilon_{g_k}^2 + P_s) + P_r P_s (1 - \rho_{fk}^2)^2 \varepsilon_{g_k}^4 + P_r P_s (1 - \rho_{fk}^2)^2 \varepsilon_{h_k}^2 \varepsilon_{g_k}^2 \\ &+ P_r (1 - \rho_{fk}^2) \varepsilon_{g_k}^2 + 1 \end{aligned} \quad (3.108)$$

3.2.3.2. Kanal Kestirim Hatası

Benzer şekilde kanal kestirim hatası durumunda uygun kullanıcı çifti seçim işleminden sonra x_k ve y_k kullanıcılarında alınan sinyal sırasıyla (3.109) ve (3.110) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} Z_{X_k}^{\text{KKH}} &= \underbrace{G x_k \hat{h}_k^2 \sqrt{P_s} \rho_e^2}_{\text{kendi etkileşim}} + \underbrace{2G x_k \sqrt{p_s} \rho_e \hat{h}_k \varepsilon_{h_k} + G x_k \sqrt{p_s} \varepsilon_{h_k}^2}_{\text{zararlı veri}} + \underbrace{G y_k \hat{g}_k \hat{h}_k \sqrt{P_s} \rho_e^2}_{\text{y}_k \text{ kullanıcısı için faydalı veri}} \\ &+ \underbrace{G y_k \sqrt{P_s} \rho_e \hat{g}_k \varepsilon_{h_k} + G y_k \sqrt{P_s} \rho_e \hat{h}_k \varepsilon_{g_k} + G y_k \sqrt{p_s} \varepsilon_{g_k} \varepsilon_{h_k}}_{\text{zararlı veri}} + \underbrace{G(\rho_e \hat{h}_k + \varepsilon_{h_k}) n_r}_{\text{yükseltmiş gürültü}} \\ &+ \underbrace{n_{x_k}}_{\text{x}_k \text{ kullanıcısındaki isil gürültü}} \end{aligned} \quad (3.109)$$

$$\begin{aligned}
Z_{Y_k}^{\text{KKH}} &= \underbrace{Gy_k \hat{g}_k^2 \sqrt{P_s} \rho_e^2}_{\text{kendi etkileşim}} + \underbrace{2Gy_k \sqrt{p_s} \rho_e \hat{g}_k \varepsilon_{g_k} + Gy_k \sqrt{p_s} \varepsilon_{g_k}^2}_{\text{zararlı veri}} + \underbrace{Gx_k \hat{g}_k \hat{h}_k \sqrt{P_s} \rho_e^2}_{y_k \text{ kullanıcısı için faydalı veri}} \\
&+ \underbrace{Gx_k \sqrt{P_s} \rho_e \hat{h}_k \varepsilon_{g_k} + Gx_k \sqrt{P_s} \rho_e \hat{g}_k \varepsilon_{h_k} + Gx_k \sqrt{p_s} \varepsilon_{h_k} \varepsilon_{g_k}}_{\text{zararlı veri}} + \underbrace{G(\rho_e \hat{g}_k + \varepsilon_{g_k}) n_r}_{\text{yükseltilmiş gürültü}} \\
&+ \underbrace{n_{x_k}}_{y_k \text{ kullanıcısında oluşan isil gürültü}} \tag{3.110}
\end{aligned}$$

(3.109) ve (3.110) ifadeleri, (3.98) ve (3.99) ifadelerinden farklı olarak diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşan hücre-içi etkileşimler içermemektedir. G yükseltme katsayısı, (3.106), (3.109) ve (3.110) ifadelerinde yerine yazıldığında x_k ve y_k kullanıcılarında oluşan SEGO ifadesi [44] yardımıyla sırasıyla (3.111) ve (3.112) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
\gamma_{X_k}^{\text{KKH}} &= \frac{P_r P_s |\hat{g}_k|^2 |\hat{h}_k|^2 \rho_e^4}{|\hat{h}_k|^2 (4P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{h_k}^2 + P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{g_k}^2 + P_r \rho_e^2 + P_s) + |\hat{g}_k|^2 (P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{h_k}^2 + P_s)} \\
&+ P_r P_s \varepsilon_{h_k}^2 \varepsilon_{g_k}^2 + P_r P_s \varepsilon_{h_k}^4 + P_r \varepsilon_{h_k}^2 + 1 \tag{3.111}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\gamma_{Y_k}^{\text{KKH}} &= \frac{P_r P_s |\hat{g}_k|^2 |\hat{h}_k|^2 \rho_e^4}{|\hat{g}_k|^2 (4P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{g_k}^2 + P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{h_k}^2 + P_r \rho_e^2 + P_s) + |\hat{h}_k|^2 (P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{g_k}^2 + P_s)} \\
&+ P_r P_s \varepsilon_{h_k}^2 \varepsilon_{g_k}^2 + P_r P_s \varepsilon_{g_k}^4 + P_r \varepsilon_{g_k}^2 + 1 \tag{3.112}
\end{aligned}$$

3.2.4. Performans Analizi

3.2.4.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı

Bu alt bölüm kanal durum bilgisinin mükemmel olmadığı duruma ilişkin servis dışı kalma olasılığı performans ölçütüne ait değerlendirmelerde bulunmaktadır.

Aynı Anda İletim Modeli

Kanal Kestirim Hatası

x_k ve y_k kullanıcılarındaki SEGO değerleri, (3.100) ve (3.102), $\frac{XY}{X+Y} \leq \min(X, Y)$ ile (3.113) ve (3.114)'te ifade edildiği gibi üst-sınır yapılıdır.

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{\text{ust}} = \frac{\frac{\gamma_x \rho_e^2}{\left[\frac{P \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} \right]} \left[\frac{\gamma_y \rho_e^2}{\left[\frac{4P \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P \sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P \sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P \sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]} \right]}{\frac{\gamma_x \rho_e^2}{\left[\frac{P \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} \right]} + \frac{\gamma_y \rho_e^2}{\left[\frac{4P \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P \sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P \sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P \sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}} \quad (3.113)$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} = \frac{\frac{\gamma_x \rho_e^2}{\left[\frac{4P \sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P \sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P \sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]} \left[\frac{\gamma_y \rho_e^2}{\left[\frac{P \sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} \right]} \right]}{\frac{\gamma_x \rho_e^2}{\left[\frac{4P \sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P \sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P \sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]} + \frac{\gamma_y \rho_e^2}{\left[\frac{P \sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} \right]}} \quad (3.114)$$

KKH durumunda, AAI modelinin CDF ifadesini elde etmek için (3.26)'daki yaklaşım metodu kullanılmıştır. KKH durumunda AAI modelinin CDF ifadesi (3.115) ile ifade edilir.

$$F_{\text{AAI}}^{\text{KKH}}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) = 1 - \left[\rho_e^4 \left(\frac{1}{P \Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{1}{P \Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P \Omega_{h_k}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P \Omega_{g_k}} + \frac{1}{P \Omega_h} \right)^{1-N} \right. \\ \times \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P \Omega_{h_k}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P \Omega_{g_k}} + \frac{1}{P \Omega_g} \right)^{1-N} \\ \left. \times e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P \sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P \sigma_A^2}{N_0} + \frac{P \sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P \Omega_{h_k}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P \sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P \sigma_A^2}{N_0} + \frac{P \sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P \Omega_{g_k}}} \right] \quad (3.115)$$

İspat: Ek-2, Bölüm B.2.

Geri Bildirim Gecikmesi

Benzer şekilde, GBG durumunda x_k ve y_k kullanıcılarında alınan SEGO ifadesi (3.116) ve (3.117)'de ifade edildiği gibi $\frac{XY}{X+Y} \leq \min(X, Y)$ yardımıyla üst-sınır yapılır.

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{\text{ust}} = \frac{\frac{\gamma_x \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} \right]} \left[\frac{\gamma_y \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{4P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{f_i}^2 + \gamma_B \rho_{f_i}^2 + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]} \right]}{\frac{\gamma_x \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} \right]} + \frac{\gamma_y \rho_{f_k}^2}{\left[\frac{4P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_k}^2) \sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{f_i}^2 + \gamma_B \rho_{f_i}^2 + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{f_i}^2) \sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]}} \quad (3.116)$$

$$\begin{aligned}
\gamma_{Y_k} &\leq \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} = \\
&= \frac{\frac{\gamma_x \rho_{fk}^2}{\left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{fi}^2 + \gamma_B \rho_{fi}^2 + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]} \left[\frac{\gamma_y \rho_{fk}^2}{\left[\frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} \right]} \right]}{\frac{\gamma_x \rho_{fk}^2}{\left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{fi}^2 + \gamma_B \rho_{fi}^2 + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]} + \frac{\gamma_y \rho_{fk}^2}{\left[\frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} \right]}}
\end{aligned} \tag{3.117}$$

GBG durumunda AAİ modelinin CDF ifadesi (3.118) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{AAI}}^{(\text{GBG})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) &= 1 - \left[\rho_{fk}^4 \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right. \\
&\quad \times \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N} \\
&\quad \times e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}} \\
&\quad \left. \times e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} \right]
\end{aligned} \tag{3.118}$$

İspat: Ek-2, Bölüm B.1.

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

Geri Bildirim Gecikmesi

FEKS metodu yardımıyla uygun kullanıcı çifti seçim işleminden sonra x_k ve y_k kullanıcılarında alınan SEGO ifadeleri, (3.107) ve (3.108), [44] yardımıyla ve $\frac{XY}{X+Y} \leq \min(X, Y)$ ile (3.119) ve (3.120)'de ifade edildiği gibi üst sınır yapılır.

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{\text{ust}} = \min(|\hat{h}_k|^2 E, |\hat{g}_k|^2 F) = \min(\gamma_{h_k}^{x_k}, \gamma_{g_k}^{x_k}) \tag{3.119}$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} = \min(|\hat{h}_k|^2 J, |\hat{g}_k|^2 L) = \min(\gamma_{h_k}^{y_k}, \gamma_{g_k}^{y_k}) \tag{3.120}$$

$$E = \frac{P_r P_s \rho_{fk}^4}{(P_r P_s \rho_{fk}^2 (1-\rho_{fk}^2) \varepsilon_{h_k}^2 + P_s)}, \quad F = \frac{P_r P_s \rho_{fk}^4}{(4P_r P_s \rho_{fk}^2 (1-\rho_{fk}^2) \varepsilon_{h_k}^2 + P_r P_s \rho_{fk}^2 (1-\rho_{fk}^2) \varepsilon_{g_k}^2 + P_r \rho_{fk}^2 + P_s)}$$

$$J = \frac{P_r P_s \rho_{fk}^4}{(4P_r P_s \rho_{fk}^2 (1 - \rho_{fk}^2) \varepsilon_{gk}^2 + P_r P_s \rho_{fk}^2 (1 - \rho_{fk}^2) \varepsilon_{hk}^2 + P_r \rho_{fk}^2 + P_s)}, L = \frac{P_r P_s \rho_{fk}^4}{(P_r P_s \rho_{fk}^2 (1 - \rho_{fk}^2) \varepsilon_{gk}^2 + P_s)}$$

$\gamma_{X_k}^{\text{ust}}$ ve $\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}$ ifadelerinin CDF'leri sırasıyla (3.121) ve (3.122) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma \left(\frac{1}{E\Omega_{hk}} + \frac{1}{F\Omega_{gk}}\right)\right) \quad (3.121)$$

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma \left(\frac{1}{J\Omega_{hk}} + \frac{1}{L\Omega_{gk}}\right)\right) \quad (3.122)$$

İspat: EK-2, Bölüm B.4.

Toplam kapasite ifadesi (3.32) ile HO ifadesine dönüştürülmüştür. [79] yardımı ile HO ifadesinin CDF'i (3.123) ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} F_{\text{FEKS}}^{\text{ust(GBG)}}(\gamma_{\text{th}}) &= 1 - \gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{E\Omega_{hk}} + \frac{1}{F\Omega_{gk}}\right) \left(\frac{1}{J\Omega_{hk}} + \frac{1}{L\Omega_{gk}}\right)} \\ &\times \exp\left(\frac{-\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{1}{E\Omega_{hk}} + \frac{1}{J\Omega_{hk}} + \frac{1}{F\Omega_{gk}} + \frac{1}{L\Omega_{gk}}\right)\right) \\ &\times K_1\left(\gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{E\Omega_{hk}} + \frac{1}{F\Omega_{gk}}\right) \left(\frac{1}{J\Omega_{hk}} + \frac{1}{L\Omega_{gk}}\right)}\right) \end{aligned} \quad (3.123)$$

Maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çifti seçim işlemi sıralı istatistik [80] yardımıyla (3.124) ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} F_{\text{FEKS}}^{\text{ust(GBG)}}(\gamma_{\text{th}}) &= \prod_{k=1}^N \left[1 - \gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{E\Omega_{hk}} + \frac{1}{F\Omega_{gk}}\right) \left(\frac{1}{J\Omega_{hk}} + \frac{1}{L\Omega_{gk}}\right)} \right. \\ &\times \exp\left(\frac{-\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{1}{E\Omega_{hk}} + \frac{1}{J\Omega_{hk}} + \frac{1}{F\Omega_{gk}} + \frac{1}{L\Omega_{gk}}\right)\right) \\ &\times K_1\left(\gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{E\Omega_{hk}} + \frac{1}{F\Omega_{gk}}\right) \left(\frac{1}{J\Omega_{hk}} + \frac{1}{L\Omega_{gk}}\right)}\right) \left. \right] \end{aligned} \quad (3.124)$$

Kanal Kestirim Hatası

FEKS modelinde kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatadan dolayı ideal olmayan durumda γ_{X_k} ve γ_{Y_k} , (3.111) ve (3.112), ifadeleri [44] yardımıyla (3.125) ve (3.126) ile üst-sınır yapılıdır.

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{\text{ust}} = \min \left(|\hat{h}_k|^2 A, |\hat{g}_k|^2 B \right) = \min \left(\gamma_{h_k}^{x_k}, \gamma_{g_k}^{x_k} \right) \quad (3.125)$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} = \min \left(|\hat{h}_k|^2 C, |\hat{g}_k|^2 D \right) = \min \left(\gamma_{h_k}^{y_k}, \gamma_{g_k}^{y_k} \right) \quad (3.126)$$

$$A = \frac{P_r P_s \rho e^4}{(P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{h_k}^2 + P_s)}, B = \frac{P_r P_s \rho e^4}{(4P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{h_k}^2 + P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{g_k}^2 + P_r \rho_e^2 + P_s)},$$

$$C = \frac{P_r P_s \rho e^4}{(4P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{g_k}^2 + P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{h_k}^2 + P_r \rho_e^2 + P_s)}, D = \frac{P_r P_s \rho e^4}{(P_r P_s \rho_e^2 \varepsilon_{g_k}^2 + P_s)}$$

$\gamma_{X_k}^{\text{ust}}$ ve $\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}$ ifadelerinin CDF'leri sırasıyla (3.127) ve (3.128) ile hesaplanır.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp \left(-\gamma \left(\frac{1}{A\Omega_{hk}} + \frac{1}{B\Omega_{gk}} \right) \right) \quad (3.127)$$

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp \left(-\gamma \left(\frac{1}{C\Omega_{hk}} + \frac{1}{D\Omega_{gk}} \right) \right) \quad (3.128)$$

İspat: Ek-2, Bölüm B.3.

Benzer şekilde, toplam kapasite ifadesi (3.32) ile HO ifadesine dönüştürülmüştür. [79] yardımı ile kanal kestirim hatasının olduğu durumda HO ifadesinin CDF'i (3.129) ile hesaplanır.

$$F_{\text{FEKS}}^{\text{ust(KKH)}}(\gamma_{\text{th}}) = 1 - \gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{A\Omega_{hk}} + \frac{1}{B\Omega_{gk}} \right) \left(\frac{1}{C\Omega_{hk}} + \frac{1}{D\Omega_{gk}} \right)}$$

$$\times \exp \left(\frac{-\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{1}{A\Omega_{hk}} + \frac{1}{C\Omega_{hk}} + \frac{1}{B\Omega_{gk}} + \frac{1}{D\Omega_{gk}} \right) \right)$$

$$\times K_1 \left(\gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{A\Omega_{hk}} + \frac{1}{B\Omega_{gk}} \right) \left(\frac{1}{C\Omega_{hk}} + \frac{1}{D\Omega_{gk}} \right)} \right) \quad (3.129)$$

Maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çifti seçim işlemi sıralı istatistik [80] yardımıyla (3.130) ile hesaplanır.

$$F_{\text{FEKS}}^{\text{ust(KKH)}}(\gamma_{\text{th}}) = \prod_{k=1}^N \left[1 - \gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{A\Omega_{hk}} + \frac{1}{B\Omega_{gk}} \right) \left(\frac{1}{C\Omega_{hk}} + \frac{1}{D\Omega_{gk}} \right)} \right.$$

$$\times \exp \left(\frac{-\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{1}{A\Omega_{hk}} + \frac{1}{C\Omega_{hk}} + \frac{1}{B\Omega_{gk}} + \frac{1}{D\Omega_{gk}} \right) \right)$$

$$\left. \times K_1 \left(\gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{A\Omega_{hk}} + \frac{1}{B\Omega_{gk}} \right) \left(\frac{1}{C\Omega_{hk}} + \frac{1}{D\Omega_{gk}} \right)} \right) \right] \quad (3.130)$$

Maksimum-Minimum Metodu

Bu alt bölümde, MM tabanlı kullanıcı çifti seçimine ilişkin analitik çıkarımlara yer verilmiştir.

Kanal Kestirim Hatası

KKH durumunda MM tabanlı kullanıcı çifti seçimine ilişkin CDF ifadesi (3.131) ile gösterilir.

$$\begin{aligned}
F_{MM}^{(KKH)}(\gamma_{th}^{MM}) &= \left(\min(\gamma_{X_k}^{ust}, \gamma_{Y_k}^{ust}) \leq \underbrace{2^{2NR} - 1}_{\gamma_{th}^{MM}} \right) \\
&= 1 - P_r(\min(\gamma_{X_k}^{ust}, \gamma_{Y_k}^{ust}) \geq \gamma_{th}^{MM}) \\
&= 1 - P_r(\min(A|\hat{h}_k|^2, B|\hat{g}_k|^2) \geq \gamma_{th}^{MM}, \min(C|\hat{h}_k|^2, D|\hat{g}_k|^2) \geq \gamma_{th}^{MM}) \\
&= 1 - P_r(B|\hat{g}_k|^2 \geq \gamma_{th}^{MM}, C|\hat{h}_k|^2 \geq \gamma_{th}^{MM}) \\
&= 1 - \left[1 - F_{|\hat{g}_k|^2} \left(\frac{\gamma_{th}^{MM}}{B} \right) \right] \left[1 - F_{|\hat{h}_k|^2} \left(\frac{\gamma_{th}^{MM}}{C} \right) \right] \\
&= 1 - \exp \left(-\gamma_{th}^{MM} \left(\frac{1}{B\Omega_{gk}} + \frac{1}{C\Omega_{hk}} \right) \right) \tag{3.131}
\end{aligned}$$

Sıralı istatistikler [80] yardımı ile maksimum kullanıcı çifti seçimi (3.132) ile ifade edilir.

$$F_{MM}^{(KKH)}(\gamma_{th}^{MM}) = \prod_{k=1}^N \left[1 - \exp \left(-\gamma_{th}^{MM} \left(\frac{1}{B\Omega_{gk}} + \frac{1}{C\Omega_{hk}} \right) \right) \right] \tag{3.132}$$

Geri Bildirim Gecikmesi

Benzer şekilde, geri bildirim gecikmesi durumunda MM tabanlı kullanıcı çifti seçimine ilişkin CDF ifadesi (3.133) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{MM}}^{(\text{GBG})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) &= \left(\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}}) \leq \underbrace{2^{2NR} - 1}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}} \right) \\
&= 1 - P_r(\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}}) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) \\
&= 1 - P_r(\min(\mathbb{E}|\hat{h}_k|^2, F|\hat{g}_k|^2) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}, \min(J|\hat{h}_k|^2, L|\hat{g}_k|^2) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) \\
&= 1 - P_r(F|\hat{g}_k|^2 \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}, J|\hat{h}_k|^2 \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) \\
&= 1 - \left[1 - F_{|\hat{g}_k|^2} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}}{F} \right) \right] \left[1 - F_{|\hat{h}_k|^2} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}}{J} \right) \right] \\
&= 1 - \exp \left(-\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{1}{F\Omega_{\text{gk}}} + \frac{1}{J\Omega_{\text{hk}}} \right) \right) \tag{3.133}
\end{aligned}$$

Sıralı istatistikler [80] yardımı ile maksimum kullanıcı çifti seçimi (3.134) ile ifade edilir.

$$F_{\text{MM}}^{(\text{GBG})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) = \prod_{k=1}^N \left[1 - \exp \left(-\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{1}{F\Omega_{\text{gk}}} + \frac{1}{J\Omega_{\text{hk}}} \right) \right) \right] \tag{3.134}$$

3.2.4.2. Asimptotik Analiz

Servis Dışı Kalma Olasılığı

Aynı Anda İletim Metodu

Yüksek SGO yaklaşımıyla, $\exp(x)$ ifadesi $\exp(x) \approx 1 + x$ olarak ifade edilebilir [82]. (3.115) ve (3.118) ifadelerinde yerine yazıldığında AAİ modelinde KKH ve GBG durumları için asimptotik CDF ifadeleri sırasıyla (3.135) ve (3.136) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{AAI}}^{\infty(\text{KKH})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) &= 1 - \left[\rho_e^4 \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right. \\
&\times \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N} \left(1 - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}} \right) \\
&\left. - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}} \right) \tag{3.135}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{AAI}^{\infty(\text{GBG})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) &= 1 - \left[\rho_{fk}^4 \left(\frac{1}{P\Omega_{hk}} \right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_{hk}} \right)^{1-N} \right. \\
&\times \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_{gk}} \right)^{1-N} \\
&\times \left(1 - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}} \right. \\
&\left. \left. - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}} \right) \right] \quad (3.136)
\end{aligned}$$

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

Yüksek SGO yaklaşımı ile $\exp(x) \approx 1 + x$ ve $K_1(\cdot) \approx \frac{1}{x}$ ifadeleri (3.124) ve (3.130)'da yerine yazıldığında kanal kestirim hatasının olduğu durum ve geri bildirim gecikmesinin olduğu durumda asimptotik CDF ifadeleri sırasıyla (3.137) ve (3.138) ile ifade edilir.

$$F_{\text{FEKS}}^{\infty(\text{KKH})}(\gamma_{\text{th}}) = \prod_{k=1}^N \left[\frac{\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{1}{A\Omega_{hk}} + \frac{1}{C\Omega_{hk}} + \frac{1}{B\Omega_{gk}} + \frac{1}{D\Omega_{gk}} \right) \right] \quad (3.137)$$

$$F_{\text{FEKS}}^{\infty(\text{GBG})}(\gamma_{\text{th}}) = \prod_{k=1}^N \left[\frac{\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{1}{E\Omega_{hk}} + \frac{1}{J\Omega_{hk}} + \frac{1}{F\Omega_{gk}} + \frac{1}{L\Omega_{gk}} \right) \right] \quad (3.138)$$

Maksimum-Minimum Metodu

Yüksek SGO yaklaşımı ile $\exp(x) \approx 1 + x$ ifadesi, (3.132) ifadesinde yerine yazıldığında asimptotik CDF ifadesi (3.139) ile ifade edilir.

$$F_{\text{MM}}^{\infty(\text{KKH})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) = \prod_{k=1}^N \left[\left(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{1}{B\Omega_{gk}} + \frac{1}{C\Omega_{hk}} \right) \right) \right] \quad (3.139)$$

Benzer şekilde GBG durumda, asimptotik CDF ifadesi (3.140) ile hesaplanır.

$$F_{\text{MM}}^{\infty(\text{GBG})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) = \prod_{k=1}^N \left[\left(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{1}{F\Omega_{gk}} + \frac{1}{J\Omega_{hk}} \right) \right) \right] \quad (3.140)$$

3.2.4.3. Çeşitlilik Ölçütü Analizi

KKH ve GBG ile ilgili çeşitlilik ölçütü analizinde (3.67) ile ifade edilen çeşitlilik ölçütü ile kodlama kazancı arasındaki ilişki kullanılmıştır.

Aynı Anda İletim Modeli

KKH ve GBG durumunda AAİ modeline ilişkin asimptotik CDF ifadeleri, (3.135) ve (3.136), (3.67) uyarınca (3.141) ve (3.142) şeklinde ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 F_{AAI}^{\infty(KKH)}(\gamma_{th}^{TK}) &= 1 - \underbrace{\left[\rho_e^4 \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right]}_{\text{sabit terim}} \\
 &\times \underbrace{\left(\frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N}}_{\text{sabit terim}} \left(\underbrace{1}_{P^0} - \underbrace{\frac{\gamma_{th}^{TK} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}}_{\text{YOT}} \right) \\
 &\underbrace{- \frac{\gamma_{th}^{TK} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}}_{\text{YOT}} \right) \quad (3.141)
 \end{aligned}$$

(3.141) ifadesinde, $G_c = \text{sabit terim}$ ve $G_d = 0$ 'dır.

$$\begin{aligned}
 F_{AAI}^{\infty(GBG)}(\gamma_{th}^{TK}) &= 1 - \underbrace{\left[\rho_{fk}^4 \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right]}_{\text{sabit terim}} \\
 &\times \underbrace{\left(\frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N}}_{\text{sabit terim}} \\
 &\times \left(\underbrace{1}_{P^0} - \underbrace{\frac{\gamma_{th}^{TK} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}}_{\text{YOT}} \right) \\
 &\underbrace{- \frac{\gamma_{th}^{TK} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}}_{\text{YOT}} \right) \quad (3.142)
 \end{aligned}$$

Benzer şekilde, (3.142) ifadesinde $G_c =$ sabit terim ve $G_d = 0$ 'dır.

3.2.4.4. Optimizasyon

Röle İstasyonu Pozisyonu

Bu alt bölümde röle istasyonun en uygun konumunun belirlenmesine ilişkin matematiksel çıkarımlarda bulunulmuştur. Öngörülse olarak en uygun röle pozisyonu bütün kullanıcı çiftlerinin röle istasyonunu görebileceği nokta olan orta nokta olması beklenmektedir. Bu kapsamda, $x_k - R = d$ ve $y_k - R = 1 - d$ olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, $\Omega_g = \frac{1}{d^v}$ ve $\Omega_h = \frac{1}{(1-d)^v}$ 'dir.

Aynı Anda İletim Modeli

KKH durumunda asimptotik CDF ifadesi, (3.135), (3.143) şeklinde ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 F_{AAI}^{\infty(KKH)}(\gamma_{th}^{TK}) &= 1 - \left[\underbrace{\rho_e^A \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1}}_{x^m} \underbrace{\left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1}}_{y^m} \underbrace{\left(\frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N}}_{(a+\frac{1}{x})^m} \right. \\
 &\times \underbrace{\left(\frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N}}_{(a+\frac{1}{y})^m} \left(1 - \frac{\gamma_{th}^{TK} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}} \right) \\
 &\left. - \frac{\gamma_{th}^{TK} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}} \right) \Bigg] \\
 &= (ax + 1)^m (ay + 1)^m = \left[\left(\frac{aP}{(1-d)^v} + 1 \right) \left(\frac{aP}{(d)^v} + 1 \right) \right]^m \\
 &= \left[\left(\frac{a^2 P^2}{(d)^v (1-d)^v} + \frac{aP}{(1-d)^v} + \frac{aP}{(d)^v} + 1 \right) \right]^m \tag{3.143}
 \end{aligned}$$

Burada, $A = [a^2 P^2]$ ve $B = [aP]$ 'dir. (3.143) ifadesi d 'ye göre türev alındığında ve ifade sıfıra eşitlendiğinde (3.144) ile gösterilir.

$$\begin{aligned}
F_{AAI}^{\infty(KKH)} &= \frac{\partial}{\partial d} \left[\left(\frac{A}{d^v (1-d)^v} + \frac{B}{(1-d)^v} + \frac{B}{(d)^v} + 1 \right) \right]^{1-N} \\
&= \left[\frac{A}{vd^{v-1}v(1-d)^{v-1}} + \frac{B}{v(1-d)^{v-1}} + \frac{B}{v(d)^{v-1}} \right]^{1-N} = 0 \\
\frac{A}{vd^{v-1}v(1-d)^{v-1}} &= \frac{Bv(d)^{v-1}}{v(d)^{v-1}v(1-d)^{v-1}} + \frac{Bv(1-d)^{v-1}}{v(d)^{v-1}v(1-d)^{v-1}} \\
v(d)^{v-1} &= v(1-d)^{v-1} \\
d &= \frac{1}{2}
\end{aligned} \tag{3.144}$$

Aynı yöntem GBG durumu için uygulandığında asimptotik CDF ifadesi, (3.136), (3.145) ile gösterilir.

$$\begin{aligned}
F_{AAI}^{\infty(GBG)}(\gamma_{th}^{TK}) &= 1 - \left[\rho_{fk}^4 \underbrace{\left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1}}_{x^m} \underbrace{\left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1}}_{y^m} \underbrace{\left(\frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N}}_{(a+\frac{1}{x})^m} \right. \\
&\times \underbrace{\left(\frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N}}_{(a+\frac{1}{y})^m} \\
&\times \left(1 - \frac{\gamma_{th}^{TK} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}} \right. \\
&\left. - \frac{\gamma_{th}^{TK} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}} \right) \Bigg] \\
&= (ax+1)^m (ay+1)^m = \left[\left(\frac{aP}{(1-d)^v} + 1 \right) \left(\frac{aP}{(d)^v} + 1 \right) \right]^m \\
&= \left[\left(\frac{a^2 P^2}{(d)^v (1-d)^v} + \frac{aP}{(1-d)^v} + \frac{aP}{(d)^v} + 1 \right) \right]^m
\end{aligned} \tag{3.145}$$

Benzer şekilde burada, $A = [a^2 P^2]$ ve $B = [aP]$ 'dir. d 'ye göre türev alındığında ve ifade sifira eşitlendiğinde (3.145) ifadesi (3.146) ile gösterilir.

$$\begin{aligned}
F_{AAI}^{\infty(\text{GBG})} &= \frac{\partial}{\partial d} \left[\left(\frac{A}{d^v (1-d)^v} + \frac{B}{(1-d)^v} + \frac{B}{(d)^v} + 1 \right) \right]^{1-N} \\
&= \left[\frac{A}{vd^{v-1}v(1-d)^{v-1}} + \frac{B}{v(1-d)^{v-1}} + \frac{B}{v(d)^{v-1}} \right]^{1-N} = 0 \\
\frac{A}{vd^{v-1}v(1-d)^{v-1}} &= \frac{Bv(d)^{v-1}}{v(d)^{v-1}v(1-d)^{v-1}} + \frac{Bv(1-d)^{v-1}}{v(d)^{v-1}v(1-d)^{v-1}} \\
v(d)^{v-1} &= v(1-d)^{v-1} \implies d = \frac{1}{2}
\end{aligned} \tag{3.146}$$

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

x kullanıcısı ile röle istasyonu arasındaki mesafenin $x_k - R = d$ ve y kullanıcısı ile röle arasındaki mesafenin $y_k - R = 1 - d$ olduğu varsayılmıştır. $\Omega_{gk} = \frac{1}{d^v}$ ve $\Omega_{hk} = \frac{1}{(1-d)^v}$ varsayımları kullanarak KKH durumunda asimptotik CDF ifadesi, (3.137), (3.147) şeklinde tekrardan ifade edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{FEKS}}^{\infty(\text{KKH})}(\gamma_{\text{th}}) &= \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{\text{th}} \left(\frac{1}{(1-d)^v} + \frac{1}{(1-d)^v} + \frac{1}{(d)^v} + \frac{1}{(d)^v} \right) \right] \\
&= \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{\text{th}} \left(\frac{A+C}{AC(1-d)^v} + \frac{B+D}{BD(d)^v} \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.147}$$

Burada, $a = \left[\gamma_{\text{th}} \frac{A+C}{AC} \right]$ ve $b = \left[\gamma_{\text{th}} \frac{B+D}{BD} \right]$ 'dir.

a ve b ifadeleri birbirine eşit olduğundan dolayı (3.147), (3.148) şeklinde sadeleştirilebilir.

$$F_{\text{FEKS}}^{\infty(\text{KKH})}(\gamma_{\text{th}}) = [a(1-d)^v + a(d)^v]^N \tag{3.148}$$

d ifadesine göre türev alındığında ve ifade sıfıra eşitlendiğinde (3.149) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{FEKS}}^{\infty(\text{KKH})} &= \frac{\partial}{\partial d} [a(1-d)^v + b(d)^v]^N = [va(1-d)^{v-1} + va(d)^{v-1}]^N = 0 \\
&= va(1-d)^{v-1} = va(d)^{v-1} \implies (1-d)^{v-1} = (d)^{v-1} \implies d = \frac{1}{2}
\end{aligned} \tag{3.149}$$

Benzer şekilde, GBG durumunda röle istasyonunun pozisyonu için x kullanıcısı ile röle istasyonu arasındaki mesafe, $x_k - R = d$ ve $y_k - R = 1 - d$ olduğu varsayılmıştır. $\Omega_{gk} = \frac{1}{d^v}$ ve $\Omega_{hk} = \frac{1}{(1-d)^v}$ 'dir. Bu varsayımlar sonrasında asimptotik CDF ifadesi, (3.138), (3.150)

ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} F_{\text{FEKS}}^{\infty(\text{GBG})}(\gamma_{\text{th}}) &= \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{\text{th}} \left(\frac{1}{\frac{E}{(1-d)^v}} + \frac{1}{\frac{J}{(1-d)^v}} + \frac{1}{\frac{F}{(d)^v}} + \frac{1}{\frac{L}{(d)^v}} \right) \right] \\ &= \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{\text{th}} \left(\frac{E+J}{EJ(1-d)^v} + \frac{F+L}{FL(d)^v} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.150)$$

Burada, $a = \left[\gamma_{\text{th}} \frac{E+J}{EJ} \right]$ ve $b = \left[\gamma_{\text{th}} \frac{F+L}{FL} \right]$ 'dir.

a ve b ifadeleri birbirine eşit olduğu için (3.150) ifadesi (3.151) ile ifade edilir.

$$F_{\text{FEKS}}^{\infty(\text{GBG})} = [a(1-d)^v + a(d)^v]^N \quad (3.151)$$

(3.151) ifadesinin, d 'ye göre türevi alındığında ve ifade sıfıra eşitlendiğinde (3.152) elde edilir.

$$\begin{aligned} F_{\text{FEKS}}^{\infty(\text{GBG})} &= \frac{\partial}{\partial d} [a(1-d)^v + b(d)^v]^N = [va(1-d)^{v-1} + va(d)^{v-1}]^N = 0 \\ &= va(1-d)^{v-1} = va(d)^{v-1} \implies (1-d)^{v-1} = (d)^{v-1} \implies d = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (3.152)$$

Maksimum-Minimum Metodu

x kullanıcısı ile röle arasındaki uzaklık $x_k - R = d$ ve y kullanıcısı ile röle arasındaki uzaklık $y_k - R = 1 - d$ belirlendiği ve $\Omega_{gk} = \frac{1}{d^v}$ ve $\Omega_{hk} = \frac{1}{(1-d)^v}$ durumunda asimptotik CDF ifadesinde, (3.139), yerine yazıldığında (3.153) ifadesi elde edilir.

$$F_{\text{MM}}^{\infty(\text{KKH})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) = \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{1}{\frac{B}{(d)^v}} + \frac{1}{\frac{C}{(1-d)^v}} \right) \right] \quad (3.153)$$

Burada, $a = \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \frac{1}{B} \right]$ ve $b = \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \frac{1}{C} \right]$ 'dir. a ve b ifadeleri birbirine eşit olduğundan dolayı (3.153) ifadesi (3.154) ile ifade edilebilir.

$$F_{\text{MM}}^{\infty(\text{KKH})} = [a(d)^v + b(1-d)^v]^N \quad (3.154)$$

(3.154) ifadesinin d 'ye göre türev alındığında ve ifade sıfıra eşitlendiğinde (3.155) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{MM}}^{\infty(\text{KKH})} &= \frac{\partial}{\partial d} [a(d)^v + b(1-d)^v]^N = [va(d)^{v-1} + vb(1-d)^{v-1}]^N = 0 \\
&= va(d)^{v-1} = vb(1-d)^{v-1} \implies (d)^{v-1} = (1-d)^{v-1} \implies d = \frac{1}{2} \quad (3.155)
\end{aligned}$$

Benzer şekilde GBG durumunda, $x_k - R = d$ ve $y_k - R = 1 - d$ 'dir. $\Omega_{gk} = \frac{1}{d^v}$ ve $\Omega_{hk} = \frac{1}{(1-d)^v}$ 'dir.

Bu ifadeler asimptotik CDF ifadesinde, (3.140), yerine yazıldığında (3.156) ifadesi elde edilir.

$$F_{\text{MM}}^{\infty(\text{GBG})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) = \prod_{k=1}^N \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{1}{(d)^v} + \frac{1}{(1-d)^v} \right) \right] \quad (3.156)$$

Burada, $a = [\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \frac{1}{F}]$ ve $b = [\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \frac{1}{J}]$ 'dir. a ve b ifadeleri birbirine eşit olduğu için (3.156) ifadesi (3.157) şeklinde yazılabilir.

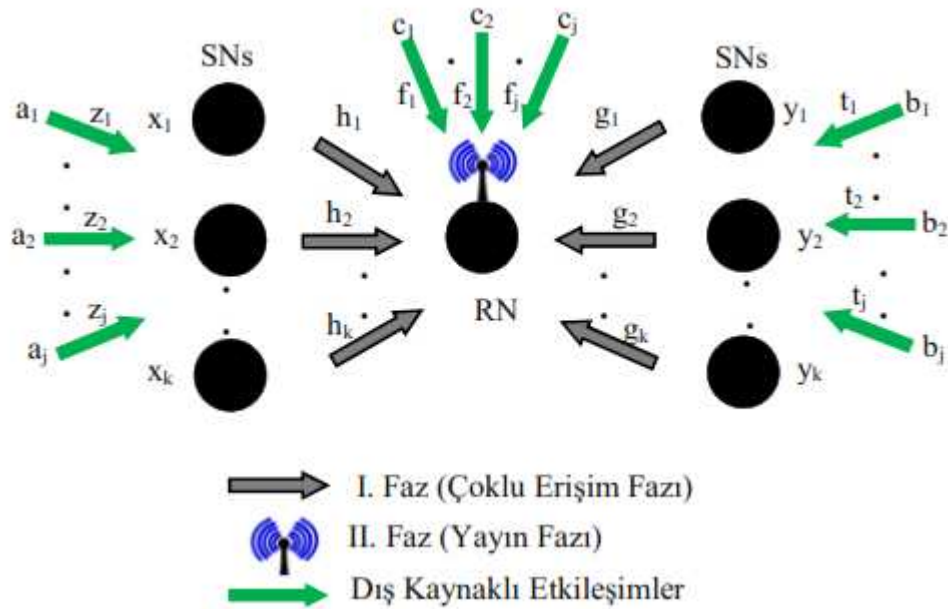
$$F_{\text{MM}}^{\infty(\text{GBG})} = [a(d)^v + b(1-d)^v]^N \quad (3.157)$$

(3.157) ifadesinin d'ye göre türev alındığında ve ifade sıfıra eşitlendiğinde (3.158) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{MM}}^{\infty(\text{GBG})} &= \frac{\partial}{\partial d} [a(d)^v + b(1-d)^v]^N = [va(d)^{v-1} + vb(1-d)^{v-1}]^N = 0 \\
va(d)^{v-1} &= vb(1-d)^{v-1} \implies (d)^{v-1} = (1-d)^{v-1} \implies d = \frac{1}{2} \quad (3.158)
\end{aligned}$$

3.3. DIŞ KAYNAKLI EŞ-KANAL ETKİLEŞİMLERİN ÇOK KULLANICILI KABLOSUZ İKİ YÖNLÜ RÖLELİ MODELE ETKİLERİ

Bu bölümde dış kaynaklı istasyonlardan kaynaklı eş-kanal etkileşimlerin çok kullanıcı YG tabanlı iki yönlü röleli sistem modeli üzerine olan etkileri incelenmektedir. Dış kaynaklı istasyonlar, aynı veya komşu hüresel kapsama alanı içindeki hareketli (mobil) cihazlar veya röle istasyonları olabilmektedir. İnceleme sırasında dış kaynaklı eş-kanal etkileşimlerin AAİ modeli ve FEKS metodları üzerine olan etkileri belirlenmeye çalışılmaktadır. FEKS metodu, sistem içerisinde bulunan kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşan hücre-içi etkileşim problemine mükemmel yakın bir çözüm sağlamaktadır. Fakat dış kaynaklı istasyonlardan kaynaklı etkileşimler kaçınılmazdır ve sistem performansı üzerine olumsuz etkileri olmaktadır. Sonlu sayıda dış kaynaklı etkileşimlerin olduğu çok kullanıcı kablosuz iki yönlü haberleşme modeli şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Sonlu sayıda dış kaynaklı etkileşimlerin etkisi altında çok kullanıcıli iki yönlü kablosuz röleli ağ haberleşme modeli.

x_k ve y_k kullanıcı çiftleri YG tabanlı yarı-zamanlı iki yönlü röle ile veri alışverişi yapmaktadır. Sistem içerisinde bulunan her bir istasyon bir adet çok yönlü antene sahiptir. x_k ve y_k kullanıcı çiftleri arasında gölgeleme etkisinden dolayı herhangi bir direkt hat bulunmamaktadır. h_k ve g_k $k \in \{1, \dots, N\}$ sırasıyla x hattı kullanıcıları ile röle arası ve y hattı kullanıcıları ile röle arasındaki kanal tepki cevabını ifade etmektedir. h_k 'lar birbi-

rinden bağımsız sıfır ortalamalı ve σ_{hk}^2 varyansına sahip karmaşık Gauss rastgele değişkenleridir. ($h_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{hk}^2)$). Benzer şekilde, g_k 'lar da birbirinden bağımsız karmaşık Gauss rastgele değişkenidir. $g_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{gk}^2)$. Bütün kanalların genliklerinin Rayleigh düz-sönümlmeli dağılımına sahip oldukları varsayılmıştır. Çoklu erişim fazı ve yayın fazı kanalları karşılıklıdır. a_j, b_j ve $c_j, j \in \{1, \dots, M\}$ dış kaynaklı istasyonların sırasıyla x hattı kullanıcılarına, y hattı kullanıcılarına ve röle istasyonuna olan etkileşimleridir. z_j, f_j ve t_j sırasıyla j ' inci dış kaynaklı etkileşim terminali ile x hattı kullanıcıları, röle terminali ve y hattı kullanıcıları arasındaki kanal tepki cevabını ifade etmektedir. z_j 'ler birbirinden bağımsız karmaşık Gauss rastgele değişkenleridir. $z_j \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{zj}^2)$. f_j 'ler ve t_j 'ler de bağımsız ve sırasıyla $f_j \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{fj}^2)$ ve $t_j \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{tj}^2)$ şeklinde gösterilir. Dış kaynaklı kanalların genliklerinin de Rayleigh düz-sönümlmeli dağılıma sahip olduğu varsayılmıştır. x_k ve y_k istasyonları P_s iletim gücüne sahiptirler. Röle terminali P_r iletim gücüne sahiptir. Röle terminaline etki eden dış kaynaklı istasyon P_{er} iletim gücüne sahiptir. x hattı ve y hattı kullanıcılarına etki eden dış kaynaklı etkileşimler ise sırasıyla P_{es1} ve P_{es2} iletim güçlerine sahiptir.

3.3.1. Aynı Anda İletim Modeli

AAİ modelinde I. faz (çoklu erişim fazı) sonrası röle istasyonunda alınan sinyal, Z_r , eşitlik (3.159) ile formülize edilir.

$$Z_r = \sum_{k=1}^N x_k h_k \sqrt{P_s} + \sum_{k=1}^N y_k g_k \sqrt{P_s} + \sum_{j=1}^M c_j f_j \sqrt{P_{Er}} + n_r \quad (3.159)$$

(3.159)'da sol baştan ilk ve ikinci terimler x ve y hattı kullanıcılarının verilerini, üçüncü terim röle istasyonuna etki eden dış kaynaklı etkileşimleri ifade etmektedir. Dördüncü terim, n_r , rölede oluşan ısı gürültüyü ifade etmektedir. Oluşan ısı gürültü sıfır ortalamalı ve N_o varyansına sahiptir. Rölede alınan sinyal G yükseltme katsayısı ile çarpılır. Yükseltme katsayısı (3.160) ile ifade edilir.

$$G = \frac{\sqrt{P_r}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N P_s |h_k|^2 + \sum_{k=1}^N P_s |g_k|^2 + \sum_{j=1}^M P_{Er} |f_j|^2 + N_o}} \quad (3.160)$$

(3.160)'da pay ifadesindeki P_r terimi, rölenin ikinci faz sırasında kullandığı iletim gücünü ifade etmektedir. Payda ifadesindeki terimler sol baştan sırasıyla x hattı, y hattı ve dış kaynaklı istasyonlardan gelen güç ifadelerini belirtmektedir. Dördüncü terim ise ısı gürültünün varyansını temsil etmektedir. II. fazda, röle istasyonu yükseltilmiş olan sinyali tüm kullanıcılara yayınlar. x_k ve y_k kullanıcı çiftlerinde alınan sinyaller, Z_{x_k} ve Z_{y_k} , sırasıyla (3.161) ve (3.162) ile ifade edilir.

$$Z_{X_k} = GZ_r h_k + \sum_{j=1}^M a_j z_j \sqrt{P_{es1}} + n_{x_k} \quad (3.161)$$

$$Z_{Y_k} = GZ_r g_k + \sum_{j=1}^M b_j t_j \sqrt{P_{es2}} + n_{y_k} \quad (3.162)$$

(3.161) ve (3.162)'de sol baştan ilk terimler, x_k ve y_k kullanıcılarında alınan röle tarafından yükseltilen sinyalleri ifade etmektedir. İkinci terimler ise sırasıyla x_k ve y_k kullanıcılarına etkileyen dış kaynaklı etkileşimleri ifade etmektedir. n_{x_k} ve n_{y_k} ifadeleri sırasıyla x_k ve y_k istasyonlarında oluşan ısı gürültüyü ifade etmektedir. Z_r , (3.159), ifadesi (3.161) ve (3.162)'de yerine yazılırsa, x_k ve y_k kullanıcılarında alınan sinyallerin genişletilmiş halleri sırasıyla (3.163) ve (3.164) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} Z_{X_k} = & Gx_k h_k^2 \sqrt{P_s} + Gy_k g_k h_k \sqrt{P_s} + G \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i h_i h_k \sqrt{P_s} + G \sum_{i=1, i \neq k}^N y_i g_i h_k \sqrt{P_s} \\ & + G \sum_{j=1}^M c_j f_j h_k \sqrt{P_{Er}} + \sum_{j=1}^M a_j z_j \sqrt{P_{Es1}} + Gh_k n_r + n_{x_k} \end{aligned} \quad (3.163)$$

$$\begin{aligned} Z_{Y_k} = & Gy_k g_k^2 \sqrt{P_s} + Gx_k g_k h_k \sqrt{P_s} + G \sum_{i=1, i \neq k}^N y_i g_i g_k \sqrt{P_s} + G \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i h_i g_k \sqrt{P_s} \\ & + G \sum_{j=1}^M c_j f_j g_k \sqrt{P_{Er}} + \sum_{j=1}^M b_j t_j \sqrt{P_{Es2}} + Gg_k n_r + n_{y_k} \end{aligned} \quad (3.164)$$

(3.163) ve (3.164)'te birinci satır sol baştan ilk ifade, x_k ve y_k kullanıcılarının kendi gönderdiği ifadedir. "kendi etkileşim iptali" veya "yankı iptali" yöntemleri ile toplam sinyal içerisinden çıkarılır. Birinci satır ikinci ifade ise x_k ve y_k kullanıcılarının eş-kullanıcılarına ait verilerdir ve "faydalı veri" olarak kullanılır. Birinci satır üçüncü ve dördüncü ifadeler, sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı etkileşimleri ifade etmektedir. (3.163)'te birinci satır üçüncü ifade x hattı kullanıcılarından gelen, dördüncü ifade ise y

hattı kullanıcılarından gelen ifadeleri temsil etmektedir. (3.164)'te ise birinci satır üçüncü ifade y hattı kullanıcılarından gelen dördüncü ifade ise x hattı kullanıcılarından gelen ifadeleri temsil etmektedir. (3.163)'te ikinci satır sol baştan ilk ve ikinci ifadeler sırasıyla röleye ve x_k 'ya etkiyen dış kaynaklı etkileşimleri ifade etmektedir. Benzer şekilde, (3.164)'te ikinci satır sol baştan ilk ve ikinci ifadeler sırasıyla röleye ve y_k 'ya etkiyen dış kaynaklı etkileşimleri ifade etmektedir. (3.163) ve (3.164)'te ikinci satırdaki üçüncü ve dördüncü ifadeler sırasıyla gürültünün rölede yükseltilmiş halini ve x_k ve y_k kullanıcılarında oluşan ısı gürültüyü temsil etmektedir. (3.163) ve (3.164) yardımıyla x_k ve y_k kullanıcılarındaki SEGO ifadeleri sırasıyla (3.165) ve (3.166)'daki gibi hesaplanır.

$$\gamma_{X_k} = \frac{G^2 P_s |g_k|^2 |h_k|^2}{\left[G^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |h_i|^2 |h_k|^2 P_s + G^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |g_i|^2 |h_k|^2 P_s + G^2 \sum_{j=1}^M |f_j|^2 |h_k|^2 P_{Er} + \sum_{j=1}^M |z_j|^2 P_{Es1} + G^2 |h_k|^2 N_0 + N_0 \right]} \quad (3.165)$$

$$\gamma_{Y_k} = \frac{G^2 P_s |g_k|^2 |h_k|^2}{\left[G^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |g_i|^2 |g_k|^2 P_s + G^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |g_k|^2 |h_i|^2 P_s + G^2 \sum_{j=1}^M |f_j|^2 |g_k|^2 P_{Er} + \sum_{j=1}^M |t_j|^2 P_{Es2} + G^2 |g_k|^2 N_0 + N_0 \right]} \quad (3.166)$$

G, (3.160), yükseltme katsayısı (3.165)'te yerine yazıldığında ve matematiksel işlemler sonrasında x_k kullanıcılarındaki SEGO ifadesi (3.167) ile tekrar hesaplanır.

$$\gamma_{X_k} = \frac{\frac{P_s P_r |h_k|^2 |g_k|^2}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |h_i|^2 P_s + \sigma^2 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |g_i|^2 P_s + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M |f_j|^2 P_{Er} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M |z_j|^2 P_{Es1} + \sigma^2 \right]}}{\left[\frac{p_r |h_k|^2}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |g_i|^2 P_s + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M |f_j|^2 P_{Er} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M |z_j|^2 P_{Es1} + \sigma^2 \right]} \right]}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{p_r |h_k|^2}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |h_i|^2 P_s + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M |f_j|^2 P_{Er} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M |z_j|^2 P_{Es1} + \sigma^2 \right]} \\
& + \frac{p_r |h_k|^2}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |h_i|^2 P_s + \sigma^2 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |g_i|^2 P_s + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M |z_j|^2 P_{Es1} + \sigma^2 \right]} \\
& + \frac{p_s |h_k|^2 + p_s |g_k|^2}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |h_i|^2 P_s + \sigma^2 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N |g_i|^2 P_s + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M |f_j|^2 P_{Er} + \sigma^2 \right]} + 1 \Big] \quad (3.167)
\end{aligned}$$

Sistem içerisindeki her bir kullanıcı çiftinin ve rölenin eş iletim gücüne sahip olduğu ve bu değer P 'ye eşit olduğu varsayılmıştır ($P_s = P_r = P$). Bu varsayım ile (3.167)

ifadesi (3.168)'deki gibi sadeleştirilebilir. Burada, $\gamma_x = \frac{P|h_k|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_y = \frac{P|g_k|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_{xi} = \frac{P|h_i|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_{yi} = \frac{P|g_i|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_{fj} = \frac{P_{er}|f_j|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_{zj} = \frac{P_{es1}|z_j|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_{tj} = \frac{P_{es2}|t_j|^2}{\sigma^2}$, dir.

$$\begin{aligned}
\gamma_{X_k} &= \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{hi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{gi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{zj} + \sigma^2 \right]}}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{gi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{zj} + \sigma^2 \right]} \\
& + \frac{\gamma_x}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{hi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{zj} + \sigma^2 \right]} \\
& + \frac{\gamma_x}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{hi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{gi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{zj} + \sigma^2 \right]} \\
& + \frac{\gamma_x + \gamma_y}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{hi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{gi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right]} + 1 \Big] \quad (3.168)
\end{aligned}$$

Benzer şekilde, γ_{Y_k} , (3.166), ifadesi (3.169)'daki gibi tekrar hesaplanır.

$$\begin{aligned}
\gamma_{Y_k} = & \frac{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{hi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{gi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{tj} + \sigma^2 \right]}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{hi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{tj} + \sigma^2 \right]} \\
& + \frac{\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{gi} + \sigma^2}{\left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{tj} + \sigma^2 \right]} \\
& + \frac{\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{hi} + \sigma^2}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{gi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{tj} + \sigma^2 \right]} \\
& + \left. \frac{\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{hi} + \sigma^2}{\left[\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{gi} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right]} + 1 \right] \quad (3.169)
\end{aligned}$$

3.3.2. Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

(3.12) ifadesi uyarınca sistem içerisindeki her bir kullanıcı çiftinin toplam kapasitesinin belirlenmesi ve (3.13) yardımıyla uygun kullanıcı çiftinin seçimiyle I. faz sonrasında rölede alınan sinyal (3.170) ile ifade edilir.

$$Z_{S_r} = x_k h_k \sqrt{P_s} + y_k g_k \sqrt{P_s} + \sum_{j=1}^M c_j f_j \sqrt{P_{er}} + n_r \quad (3.170)$$

II. fazda röle istasyonu analog ağ kodlaması yapılmış olan sinyali, (3.170), yükselterek kullanıcılara yayınlar. II. faz sonrası x_k kullanıcılarında alınan sinyal (3.171) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
Z_{X_k} = & G x_k h_k^2 \sqrt{P_s} + G y_k g_k h_k \sqrt{P_s} + G \sum_{j=1}^M c_j f_j h_k \sqrt{P_{er}} + \sum_{j=1}^M a_j z_j \sqrt{P_{es1}} \\
& + G h_k n_r + n_{x_k} \quad (3.171)
\end{aligned}$$

Benzer şekilde, y_k istasyonunda alınan sinyal (3.172) ile ifade edilir.

$$Z_{Y_k} = Gy_k g_k^2 \sqrt{P_s} + Gx_k g_k h_k \sqrt{P_s} + G \sum_{j=1}^M c_j f_j g_k \sqrt{P_{er}} + \sum_{j=1}^M b_j t_j \sqrt{P_{es2}} + Gg_k n_r + n_{y_k} \quad (3.172)$$

(3.171) ve (3.172)'de birinci satır sol baştan ilk ifadeler x_k ve y_k kullanıcılarının kendi verileridir. İkinci ifadeler ise x_k ve y_k 'nin eş kullanıcılarından beklediği faydalı verilerdir. Birinci satır üçüncü ve dördüncü ifadeler dış kaynaklı istasyonlardan kaynaklı etkileşimleri ifade etmektedir. (3.171)'de birinci satır üçüncü ve dördüncü ifadeler sırasıyla röleye ve x_k kullanıcılarına etkiyen dış kaynaklı etkileşimleri ifade etmektedir. Benzer şekilde, (3.172)'de birinci satır üçüncü ve dördüncü ifadeler, röleye ve y_k kullanıcılarına etkiyen dış kaynaklı etkileşimleri ifade etmektedir. (3.171) ve (3.172)'de ikinci satırlar yükseltilmiş gürültüyü ve x_k ve y_k kullanıcılarındaki ısıl gürültüyü ifade etmektedir.

(3.171) ve (3.172) ifadelerinden görülebileceği üzere FEKS metodu sistem içerisindeki kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşan hücre-içi etkileşim problemine çözüm olmasına rağmen dış kaynaklı istasyonlardan kaynaklı etkileşimlere herhangi bir etkisi olmamaktadır. (3.171) ve (3.172) yardımıyla x_k ve y_k kullanıcılarındaki SEGO ifadeleri sırasıyla (3.173) ve (3.174) ile hesaplanır.

$$\gamma_{X_k} = \frac{G^2 P_s |g_k|^2 |h_k|^2}{\left[G^2 \sum_{j=1}^M |f_j|^2 |h_k|^2 P_{er} + \sum_{j=1}^M |z_j|^2 P_{es1} + G^2 |h_k|^2 N_0 + N_0 \right]} \quad (3.173)$$

$$\gamma_{Y_k} = \frac{G^2 P_s |g_k|^2 |h_k|^2}{\left[G^2 \sum_{j=1}^M |f_j|^2 |g_k|^2 P_{er} + \sum_{j=1}^M |t_j|^2 P_{es2} + G^2 |g_k|^2 N_0 + N_0 \right]} \quad (3.174)$$

G ifadesi FEKS işlemi sonrasında (3.175)'teki gibi tekrar hesaplanır.

$$G = \frac{\sqrt{P_r}}{\sqrt{P_s |h_k|^2 + P_s |g_k|^2 + \sum_{j=1}^M P_{er} |f_j|^2 + N_0}} \quad (3.175)$$

G ifadesi, (3.175), (3.173)'te yerine yazılırsa x_k kullanıcılarındaki γ_{X_k} ifadesi (3.176) ile tekrar formülize edilir.

$$\gamma_{X_k} = \frac{\frac{P_s P_r |h_k|^2 |g_k|^2}{\left[\sum_{j=1}^M |f_j|^2 P_{er} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M |z_j|^2 P_{es1} + \sigma^2 \right]}}{\frac{p_r |h_k|^2}{\left[\sum_{j=1}^M |z_j|^2 P_{es1} + \sigma^2 \right]} + \frac{p_s |h_k|^2}{\left[\sum_{j=1}^M |f_j|^2 P_{er} + \sigma^2 \right]} + \frac{p_s |g_k|^2}{\left[\sum_{j=1}^M |f_j|^2 P_{er} + \sigma^2 \right]} + 1} \quad (3.176)$$

Sistem modeli içerisindeki kullanıcı çiftlerinin ve röle istasyonunun iletim güçlerinin bir-biri ile aynı ve P değerine eşit olduğu ($P_s = P_r = P$) varsayıldığında (3.176) ifadesi (3.177)'deki gibi sadeleştirilir. Burada, $\gamma_x = \frac{P|h_k|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_y = \frac{P|g_k|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_{fj} = \frac{P_{er}|f_j|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_{zj} = \frac{P_{es1}|z_j|^2}{\sigma^2}$, $\gamma_{tj} = \frac{P_{es2}|t_j|^2}{\sigma^2}$, dir.

$$\gamma_{X_k} = \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{\left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{zj} + \sigma^2 \right]}}{\frac{\gamma_x}{\left[\sum_{j=1}^M \gamma_{zj} + \sigma^2 \right]} + \frac{\gamma_x}{\left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right]} + \frac{\gamma_y}{\left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right]} + 1} \quad (3.177)$$

Benzer şekilde, y_k kullanıcılarındaki γ_{Y_k} ifadesi (3.178)'deki gibi ifade edilir.

$$\gamma_{Y_k} = \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{\left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right] \left[\sum_{j=1}^M \gamma_{tj} + \sigma^2 \right]}}{\frac{\gamma_y}{\left[\sum_{j=1}^M \gamma_{tj} + \sigma^2 \right]} + \frac{\gamma_x}{\left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right]} + \frac{\gamma_y}{\left[\sum_{j=1}^M \gamma_{fj} + \sigma^2 \right]} + 1} \quad (3.178)$$

3.3.3. Performans Analizi

3.3.3.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı

Bu alt bölümde AAİ modeli ve FEKS metodlarının servis dışı kalma olasılığı performans ifadelerine yer verilmiştir.

Aynı Anda İletim Modeli

(3.168) ifadesi, $\frac{X.Y}{X+Y} \leq \min(X, Y)$ yardımıyla (3.179)'da gösterildiği gibi üst-sınır ile formülize edilir.

$$\begin{aligned} \gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{\text{ust}} &= \frac{\gamma_x \gamma_y}{\gamma_x(\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_D) + \gamma_y(\gamma_D)} = \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{(\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_D)}}{\gamma_x + \frac{\gamma_y \gamma_D}{(\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_D)}} \\ &= \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{(\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_D) \gamma_D}}{\frac{\gamma_x}{\gamma_D} + \frac{\gamma_y}{(\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_D)}} = \frac{XY}{X + Y} \end{aligned} \quad (3.179)$$

Benzer şekilde, (3.169) ifadesinin üst sınırları (3.180) ile ifade edilir.

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} = \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{(\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_E) \gamma_E}}{\frac{\gamma_y}{\gamma_E} + \frac{\gamma_x}{(\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_E)}} = \frac{XY}{X + Y} \quad (3.180)$$

(3.179) ve (3.180) ifadelerinde, $\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{x_i} + 1 = \gamma_A$; $\sum_{i=1, i \neq k}^N \gamma_{y_i} + 1 = \gamma_B$; $\sum_{j=1}^M \gamma_{f_j} + 1 = \gamma_C$;
 $\sum_{j=1}^M \gamma_{z_j} + 1 = \gamma_D$; $\sum_{j=1}^M \gamma_{t_j} + 1 = \gamma_E$ eşittir.

$\gamma_{X_k}^{\text{ust}}$ ve $\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}$ ifadelerinin CDF'leri sırasıyla (3.181) ve (3.182) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) &= \left[1 - \left(\frac{P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z)} \right)^M \left(\frac{((P\Omega_{gk})^{2M+2L} / (P_{es1}\Omega_z)^M)}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es1}\Omega_{z_j})^{2M+2L}} \right) \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^L \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^L \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \exp \left(-\gamma \left(\frac{4}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_{hk}} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (3.181)$$

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) &= \left[1 - \left(\frac{P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_z}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t)} \right)^M \left(\frac{((P\Omega_{hk})^{2M+2L} / (P_{es2}\Omega_t)^M)}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es2}\Omega_t)^{2M+2L}} \right) \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^L \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^L \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \exp \left(-\gamma \left(\frac{4}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (3.182)$$

İspat: EK-3, Bölüm C.1.

AAİ modeli için "Toplam Kapasite" ifadesi (3.26)'da ifade edilen yaklaşım kullanılarak $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ ifadesine dönüştürülmektedir. Dış kaynaklı etkileşimlerin olduğu sistem modeline ilişkin $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ ifadesinin CDF'i (3.183) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
F_{AAI}(\gamma_{th}^{TK}) &= 1 - \left[e^{-\gamma_{th}^{TK} \left(\frac{4}{P\Omega_{hk}} + \frac{4}{P\Omega_{gk}} \right)} \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right] \\
&\times \left[\left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N} \right] \\
&\times \left[\left(\frac{1}{Per\Omega_f} \right)^M \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{Per\Omega_f} \right)^{-M} \right] \\
&\times \left[\left(\frac{1}{Pes2\Omega_t} \right)^M \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{Pes2\Omega_t} \right)^{-M} \right] \\
&\times \left[\left(\frac{1}{Pes1\Omega_z} \right)^M \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{Pes1\Omega_z} \right)^{-M} \right] \tag{3.183}
\end{aligned}$$

İspat: Ek-3, Bölüm C.4.

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

FEKS metodu için γ_{X_k} , (3.177), ve γ_{Y_k} , (3.178), ifadeleri $\frac{XY}{X+Y} \leq \min(X, Y)$ ile (3.185) ve (3.187)'deki gibi üst sınır yapılır.

$$\begin{aligned}
\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{ust} &= \frac{\gamma_x \gamma_y}{\gamma_x(\gamma_C + \gamma_D) + \gamma_y(\gamma_D)} = \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{(\gamma_C + \gamma_D)}}{\gamma_x + \frac{\gamma_y \gamma_D}{(\gamma_C + \gamma_D)}} \\
&= \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{(\gamma_C + \gamma_D) \gamma_D}}{\frac{\gamma_x}{\gamma_D} + \frac{\gamma_y}{(\gamma_C + \gamma_D)}} = \frac{XY}{X + Y} \tag{3.184}
\end{aligned}$$

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{ust} = \min\left(\frac{\gamma_x}{\gamma_D}, \frac{\gamma_y}{(\gamma_C + \gamma_D)}\right) = \min(\gamma_{hk}^{xk}, \gamma_{gk}^{xk}) \tag{3.185}$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{ust} = \frac{\frac{\gamma_x \gamma_y}{(\gamma_C + \gamma_E) \gamma_E}}{\frac{\gamma_y}{\gamma_E} + \frac{\gamma_x}{(\gamma_C + \gamma_E)}} = \frac{XY}{X + Y} \tag{3.186}$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{ust} = \min\left(\frac{\gamma_y}{\gamma_E}, \frac{\gamma_x}{(\gamma_C + \gamma_E)}\right) = \min(\gamma_{hk}^{yk}, \gamma_{gk}^{yk}) \tag{3.187}$$

$\gamma_{X_k}^{\text{ust}}$ ve $\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}$ ifadelerinin CDF'leri sırasıyla (3.188) ve (3.189)'daki gibi hesaplanır.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = \left[1 - \left(\frac{P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z)} \right)^M \left(\frac{((P\Omega_{gk})^2/P_{es1}\Omega_z)^M}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es1}\Omega_z)^{2M}} \right) \right. \\ \left. \times \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \exp \left(-\gamma \left(\frac{1}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \right] \quad (3.188)$$

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = \left[1 - \left(\frac{P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t)} \right)^M \left(\frac{((P\Omega_{hk})^2/P_{es2}\Omega_t)^M}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es2}\Omega_t)^{2M}} \right) \right. \\ \left. \times \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \exp \left(-\gamma \left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}} \right) \right) \right] \quad (3.189)$$

İspat: EK-3, Bölüm C.2.

FEKS metoduna ilişkin toplam kapasite ifadesi (3.190) ile $\min(X_k, Y_k)$ ifadesine dönüştürülür.

$$TK_{\text{FEKS}} = \left[\frac{1}{2N} \log_2(1 + \gamma_{X_k}) + \frac{1}{2N} \log_2(1 + \gamma_{Y_k}) \right] \leq R \\ \approx \underbrace{\left[\frac{1}{\left(\frac{1}{\gamma_{X_k}} + \frac{1}{\gamma_{Y_k}} \right)} \right]}_{\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})} \leq \underbrace{\frac{2^{NR} - 1}{2}}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}} \quad (3.190)$$

İspat: EK-3, Bölüm C.3.

(3.190) ifadesinin CDF'i (3.191) ile hesaplanır.

$$F_{\text{FEKS}}(\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}) = 1 - \left[e^{-\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}} \left(\frac{2}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right)} \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^{-M} \right] \\ \times \left[\left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)^{-M} \right] \left[\left(\frac{1}{P_{es2}\Omega_t} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{es2}\Omega_t} \right)^{-M} \right] \quad (3.191)$$

İspat: EK-3, Bölüm C.5.

Sıralı istatistikler [80] yardımı ile maksimum kullanıcı çifti seçimine ilişkin CDF ifadesi (3.192) ile gösterilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{FEKS}}(\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}) &= \prod_{k=1}^N \left[1 - \left[e^{-\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}} \left(\frac{2}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right)} \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^{-M} \right] \right. \\
&\times \left. \left[\left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)^{-M} \right] \left[\left(\frac{1}{P_{es2}\Omega_t} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{es2}\Omega_t} \right)^{-M} \right] \right] \\
&\hspace{15em} (3.192)
\end{aligned}$$

3.3.3.2. Asimptotik Analiz

Aynı Anda İletim Modeli

Yüksek SGO yaklaşımıyla $\exp(x) \approx 1 + x$ ifadesi, (3.183) ifadesinde yerine yazılırsa AAİ modeli için asimptotik CDF ifadesi (3.193) elde edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{AAI}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) &= 1 - \left[\left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right] \\
&\times \left[\left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N} \right] \\
&\times \left[\left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^{-M} \right] \\
&\times \left[\left(\frac{1}{P_{es2}\Omega_t} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{P_{es2}\Omega_t} \right)^{-M} \right] \\
&\times \left[\left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)^{-M} \right] \\
&\times \left(1 - \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left(\frac{4}{P\Omega_{hk}} + \frac{4}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \\
&\hspace{15em} (3.193)
\end{aligned}$$

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

Yüksek SGO bölgesinde $\exp(x) \approx 1 + x$ ifadesi, (3.192) ifadesinde yerine yazılırsa FEKS metodu için asimptotik CDF ifadesi (3.194) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{FEKS}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}) &= \prod_{k=1}^N \left[1 - \left[\left(\frac{1}{P_{er\Omega_f}} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{er\Omega_f}} \right)^{-M} \right] \right. \\
&\times \left[\left(\frac{1}{P_{es1\Omega_z}} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{P_{es1\Omega_z}} \right)^{-M} \right] \left[\left(\frac{1}{P_{es2\Omega_t}} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{es2\Omega_t}} \right)^{-M} \right] \left. \right] \\
&\times \left(1 - \gamma_{\text{th}}^{\text{tk}} \left(\frac{2}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \tag{3.194}
\end{aligned}$$

3.3.3.3. Çeşitlilik Ölçütü Analizi

Aynı Anda İletim Modeli

AAİ modeli için asimptotik CDF ifadesi, (3.193), (3.67) uyarınca tekrardan ifade edilirse (3.195) elde edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{AAI}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) &= 1 - \underbrace{\left[\left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right]}_{\text{sabit terim}} \\
&\times \underbrace{\left[\left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N} \right]}_{\text{sabit terim}} \\
&\times \underbrace{\left[\left(\frac{1}{P_{er\Omega_f}} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{er\Omega_f}} \right)^{-M} \right]}_{\text{sabit terim}} \\
&\times \underbrace{\left[\left(\frac{1}{P_{es2\Omega_t}} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{P_{es2\Omega_t}} \right)^{-M} \right]}_{\text{sabit terim}} \\
&\times \underbrace{\left[\left(\frac{1}{P_{es1\Omega_z}} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{es1\Omega_z}} \right)^{-M} \right]}_{\text{sabit terim}} \left(\underbrace{1}_{p_0} - \underbrace{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left(\frac{4}{P\Omega_{hk}} + \frac{4}{P\Omega_{gk}} \right)}_{\text{YOT}} \right) \tag{3.195}
\end{aligned}$$

Burada, $G_d = 0$ ve $G_c = [\text{sabit terim}]$ değerine eşittir.

Fırsatçı Eş-Kaynak Seçim Metodu

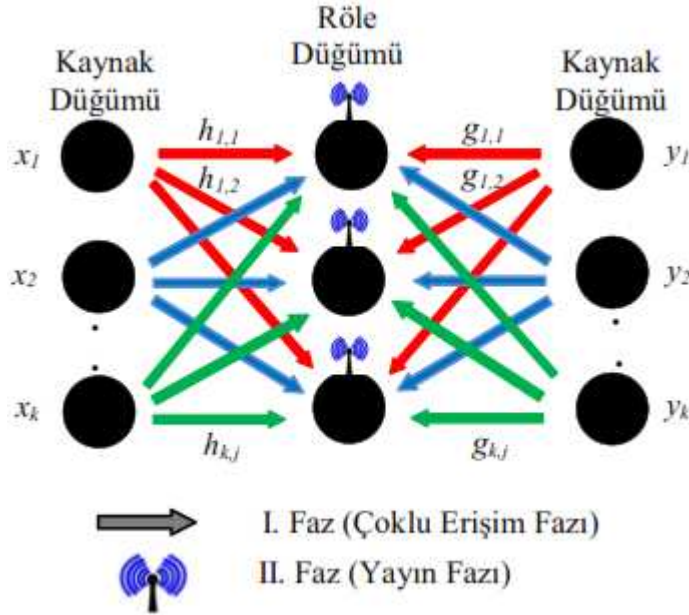
Benzer şekilde FEKS metodunun asimptotik CDF ifadesi , (3.194), (3.67) uyarınca (3.196) ile tekrardan ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 F_{\text{FEKS}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}) &= \prod_{k=1}^N \left[1 - \underbrace{\left[\left(\frac{1}{P_{er\Omega f}} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{er\Omega f}} \right)^{-M} \right]}_{\text{sabit terim}} \right] \\
 &\times \underbrace{\left[\left(\frac{1}{P_{es1\Omega z}} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{P_{es1\Omega z}} \right)^{-M} \right] \left[\left(\frac{1}{P_{es2\Omega t}} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{es2\Omega t}} \right)^{-M} \right]}_{\text{sabit terim}} \\
 &\times \left(\underbrace{\frac{1}{P^0}}_{\text{YOT}} - \gamma_{\text{th}}^{\text{tk}} \left(\frac{2}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \tag{3.196}
 \end{aligned}$$

Benzer şekilde, $G_d = 0$ ve $G_c = [\text{sabit terim}]$ değerine eşittir.

3.4. ÇOK KULLANICILI VE ÇOKLU İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ HABERLEŞME MODELİ

Sistem modeli içerisinde kullanılan iki yönlü röle sayısı kullanıcı çiftlerinin sayısına eşit veya fazla olarak arttırılması durumunda şekil 3.3'teki çok kullanıcılı ve çoklu röleli sistem modeli elde edilir. Şekil 3.3'te kullanıcı çiftlerinin veri alışverişi yapması için N/M adet iki yönlü röleden en iyi röleyi seçmesi durumunda her bir kullanıcı kendi eş kullanıcılarının verisinin yanı sıra diğer kullanıcı çiftlerinin de verisini alır. Bu durum her bir kullanıcıda hücre-içi etkileşim probleminin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu problemin önüne geçmek için fırsatçı ortak eş-kaynak ve röle seçim (FOEKRS) metodu önerilmiştir.



Şekil 3.3: Çok kullanıcılı ve çoklu iki yönlü kablosuz röleli ağ haberleşme modeli.

3.4.1. Aynı Anda İletim Modeli

Birinci faz sonrasında, j^{inci} rölede alınan sinyal, Z_{r_j} , (3.197) ile ifade edilir.

$$Z_{r_j} = \sum_{k=1}^N x_k h_{k,j} \sqrt{P_s} + \sum_{k=1}^N y_k g_{k,j} \sqrt{P_s} + n_{r_j} \quad (3.197)$$

x_k ve y_k eş kullanıcıların verilerini ifade etmektedir ve birim güce sahiptirler. Sırasıyla $\mathbb{E}[|x_k|^2] = 1$ ve $\mathbb{E}[|y_k|^2] = 1$ dir. $\mathbb{E}[\cdot]$ ortalama değeri ifade etmektedir. N , sistem içerisindeki toplam kullanıcı çifti sayısını ifade etmektedir. $h_{k,j}$ ve $g_{k,j}$, $k \in \{1, \dots, N\}$ ve $j \in \{1, \dots, M\}$ sırasıyla x hattı kullanıcıları ile röleler ve y hattı kullanıcıları ile röleler arasındaki kanalların durum bilgilerini ifade etmektedir. $h_{k,j}$ 'lar birbirinden bağımsız ortalaması sıfır ve $\sigma_{h_{k,j}}^2$ varyansa sahip karmaşık Gauss rastgele değişkenleridir. ($h_{k,j} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{h_{k,j}}^2)$). Benzer şekilde $g_{k,j}$ 'larda birbirinden bağımsız ve ($g_{k,j} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{g_{k,j}}^2)$)'dır. Bütün kanalların genliklerinin Rayleigh düz-sönümlmeli dağılımına sahip oldukları varsayılmıştır. P_s , birinci faz sırasında x_k ve y_k kullanıcıları tarafından kullanılan iletim gücünü ifade etmektedir. n_{r_j} ifadesi j^{inci} rölede oluşan ısı gürültüyü ifade etmektedir. Röle istasyonu birinci fazda kullanıcılardan aldığı verileri, (3.197), G katsayısı ile yükseltir. j^{inci} röledeki G katsayısı (3.198) ile ifade edilir.

$$G_j = \frac{\sqrt{P_r}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N P_s |h_{k,j}|^2 + \sum_{k=1}^N P_s |g_{k,j}|^2 + N_0}} \quad j \in \{1, \dots, M\} \quad (3.198)$$

P_r , rölenin iletim gücünü ifade etmektedir. M adet müsait rölenin içerisinde j^{inci} rölenin seçilip aktif olduğu durumda ikinci fazda x_k ve y_k kullanıcı çiftlerinde alınan sinyaller, Z_{X_k} ve Z_{Y_k} , sırasıyla (3.199) ve (3.200) ile gösterilir.

$$Z_{X_k} = G_j Z_{r_j} h_{k,j} + n_{x_k} \quad (3.199)$$

$$Z_{Y_k} = G_j Z_{r_j} g_{k,j} + n_{y_k} \quad (3.200)$$

Z_{r_j} ifadesi (3.199) ve (3.200)'de yerine yazılırsa Z_{X_k} ve Z_{Y_k} ifadeleri (3.201) ve (3.202) ile tekrar hesaplanır.

$$\begin{aligned} Z_{X_k} = & G_j x_k h_{k,j}^2 \sqrt{P_s} + G_j y_k g_{k,j} h_{k,j} \sqrt{P_s} + G_j \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i h_{i,j} h_{k,j} \sqrt{P_s} \\ & + G_j \sum_{i=1, i \neq k}^N y_i g_{i,j} h_{k,j} \sqrt{P_s} + G_j h_{k,j} n_{r_j} + n_{x_k} \end{aligned} \quad (3.201)$$

$$\begin{aligned}
Z_{Y_k} = & G_j y_k g_{k,j}^2 \sqrt{P_s} + G_j x_k g_{k,j} h_{k,j} \sqrt{P_s} + G_j \sum_{i=1, i \neq k}^N y_i g_{i,j} g_{k,j} \sqrt{P_s} \\
& + G_j \sum_{i=1, i \neq k}^N x_i h_{i,j} g_{k,j} \sqrt{P_s} + G_j g_{k,j} n_{r_j} + n_{y_k}
\end{aligned} \tag{3.202}$$

(3.201) ve (3.202)'den görüleceği üzere, sistem içerisinde bulunan M adet röleden en iyi rölenin seçilmesi, sistem karmaşıklığını ve sistem genel giderlerini azaltmasına rağmen diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hücre-içi etkileşim problemine herhangi bir etkisi olmamaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak için her bir kullanıcı çifti için uygun röle seçimi (FOEKRS) metodu önerilmiştir. (3.201) ve (3.202) ifadelerinin yardımıyla x_k ve y_k kullanıcılarındaki alınan SEGO ifadeleri (3.203) ve (3.204)'teki gibi hesaplanır.

$$\gamma_{X_k} = \frac{G_j^2 P_s |g_{k,j}|^2 |h_{k,j}|^2}{\left[G_j^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |h_{i,j}|^2 |h_{k,j}|^2 P_s + G_j^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |g_{i,j}|^2 |h_{k,j}|^2 P_s + G_j^2 |h_{k,j}|^2 N_0 + N_0 \right]} \tag{3.203}$$

$$\gamma_{Y_k} = \frac{G_j^2 P_s |g_{k,j}|^2 |h_{k,j}|^2}{\left[G_j^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |g_{i,j}|^2 |g_{k,j}|^2 P_s + G_j^2 \sum_{i=1, i \neq k}^N |g_{k,j}|^2 |h_{i,j}|^2 P_s + G_j^2 |g_{k,j}|^2 N_0 + N_0 \right]} \tag{3.204}$$

3.4.2. Fırsatçı Ortak Eş-Kaynak ve Röle Seçim Metodu

FOEKRS yöntemi, sistem içerisinde bulunan kullanıcı çiftlerinin röleler ile olan kanallarının belirlendiği ve maksimum toplam kapasiteye sahip olan kullanıcı çifti ve rölenin seçilmesine dayanmaktadır. Bu durumda sadece maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çifti seçilen röle aracılığı ile veri alışverişi yapabilmektedir. Sonuç olarak diğer kullanıcı çiftlerinin veri alışverişi sürecine dahil olmamaları hücre-içi etkileşim problemi ortadan kaldırmaktadır. Her bir kullanıcı çiftinin her bir röle ile olan toplam kapasite ifadesi (3.205) ile formülize edilir.

$$TK_{(\text{FOEKRS})} = \frac{1}{2N} [\log_2 (1 + \gamma_{X_k}) + \log_2 (1 + \gamma_{Y_k})] \tag{3.205}$$

Maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çifti ve röle seçimi (3.206) ile yapılır.

$$S = \arg \max [TK(FOEKRS)_1, \dots, TK(FOEKRS)_{N \times M}]$$

$$\forall k = \{1, \dots, N\} \text{ ve } \forall j = \{1, \dots, M\} \quad (3.206)$$

(3.205) ve (3.206) yardımıyla uygun kullanıcı ve röle seçimi işleminden sonra birinci faz sonrasında j^{inci} rölede alınan sinyal (3.207) ile ifade edilir.

$$Z_{S_{r_j}} = x_k h_{k,j} \sqrt{P_s} + y_k g_{k,j} \sqrt{P_s} + n_{r_j} \quad (3.207)$$

II. fazda, seçilen j^{inci} röle kullanıcı çiftinden gelen sinyali, (3.207), yükselterek kullanıcılarına yayınlar. Bu süreç sonunda x_k ve y_k kullanıcılarında alınan sinyaller sırasıyla (3.208) ve (3.209) ile ifade edilir.

$$Z_{X_k} = G_j x_k h_{k,j}^2 \sqrt{P_s} + G_j y_k g_{k,j} h_{k,j} \sqrt{P_s} + G_j h_{k,j} n_{r_j} + n_{x_k} \quad (3.208)$$

$$Z_{Y_k} = G_j y_k g_{k,j}^2 \sqrt{P_s} + G_j x_k g_{k,j} h_{k,j} \sqrt{P_s} + G_j g_{k,j} n_{r_j} + n_{y_k} \quad (3.209)$$

(3.208) ve (3.209) ifadelerinden görüleceği üzere, FOEKRS işleminden sonra sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftlerinin veri alışverişi işlemine dahil olmamasından dolayı hücre-içi etkileşim problemi ortadan kalkmaktadır. (3.208) ve (3.209) ifadelerinde sol baştan ilk ifadeler x_k ve y_k kullanıcılarının kendi gönderdiği verilerin yansımaları olduğundan dolayı toplam sinyal içerisinde çıkarılır. (3.208) ve (3.209) yardımıyla x_k ve y_k kullanıcılarındaki SGO ifadeleri sırasıyla (3.210) ve (3.211) ile ifade edilir.

$$\gamma_{X_k} = \frac{G_j^2 P_s |g_{k,j}|^2 |h_{k,j}|^2}{G_j^2 |h_{k,j}|^2 N_o + N_o} \quad (3.210)$$

$$\gamma_{Y_k} = \frac{G_j^2 P_s |g_{k,j}|^2 |h_{k,j}|^2}{G_j^2 |g_{k,j}|^2 N_o + N_o} \quad (3.211)$$

FOEKRS işleminden sonra G_j yükseltme katsayısı (3.212)'deki gibi tekrar hesaplanır.

$$G_j = \frac{\sqrt{P_r}}{\sqrt{P_s |h_{k,j}|^2 + P_s |g_{k,j}|^2 + N_o}} \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad k \in \{1, \dots, N\} \quad (3.212)$$

G_j ifadesi, (3.210) ve (3.211)'de yerine yazılırsa x_k ve y_k kullanıcılarındaki SGO ifadeleri (3.213) ve (3.214) ile ifade edilir.

$$\gamma_{X_k} = \frac{P_r P_s |g_{k,j}|^2 |h_{k,j}|^2}{P_r |h_{k,j}|^2 + P_s (|h_{k,j}|^2 + |g_{k,j}|^2) + 1} \quad (3.213)$$

$$\gamma_{Y_k} = \frac{P_r P_s |g_{k,j}|^2 |h_{k,j}|^2}{P_r |g_{k,j}|^2 + P_s (|h_{k,j}|^2 + |g_{k,j}|^2) + 1} \quad (3.214)$$

3.4.3. Performans Analizi

3.4.3.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı

Bu alt bölümde sistemin servis dışı kalma olasılığının ait performans analizine yer verilmiştir. FOEKRS metodunda, x_k ve y_k kullanıcı çiftlerinde alınan sondan sona SGO değerleri, (3.213) ve (3.214), $\frac{XY}{X+Y} \leq \min(X, Y)$ ile (3.215) ve (3.216) üst sınır yapılıır.

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{\text{ust}} = \min\left(\frac{P|g_{k,j}|^2}{2}, P|h_{k,j}|^2\right) = \min(X, Y) \quad (3.215)$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} = \min\left(\frac{P|h_{k,j}|^2}{2}, P|g_{k,j}|^2\right) = \min(U, V) \quad (3.216)$$

$\gamma_{X_k}^{\text{ust}}$ ve $\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}$ ifadelerinin CDF'leri sırasıyla (3.217) ve (3.218) ile hesaplanır.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma \left(\frac{1}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}}\right)\right) \quad (3.217)$$

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma \left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}}\right)\right) \quad (3.218)$$

İspat: Ek-4, Bölüm D.1.

Fırsatçı Ortak Eş-Kaynak ve Röle Seçim Metodu

TK ifadesi, (3.205), [78] yardımı ile (3.32)'de ifade edildiği gibi HO problemine dönüştürülür. HO ifadesinin CDF'i [79] yardımıyla (3.219) ile hesaplanır.

$$\begin{aligned}
F_{\text{FOEKRS}}(\gamma_{\text{th}}) &= 1 - \gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{gk}}}\right) \left(\frac{2}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{1}{P\Omega_{\text{gk}}}\right)} \\
&\quad \times \exp\left(\frac{-\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{3}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{3}{P\Omega_{\text{gk}}}\right)\right) \\
&\quad \times K_1\left(\gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{gk}}}\right) \left(\frac{2}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{1}{P\Omega_{\text{gk}}}\right)}\right) \quad (3.219)
\end{aligned}$$

Burada, $\Omega_{hk} = \mathbb{E}(|h_{k,j}|^2)$ ve $\Omega_{gk} = \mathbb{E}(|g_{k,j}|^2)$. Sıralı istatistikler [80] yardımı ile maksimum TK değerine sahip kullanıcı çifti ve röle seçimine ilişkin CDF ifadesi (3.220) ile ifade edilir. N kullanıcı çiftinin ve M rölelinin olduğu sistem modelinde, herbir kullanıcı çifti için geçerli mümkün olan toplam kanal yol sayısı $L = M \times N$ değerine eşittir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{FOEKRS}}(\gamma_{\text{th}}) &= \prod_{k=1}^L \left[1 - \gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{gk}}}\right) \left(\frac{2}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{1}{P\Omega_{\text{gk}}}\right)} \right. \\
&\quad \times \exp\left(\frac{-\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{3}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{3}{P\Omega_{\text{gk}}}\right)\right) \\
&\quad \left. \times K_1\left(\gamma_{\text{th}} \sqrt{\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{gk}}}\right) \left(\frac{2}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{1}{P\Omega_{\text{gk}}}\right)}\right) \right] \quad (3.220)
\end{aligned}$$

Maksimum- Minimum Metodu

Bu alt bölümde, MM tabanlı kullanıcı çifti ve röle seçimine ilişkin analitik ve asimptotik çıkarımlarda bulunulmuştur. MM metoduna ilişkin CDF ifadesi (3.221) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
F_{\text{MM}}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) &= \left(\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}}) \leq \underbrace{2^{2NR} - 1}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}} \right) \\
&= 1 - P_r(\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}}) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) \\
&= 1 - P_r\left(\min\left(\frac{P|g_{k,j}|^2}{2}, P|h_{k,j}|^2\right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}, \min\left(\frac{P|h_{k,j}|^2}{2}, P|g_{k,j}|^2\right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}\right) \\
&= 1 - P_r(\min(P|g_{k,j}|^2 \geq 2\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}, P|h_{k,j}|^2 \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}, P|h_{k,j}|^2 \geq 2\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}, P|g_{k,j}|^2 \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{MM}})) \\
&= 1 - \left[1 - F_{|g_{k,j}|^2}\left(\frac{2\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}}{P}\right) \right] \left[1 - F_{|h_{k,j}|^2}\left(\frac{2\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}}{P}\right) \right] \\
&= 1 - \exp\left(-\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{2}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}}\right)\right) \quad (3.221)
\end{aligned}$$

Sıralı istatistikler [80] yardımı ile maksimum kullanıcı çifti seçimi (3.222) ile ifade edilir.

$$F_{MM}(\gamma_{th}^{MM}) = \prod_{k=1}^L \left[1 - \exp \left(-\gamma_{th}^{MM} \left(\frac{2}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}} \right) \right) \right] \quad (3.222)$$

Tek Röleli FOEKRS Metodu

Sistem modeli tek bir röleye sahip olduğu zaman röle seçim işlemi olmayacağından dolayı kullanıcı çiftlerinin tek röle ile yaptıkları kanal çiftlerinden maksimum toplam kapasiteye sahip olan kullanıcı çiftinin seçilmesi işlemi ifade etmektedir. Bu seçim işlemi sırasında toplam kanal sayısı N değerine eşittir. Bu değer, N kullanıcılı M röleli sistem modelinde ise $L = M \times N$ değerine eşittir. Çok kullanıcılı tek röleli sistem modeline ilişkin CDF ifadesi bölüm 3.1.3.1 ve (3.34) ile gösterilmiştir.

3.4.3.2. Hata Olasılığı

Fırsatçı Ortak Eş-Kaynak ve Röle Seçim Metodu

Yüksek SGO yaklaşımı ile (3.220) ifadesinde Bessel fonksiyonu, $K_1 \approx \frac{1}{x}$ şeklinde yazılır [82]. TK ifadesinin CDF'i (3.223) ile ifade edilir.

$$F_{FOEKRS}^{\infty}(\gamma_{th}) = \prod_{k=1}^L \left[1 - \exp \left(\frac{-\gamma_{th}}{2} \left(\frac{3}{P\Omega_{hk}} + \frac{3}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \right] \quad (3.223)$$

Özdeş çarpım [81] ifadesi yardımı ile (3.223) ifadesi (3.224) şeklinde tekrar ifade edilir.

$$\prod_{k=1}^L (1 - x_k) = \sum_{k=0}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \dots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(-\frac{x}{2} \sum_{p=1}^k A_{np} \right) \right) \quad (3.224)$$

(3.224) ifadesi hata olasılığı formülünde, (3.37), yerine yazıldığında ve integral ifadesi [82, Eq. (3.361.2⁸)] eşitlik yardımıyla çözüldüğünde (3.225) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
\bar{P}h_{\text{FOEKRS}} &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \cdots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-x)}{\sqrt{x}} \left(\exp \left(-\frac{x}{2} \sum_{p=1}^k A_{n_p} \right) \right) dx \\
&= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \cdots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \int_0^{\infty} \frac{\exp \left(-\frac{x}{2} \left(\sum_{p=1}^k A_{n_p} + 2 \right) \right)}{\sqrt{x}} dx \\
&= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \cdots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \sqrt{\frac{\pi}{\left(\frac{1}{2} \sum_{p=1}^k \left(\left(\frac{3}{P\Omega_{g_p}} + \frac{3}{P\Omega_{h_p}} \right) + 2 \right) \right)}}
\end{aligned} \tag{3.225}$$

Maksimum- Minimum Metodu

MM tabanlı kullanıcı çifti ve FOEKRS ifadesinin CDF ifadesi, (3.222), özdeş çarpım [81] yardımıyla (3.226) ile ifade edilir.

$$\prod_{k=1}^L (1 - x_k) = \sum_{k=0}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \cdots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(-x \sum_{p=1}^k A_{n_p} \right) \right) \tag{3.226}$$

(3.226) ifadesi CDF tabanlı hata olasılığı formülünde, (3.37), yerine yazılırsa ve [82, Eq. (3.361.2⁸)] yardımıyla integral ifadesi çözümlürse (3.227) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
\bar{P}h_{\text{MM}} &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \cdots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-x)}{\sqrt{x}} \left(\exp \left(-x \sum_{p=1}^k A_{n_p} \right) \right) dx \\
&= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \cdots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \int_0^{\infty} \frac{\exp \left(-x \left(\sum_{p=1}^k A_{n_p} + 1 \right) \right)}{\sqrt{x}} dx \\
&= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \cdots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \sqrt{\frac{\pi}{\left(\sum_{p=1}^k \left(\frac{2}{P\Omega_{g_p}} + \frac{2}{P\Omega_{h_p}} \right) + 1 \right)}}
\end{aligned} \tag{3.227}$$

Tek Röleli FEKS Metodu

Tek röleli durumdaki hata olasılığı ifadesi bölüm 3.1.3.2, (3.41)'de verilmiştir.

3.4.3.3. Asimptotik Analiz

Servis Dışı Kalma Olasılığı

Fırsatçı Ortak Eş-Kaynak ve Röle Seçim Metodu

Yüksek SGO yaklaşımı ile (3.220) ifadesindeki üstel terim, $\exp(x) \approx 1 + x$ ve K_1 Bessel fonksiyonu, $K_1 \approx \frac{1}{x}$ şeklinde yazılır [82]. (3.220) ifadesi, yüksek SGO yaklaşımıyla (3.228) ile ifade edilir.

$$F_{\text{FOEKRS}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}) = \prod_{k=1}^L \left[\frac{\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{3}{P\Omega_{hk}} + \frac{3}{P\Omega_{gk}} \right) \right] \quad (3.228)$$

Maksimum-Minimum Metodu

Yüksek SGO yaklaşımı ile MM ifadesinin CDF'indeki, (3.222), üstel terim, $\exp(x) \approx 1 + x$ şeklinde yazıldığında asimptotik CDF ifadesi (3.229) ile ifade edilir.

$$F_{\text{MM}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) = \prod_{k=1}^L \left[-\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{2}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}} \right) \right] \quad (3.229)$$

Tek Röleli FOEKRS Metodu

Tek röleli sistem modelinde asimptotik CDF ifadesi bölüm 3.1.3.5'te (3.63) ile ifade edilmiştir.

Hata Olasılığı

Fırsatçı Ortak Eş-Kaynak ve Röle Seçim Metodu

Asimptotik CDF ifadesi, (3.228), hata olasılığı formülünde, (3.37), yerine yazıldığında asimptotik hata olasılığı ifadesi [82] yardımıyla (3.230) ile hesaplanır.

$$\begin{aligned}
\bar{P}h_{\text{FOEKRS}}^{\infty} &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \prod_{k=1}^L \frac{3}{2} \left[\left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_{hk}} \right) \right] \int_0^{\infty} x^{L-\frac{1}{2}} \exp(-x) dx \\
&= \frac{\Gamma(L + \frac{1}{2})}{2\sqrt{\pi}} \prod_{k=1}^L \left[\frac{3}{2} \left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_{hk}} \right) \right] \quad (3.230)
\end{aligned}$$

Maksimum-Minimum Metodu

Asimptotik MM CDF ifadesi, (3.229), CDF tabanlı hata olasılığı formülünde, (3.37), yerine yazıldığında integral ifadesi [82] yardımı ile çözüldüğünde (3.231) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
\bar{P}h_{\text{MM}}^{\infty} &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \prod_{k=1}^L \left[\left(\frac{2}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}} \right) \right] \int_0^{\infty} x^{L-\frac{1}{2}} \exp(-x) dx \\
&= \frac{\Gamma(L + \frac{1}{2})}{2\sqrt{\pi}} \prod_{k=1}^L \left[\left(\frac{2}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}} \right) \right] \quad (3.231)
\end{aligned}$$

Tek Röleli FEKS Metodu

Tek röleli sistem modelinde TK tabanlı kullanıcı çifti seçiminde asimptotik hata olasılığı ifadesi bölüm 3.1.3.5'te (3.65) ile ifade edilmiştir.

3.4.3.4. Kapasite Analizi

Fırsatçı Ortak Eş-Kaynak ve Röle Seçim Metodu

Bu alt bölümde, sondan-sona CDF ifadesi kullanılarak kapasite analizine yer verilmiştir. Yüksek SGO yaklaşımı ile Bessel fonksiyonu basitleştirildiği zaman, FOEKRS ifadesinin CDF'i (3.232) ile ifade edilir.

$$F_{\text{FOEKRS}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}) = \prod_{k=1}^L \left[1 - \exp \left(\frac{-\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{3}{P\Omega_{hk}} + \frac{3}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \right] \quad (3.232)$$

$k = 0$ durumu için, (3.232) ifadesinin özdeş çarpım gösterilimi (3.233) ile ifade edilir.

$$\prod_{k=1}^L (1 - x_k) = 1 + \sum_{k=1}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \dots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(-\frac{x}{2} \sum_{p=1}^k (x_{n_p}) \right) \right) \quad (3.233)$$

(3.233) ifadesi sondan-sona kapasite formülünde, (3.57), yerine yazıldığında ve integral ifadesi [82, Eq. (3.352.4)] eşitlik yardımıyla çözüldüğünde sondan-sona kapasite ifadesi (3.234) ile gösterilir.

$$\begin{aligned} \bar{C}_{\text{FOEKRS}}(\gamma) &= \frac{1}{\ln 2} \sum_{k=1}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \dots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(\frac{1}{2} \sum_{p=1}^k \left(\frac{3}{P\Omega_{h_{n_p}}} + \frac{3}{P\Omega_{g_{n_p}}} \right) \right) \right) \\ &\times E_i \left(-\frac{1}{2} \sum_{p=1}^k \left(\frac{3}{P\Omega_{h_{n_p}}} + \frac{3}{P\Omega_{g_{n_p}}} \right) \right) \end{aligned} \quad (3.234)$$

Maksimum- Minimum Metodu

MM ifadesinin CDF'i, (3.222), özdeş çarpım ifadesinde $k = 0$ durumunda tekrar yazılırsa CDF ifadesi (3.235) ile ifade edilir.

$$\prod_{k=1}^L (1 - x_k) = 1 + \sum_{k=1}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \dots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(-x \sum_{p=1}^k (A_{n_p}) \right) \right) \quad (3.235)$$

(3.235) ifadesi, sondan-sona kanal kapasitesi eşitliğinde, (3.57), yerine yazıldığında ve integral ifadesi [82, Eq. (3.352.4)] yardımıyla çözüldüğünde kapasite ifadesi (3.236) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} \bar{C}_{\text{MM}}(\gamma) &= \frac{1}{\ln 2} \sum_{k=1}^L \frac{(-1)^k}{k!} \underbrace{\sum_{n_1=1}^L \dots \sum_{n_k=1}^L}_{n_1 \neq n_2 \neq \dots \neq n_k} \left(\exp \left(\sum_{p=1}^k \left(\frac{2}{P\Omega_{h_{n_p}}} + \frac{2}{P\Omega_{g_{n_p}}} \right) \right) \right) \\ &\times E_i \left(-\sum_{p=1}^k \left(\frac{2}{P\Omega_{h_{n_p}}} + \frac{2}{P\Omega_{g_{n_p}}} \right) \right) \end{aligned} \quad (3.236)$$

Tek Röleli FEKS Metodu

Tek röleli sistem modelinde FEKS metodu uygulandığında kullanıcı çifti seçiminde sondan-sona kanal kapasitesi ifadesi bölüm 3.1.3.4'te (3.59) ile ifade edilmiştir.

3.4.3.5. Başarılabilir Kapasite

Başarılabilir kapasite, (3.51) ile ifade edilir. $F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}$, (3.217), ve $F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}$, (3.218), ifadeleri (3.53)'te yerine yazıldığında ve integral ifadesi [82, Eq. (3.352.4)] yardımıyla çözüldüğünde $\mathbb{E}(R_{X_k})$ ve $\mathbb{E}(R_{Y_k})$ ifadeleri sırasıyla (3.237) ve (3.238) ile gösterilir.

$$\mathbb{E}(R_{X_k}) = \frac{1}{2N \ln_2} \left(\exp \left(\frac{1}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right) E_i \left(\left(\frac{1}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \right) \quad (3.237)$$

$$\mathbb{E}(R_{Y_k}) = \frac{1}{2N \ln_2} \left(\exp \left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}} \right) E_i \left(\left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}} \right) \right) \right) \quad (3.238)$$

(3.237) ve (3.238) ifadeleri (3.51)'de yerine yazıldığında başarılabilir kapasite ifadesi (3.239) ile ifade edilir.

$$R = \frac{1}{2N} \left[\log_2 e \left(\exp \left(\frac{1}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right) E_i \left(\left(\frac{1}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \right) + \log_2 e \left(\exp \left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}} \right) E_i \left(\left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}} \right) \right) \right) \right] \quad (3.239)$$

3.4.3.6. Çeşitlilik Ölçütü Analizi

Fırsatçı Ortak Eş-Kaynak ve Röle Seçim Metodu

FOEKRS metoduna ilişkin asimptotik CDF ifadesi, (3.228), (3.67) uyarınca (3.240) şeklinde yazılır.

$$\begin{aligned} F_{\text{FOEKRS}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}) &= \prod_{k=1}^L \left[\frac{\gamma_{\text{th}}}{2} \left(\frac{3}{P\Omega_{hk}} + \frac{3}{P\Omega_{gk}} \right) \right] = \prod_{k=1}^L \left[\gamma_{\text{th}} \frac{1}{P} \frac{1}{2} \underbrace{\left(\frac{3}{\Omega_{hk}} + \frac{3}{\Omega_{gk}} \right)}_{A_k} \right] \\ &= \left[\prod_{k=1}^L \gamma_{\text{th}} A_k \right]^{-\frac{1}{L}} = (G_c P)^{-G_d} \end{aligned} \quad (3.240)$$

Burada, $G_d = L$ ve $G_c = \left[\prod_{k=1}^L \gamma_{th} A_k \right]^{-\frac{1}{L}}$ ile gösterilir.

Maksimum- Minimum Metodu

Benzer şekilde, MM tabanlı kullanıcı çifti ve röle seçimi ifadesinin asimptotik CDF'i, (3.229), (3.67) uyarınca (3.241) ile tekrardan ifade edilir.

$$\begin{aligned} F_{MM}^{\infty}(\gamma_{th}^{MM}) &= \prod_{k=1}^L \left[\gamma_{th}^{MM} \left(\frac{2}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right) \right] = \prod_{k=1}^L \left[\gamma_{th}^{MM} \frac{1}{P} \underbrace{\left(\frac{2}{\Omega_{hk}} + \frac{2}{\Omega_{gk}} \right)}_{B_k} \right] \\ &= (G_c P)^{-G_d} \end{aligned} \quad (3.241)$$

$$G_d = L \text{ ve } G_c = \prod_{k=1}^L [\gamma_{th}^{MM} B_k]^{-\frac{1}{L}}, \text{dir.}$$

Tek Röleli FEKS Metodu

Tek röleli sistem modelinde TK tabanlı kullanıcı çifti seçimine ilişkin çeşitlilik ölçütü analizi bölüm 3.1.3.6'da (3.69) ile ifade edilmiştir.

3.4.3.7. Optimizasyon

FOEKRS Metodunda Röle İstasyonun Pozisyonu

x kullanıcısı ve röle arasındaki uzaklık d , y kullanıcısı ile röle arasındaki mesafe $1-d$ ile gösterilmiştir. $\Omega_{gk} = \frac{1}{d^v}$ ve $\Omega_{hk} = \frac{1}{(1-d)^v}$ ile gösterilir. Bu ifadeler FOEKRS metoduna ait asimptotik CDF ifadesinde, (3.228), yerine yazıldığında (3.242) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned} F_{FOEKRS}^{\infty}(\gamma_{th}) &= \prod_{k=1}^L \left[\frac{\gamma_{th}}{2} \left(\frac{3}{\frac{P}{(1-d)^v}} + \frac{3}{\frac{P}{d^v}} \right) \right] = \prod_{k=1}^L \left[\frac{\gamma_{th}}{2} \left(\frac{3(1-d)^v}{P} + \frac{3(d)^v}{P} \right) \right] \\ &= \prod_{k=1}^L \left[\frac{\gamma_{th}}{2} \left(\frac{3(1-d)^v}{P} + \frac{3(d)^v}{P} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.242)$$

$$a = \left[\frac{\gamma_{th}}{2} \frac{3}{P} \right] \text{ ve } b = \left[\frac{\gamma_{th}}{2} \frac{3}{P} \right] \text{dir.}$$

a ve b birbirine eşit değerlerde olduğundan (3.242) ifadesi (3.243) ile gösterilir.

$$F_{\text{FOEKRS}}^{\infty} = [a(1-d)^v + a(d)^v]^L \quad (3.243)$$

(3.243) ifadesinin d'ye göre türevi alındığında ve ifade sıfıra eşitlendiğinde (3.243) ifadesi (3.244) ile gösterilir.

$$\begin{aligned} F_{\text{FOEKRS}}^{\infty} &= \frac{\partial}{\partial d} [a(1-d)^v + a(d)^v]^L = [va(1-d)^{v-1} + va(d)^{v-1}]^L = 0 \\ &= va(1-d)^{v-1} = va(d)^{v-1} \implies (1-d)^{v-1} = (d)^{v-1} \implies d = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (3.244)$$

Maksimum- Minimum Metodu

x kullanıcısı ile röle arasındaki mesafe "d", y kullanıcısı ile röle arasındaki mesafe de "1-d" ile ifade edilirse. Diğer taraftan, $\Omega_{gk} = \frac{1}{d^v}$ ve $\Omega_{hk} = \frac{1}{(1-d)^v}$ ile ifade edilir. MM tabanlı kullanıcı çifti seçimine ait asimptotik CDF ifadesi, (3.229), (3.245) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} F_{\text{MM}}^{\infty}(\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}}) &= \prod_{k=1}^L \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{2}{\frac{P}{(1-d)^v}} + \frac{2}{\frac{P}{(d)^v}} \right) \right] = \prod_{k=1}^L \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{2(1-d)^v}{P} + \frac{2(d)^v}{P} \right) \right] \\ &= \prod_{k=1}^L \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \left(\frac{2(1-d)^v}{P} + \frac{2(d)^v}{P} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.245)$$

Burada, $a = \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \frac{2}{P} \right]$ ve $b = \left[\gamma_{\text{th}}^{\text{MM}} \frac{2}{P} \right]$ 'dir. a ve b ifadeleri birbirine eşit olduğu için (3.245) ifadesi (3.246) ile gösterilir.

$$F_{\text{MM}}^{\infty} = [a(1-d)^v + a(d)^v]^L \quad (3.246)$$

(3.246) ifadesinin d'ye göre türevi alındığında ve sıfıra eşitlendiğinde (3.247) elde edilir.

$$\begin{aligned} F_{\text{MM}}^{\infty} &= \frac{\partial}{\partial d} [a(1-d)^v + a(d)^v]^L = [va(1-d)^{v-1} + va(d)^{v-1}]^L = 0 \\ &= va(1-d)^{v-1} = va(d)^{v-1} \implies (1-d)^{v-1} = (d)^{v-1} \implies d = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (3.247)$$

Tek Röleli FEKS Metodu

Tek röleli sistem modelinde FEKS metoduna ilişkin röle istasyonun pozisyonu bölüm 3.1.3.7'de (3.75) ile ifade edilmiştir.

4. BULGULAR

Çok kullanıcılı YG tabanlı iki yönlü kablosuz röleli ağlarda, sistem içerisindeki kullanıcıların aynı anda tek bir röle üzerinden veri alışverişi yapması durumunda (AAİ modeli) oluşan hücre-içi etkileşim probleminin çözümüne yönelik FEKS metodu önerilmektedir.

Bölüm 4.1’de AAİ modeli ile FEKS metoduna ilişkin performans analizine yer verilmiştir. FEKS metodu aynı zamanda MM metodu ile de karşılaştırılmış ve üstün yönleri ortaya koyulmuştur. Monte-Carlo benzetim sonuçları analitik ve asimptotik sonuçlar ile doğrulanmıştır.

Bölüm 4.2’de kanal durum bilgisinin mükemmel olmamasının AAİ modeli ve FEKS metodları üzerine olabilecek etkileri incelenmiştir. Diğer taraftan, FEKS metodu ile MM metodu karşılaştırılıp FEKS metodunun üstün yönleri ortaya koyulmuştur. Performans analizi Monte-Carlo benzetimi ile yapılmış ve analitik ve asimptotik olarak da doğrulanmıştır.

Bölüm 4.3’te dış kaynaklı istasyonlardan kaynaklı eş-kanal etkileşimlerin AAİ modeline ve FEKS metodu üzerine olan etkileri belirlenmiştir. Monte-Carlo benzetim sonuçları analitik ve asimptotik sonuçlar ile doğrulanmıştır.

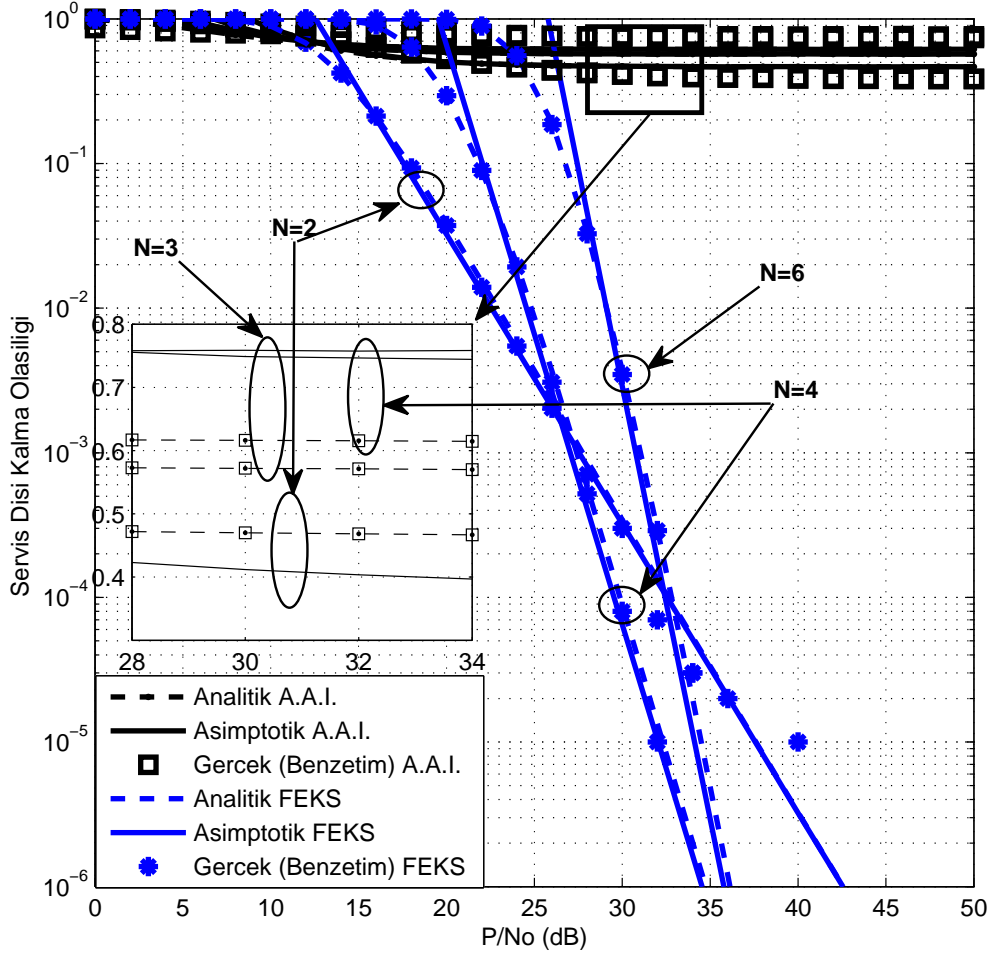
Bölüm 4.4’te sistem içerisindeki iki yönlü röle sayısı M ’e çıkarılmıştır. Bu durumda oluşan hücre-içi etkileşim problemi için önerilen FOEKRS metodu, MM metodu ile karşılaştırılmıştır. Monte-Carlo benzetim sonuçları analitik ve asimptotik sonuçlar ile doğrulanmıştır.

4.1. ÇOK KULLANICILI İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ HABERLEŞME MODELİNDE PERFORMANS ANALİZİ

Bu alt bölümde çeşitli performans analiz metodları kullanılarak AAİ modeli, FEKS ve MM metodlarının analizine yer verilmektedir.

4.1.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı

Servis dışı kalma olasılığı performans analizinde hedef iletim değerinin , R, 1.00 bps/Hz. olduğu duruma ilişkin performans analizine şekil 4.1’de yer verilmiştir.



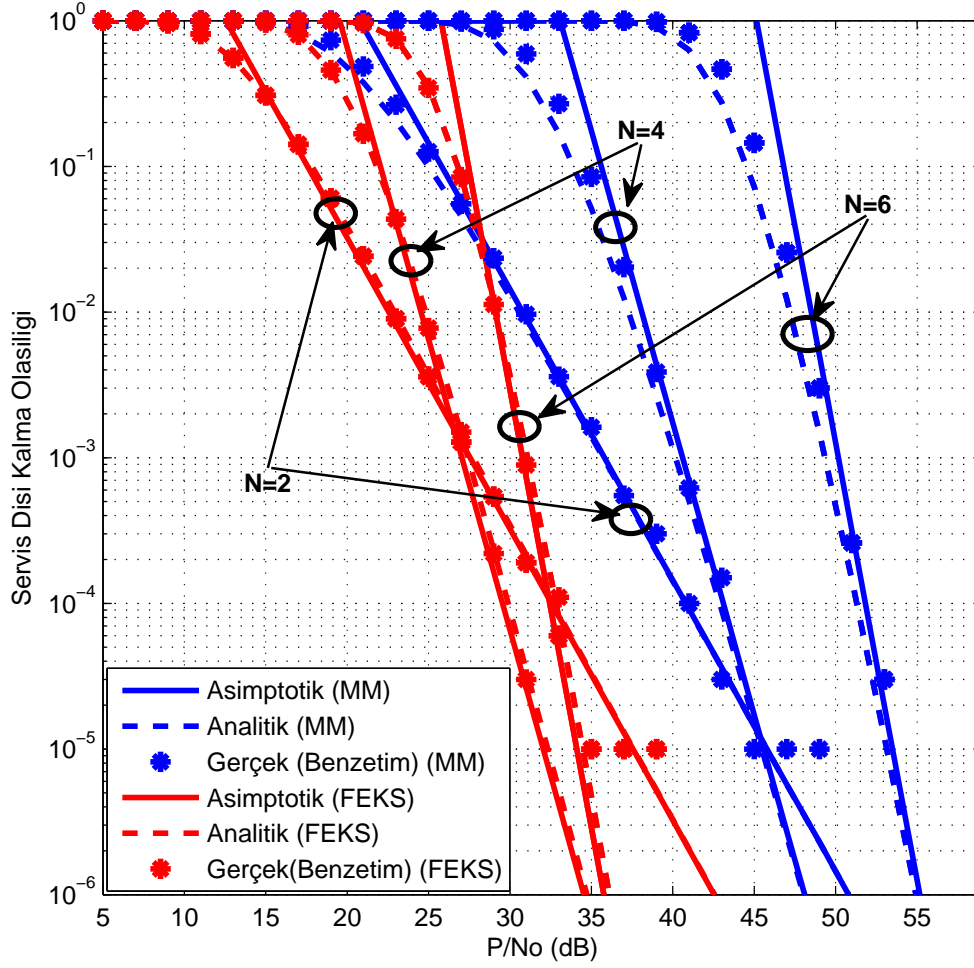
Şekil 4.1: AAİ modeli ve FEKS metodunun servis dışı kalma olasılığı karşılaştırması.

Şekil 4.1’de FEKS metodu uygulandığında, düşük SGO bölgesinde kullanıcı sayısının az olduğu durum çok olduğu duruma göre daha iyi performans sergilemektedir. Bu duruma, (3.12)’de bulunan logaritma ön ekindeki N ifadesi sebep olmaktadır. N ifadesi yüksek SGO bölgesinde avantaja dönüşerek kullanıcı çifti sayısının fazla olduğu durum az olduğu duruma göre daha iyi sonuç vermektedir. Diğer taraftan, her bir zaman aralığında maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çifti seçimi yüksek SGO bölgesinde performans eğrilerinin eğiminde değişikliğe sebep olarak çeşitlilik ölçütü oluşturmaktadır.

Çeşitlilik ölçütünün değeri N 'e eşittir. Bu durum aynı zamanda kodlama kazancını da etkilemektedir. FEKS metodunda, çeşitlilik ölçütü ve kodlama kazancı arasındaki ilişki (3.69) ile ifade edilmiştir. Kullanıcı çifti sayısının 2 olduğu durumda, $N = 2$, 10^{-6} servis dışı kalma olasılığı değerine ulaşmak için 43 dB gerekirken, $N = 4$ ve $N = 6$ olduğu durumlarda ise sırasıyla 34 dB ve 36 dB gerekmektedir. Bu sonuçlar analitik olarak (3.34) ve asimptotik olarak da (3.63) ile tutarlılık göstermektedir.

AAİ modelinde, sistem içerisindeki kullanıcı çifti sayısının artması aynı zamanda her bir kullanıcı çiftinde oluşan hücre-içi etkileşim sayısını arttırdığından dolayı performans eğrilerinin yüksek servis dışı kalma olasılığı bölgesinde, 10^0 ve 10^{-1} , doyuma ulaşmasına sebep olmaktadır. Bu durum, aynı zamanda çeşitlilik ölçütü değerinin de 0 olmasına sebep olmaktadır. Çeşitlilik ölçütü ile ilgili bu sonuçlar, analitik olarak (3.68) ile tutarlılık göstermektedir. Çoklu erişim tekniğinde, sistem içerisindeki bütün kullanıcı çiftlerinin aynı anda veri alışverişi yapması, sisteme etkileyen güç miktarını arttırmaktadır. Bu durumda servis dışı kalma olasılığı değerinin düşük seviyelerde, 10^{-6} , oluşması beklenir. Fakat bu durum iki yönlü röle modelinde farklılık göstermektedir. Kullanıcı çifti sayısının artması her bir kullanıcıda sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşan hücre-içi etkileşim probleminin de artmasına sebep olmaktadır. Bu sonuçlar, analitik olarak (3.27) , asimptotik olarak ise (3.62) eşitliği ile tutarlılık göstermektedir.

Şekil 4.2'de FEKS metodu ile MM metodunun servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırmasına yer verilmiştir. $N = 2$ olduğu durumda, FEKS metodu ile kullanıcı çifti seçimi işleminde 10^{-6} servis dışı kalma olasılığı seviyesine ulaşmak için gerekli SGO değeri 43 dB'dir. Benzer servis dışı kalma olasılığı seviyesine MM tabanlı kullanıcı çifti seçim işleminde gerekli SGO değeri 51 dB'dir. $N = 4$ durumunda, 10^{-6} servis dışı kalma olasılığı seviyesine FEKS metodu ile 35 dB değerinde ulaşılmaktadır. MM tabanlı durumda ise aynı seviyeye 48 dB'de ulaşılmaktadır. $N = 6$ 'da FEKS metodu için gerekli SGO değeri 36 dB iken bu değer MM tabanlı durumda 55 dB seviyelerinde gerçekleşmektedir. Performans eğrilerinde gözlemlenen bu farklılıklar FEKS metodunun MM metoduna olan üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, FEKS ve MM metodları için sırasıyla analitik olarak, (3.34) ve (3.36), asimptotik olarak ise (3.63) ve (3.64) ile doğrulanmıştır.

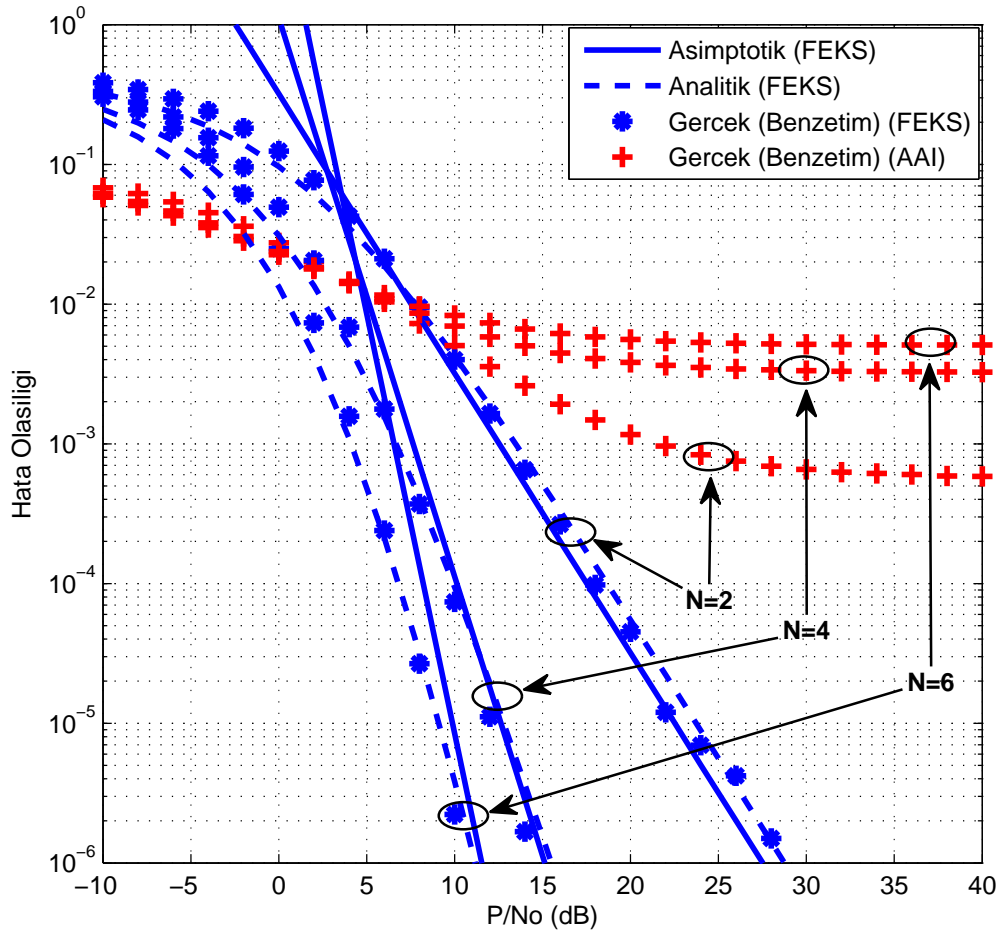


Şekil 4.2: FEKS ile MM metodlarının servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırması.

4.1.2. Hata Olasılığı

Şekil 4.3'te AAİ modeli ile FEKS metoduna ilişkin hata olasılığı performans analizine yer verilmiştir. AAİ modelinde, düşük SGO bölgesinde farklı sayıdaki kullanıcı çiftlerine ait performans eğrileri birbirleri ile aynı davranışı göstermektedir. Yüksek SGO bölgesinde ise performans eğrileri 10^{-3} hata olasılığı seviyelerinde doyuma uğramaktadır. Bu durum güvenilir bir haberleşme imkanı sağlamamaktadır. $N = 2$ olduğu durum, $N = 4$ ve $N = 6$ olduğu durumlara göre az da olsa daha iyi sonuç vermektedir. Fakat yüksek SGO bölgesinde performans eğrisinin doyuma ulaşmasından dolayı güvenilir bir haberleşme ortamı sağlamamaktadır. Bu duruma, kullanıcı çifti sayısının artması ile birlikte her bir kullanıcı çiftinde oluşan hücre-içi etkileşim probleminin de artmasına sebep olmaktadır.

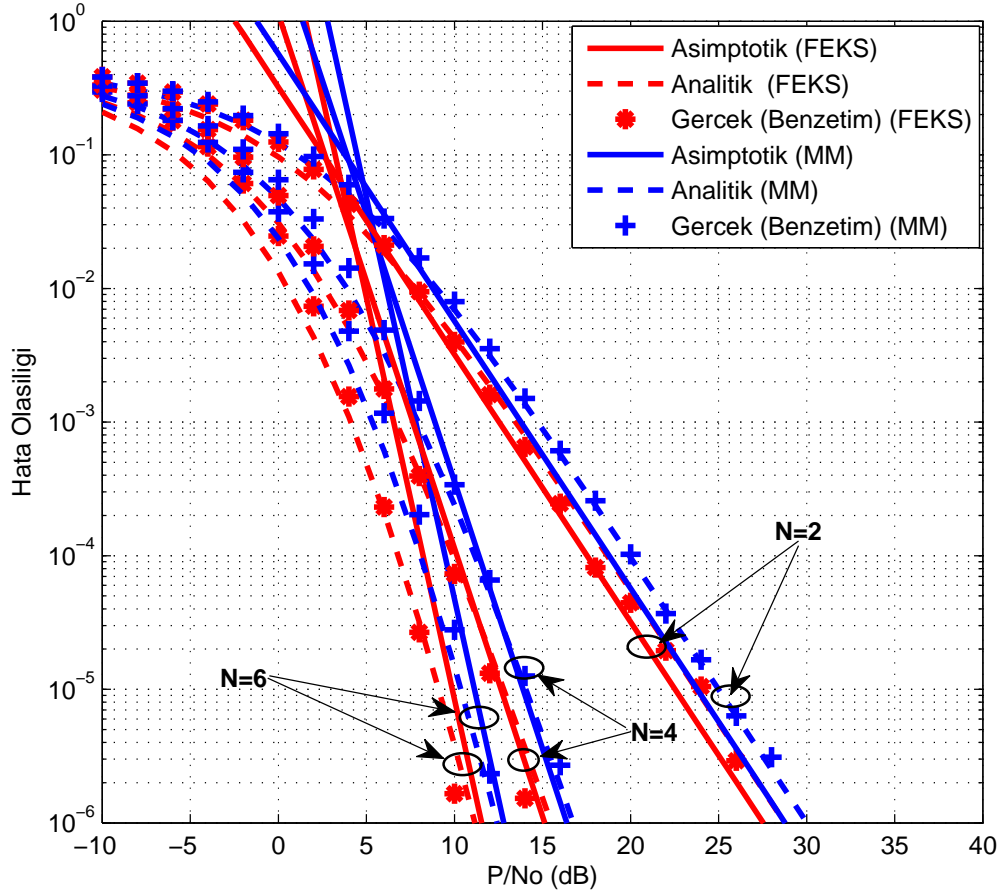
Bu sürecin sonucu olarak da sistem doyuma uğramaktadır.



Şekil 4.3: AAİ modeli ve FEKS metodu hata olasılığı performans karşılaştırması.

FEKS metodu uygulandığında, AAİ modelinden farklı olarak kullanıcı çiftleri hücre-içi etkileşim problemi yaşamadığından dolayı güvenilir haberleşme ortamı için gerekli olan 10^{-6} hata olasılığı seviyesine ulaşmaktadır. Örnek olarak $N = 2$ olduğu durumda, 10^{-6} hata olasılığı seviyesine ulaşmak için gerekli SGO değeri 27 dB olarak gözlemlenmektedir. $N = 4$ ve $N = 6$ olduğu durumlarda ise gerekli olan SGO değerleri sırasıyla 15 dB ve 12 dB olarak gözlemlenmektedir. Elde edilen sonuçlar, analitik olarak (3.41) ile asimptotik olarak ise (3.65) ile tutarlılık göstermektedir. Kullanıcı çifti sayısındaki farklılık ile değişen güç gereksinimleri her bir zaman aralığında N kullanıcı içinden maksimum kullanıcı çiftinin seçilmesinden kaynaklanmaktadır. Kullanıcı sayısındaki artış avantaja dönüşerek güvenilir haberleşme için gerekli olan SGO değerini de düşürmektedir.

Şekil 4.4'te FEKS metodu ile MM metoduna ilişkin hata olasılığı performans

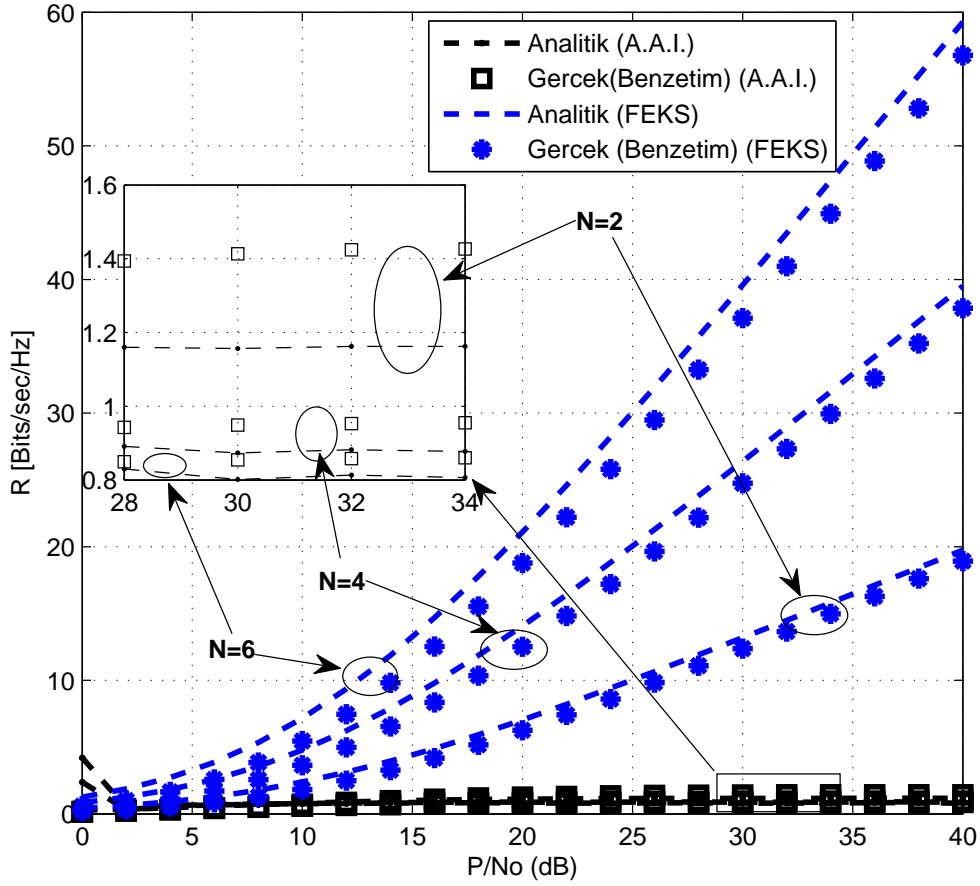


Şekil 4.4: FEKS metodu ile MM metodunun hata olasılıkları karşılaştırması.

karşılaştırmasına yer verilmektedir. $N = 2$ olduğu durumda, FEKS metodu uygulandığında 10^{-6} hata olasılığı seviyesine ulaşmak için gerekli olan SGO değeri 27 dB iken bu değer MM metodu uygulandığı zaman 30 dB değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Benzer şekilde $N = 4$ olduğu durumda, FEKS metodu uygulandığında gerekli SGO değeri 15 dB iken MM metodu için bu değer 16 dB olarak gözlemlenmektedir. $N = 6$ olduğu durumda ise FEKS metodu uygulandığında 12 dB, MM metodu uygulandığında 13 dB değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, FEKS ve MM metodları için analitik olarak (3.41) ve (3.43) ile asimptotik olarak ise (3.65) ve (3.66) ile tutarlılık göstermektedir.

4.1.3. Başarılabilir Kapasite

Şekil 4.5'te AAİ modeli ve FEKS metodu uygulandığında başarılabilir oran değerinin SGO boyunca değişimine ilişkin performans karşılaştırmasına yer verilmiştir.



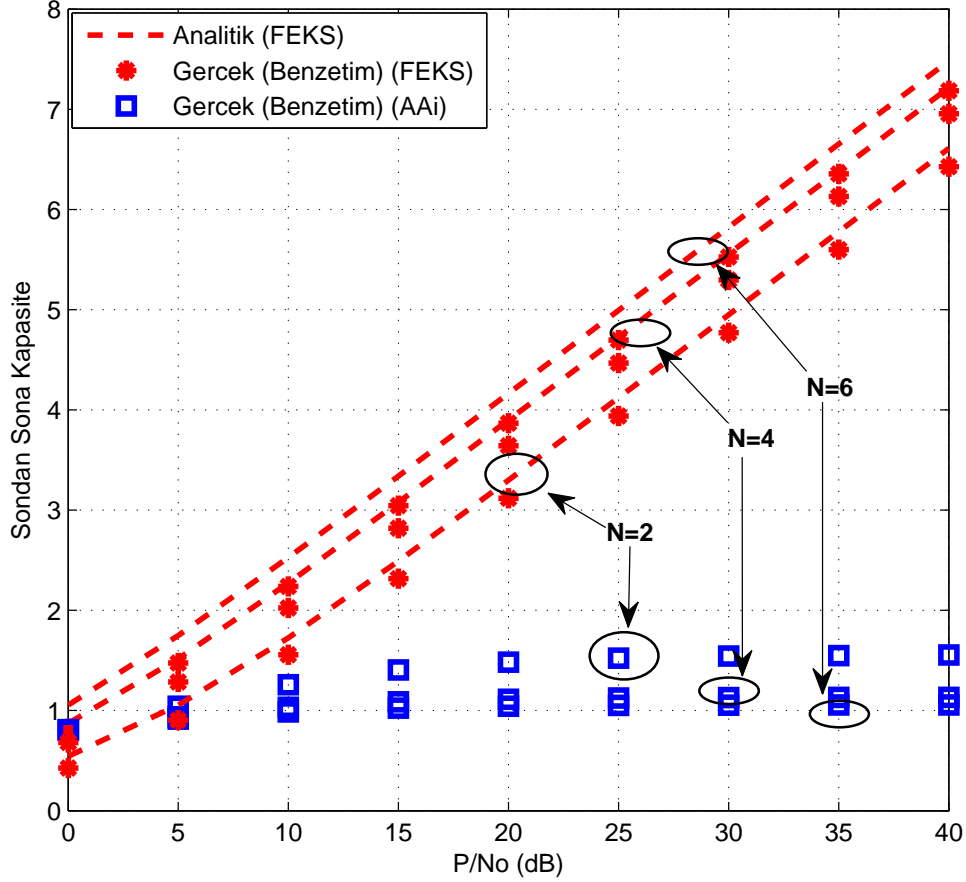
Şekil 4.5: AAİ modeli ve FEKS metodu başarılabilir oran değeri karşılaştırması.

AAİ modelinde SGO boyunca çok düşük seviyelerde başarılabilir oran değerleri gözlemlenmektedir. Bu duruma kullanıcı sayısının artması ile her bir kullanıcı çiftinde oluşan hücre-içi etkileşimi sebep olmaktadır. AAİ modeli için elde edilen sonuçlar, (3.49) ve (3.50) ile tutarlılık göstermektedir.

FEKS metodu uygulandığında ise AAİ modelinden farklı olarak kullanıcı çifti sayısının artması ile başarılabilir oran değerinde de artış gözlemlenmektedir. Bu durum, FEKS metodunun AAİ modeline olan üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Gözlemlenen bu sonuçlar (3.56) ile tutarlılık göstermektedir.

4.1.4. Kapasite Analizi

Şekil 4.6’da AAİ modeli ve FEKS metoduna ilişkin sondan-sona kanal kapasitesi performans analizine yer verilmiştir. Performans analizinde 2, 4 ve 6 adet kullanıcı çifti kullanılmıştır.

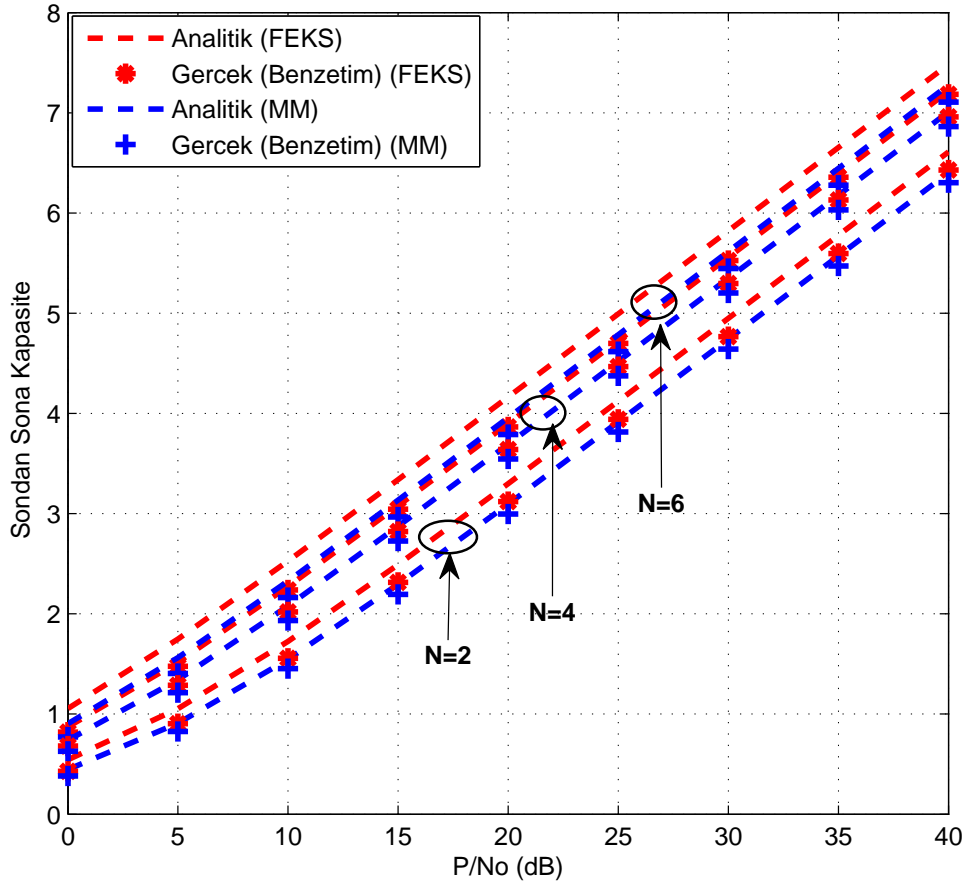


Şekil 4.6: AAİ modeli ve FEKS metodunun sondan-sona kanal kapasitesi performans karşılaştırması.

AAİ modeli uygulandığında sondan-sona kanal kapasitesi değeri çok düşük bir çalışma bölgesinde, 1 – 2 bps/Hz., gerçekleşmektedir. Bu duruma, sistem modelindeki kullanıcı çiftilerinin aynı anda veri alışverişi yapmasıyla oluşan hücre-içi etkileşim problemi sebep olmaktadır. Sistem modeli içindeki kullanıcı çifti sayısının artması ile birlikte her bir kullanıcıdaki SEGO değeri daha düşük bir değer almaktadır. Bu durum kanal kapasitesini olumsuz yönde etkilemekte ve performans eğrilerinin SGO boyunca doyuma uğramasına sebep olmaktadır.

FEKS metodu uygulandığında kullanıcı çiftlerinde oluşan hücre-içi etkileşim problemi ortadan kalkmaktadır. AAİ modelinden farklı olarak kanal kapasitesi hesaplamasında SEGO yerine SGO değeri dikkate alınmaktadır. Sistem modeli içerisindeki kullanıcı çifti sayısının artması kanal kapasitesi üzerine olumlu yönde etki etmektedir. Gözlemlenen bu sonuçlar analitik olarak (3.59) ile tutarlılık göstermektedir.

Şekil 4.7’de FEKS metodu ile MM metodunun sondan-sona kanal kapasitesi karşılaştırmasına yer verilmiştir. Karşılaştırma neticesinde, FEKS metodunun MM metoduna göre daha iyi performans sergilediği gözlemlenmektedir. Elde edilen bu sonuçlar analitik olarak (3.59) ve (3.61) ile tutarlılık göstermektedir.



Şekil 4.7: FEKS ve MM metodlarının sondan-sona kanal kapasitesi karşılaştırması.

4.2. KANAL DURUM BİLGİSİNİN MÜKEMMEL OLMADIĞI DURUMDA ÇOK KULLANICILI İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ MODELİNDE PERFORMANS ANALİZİ

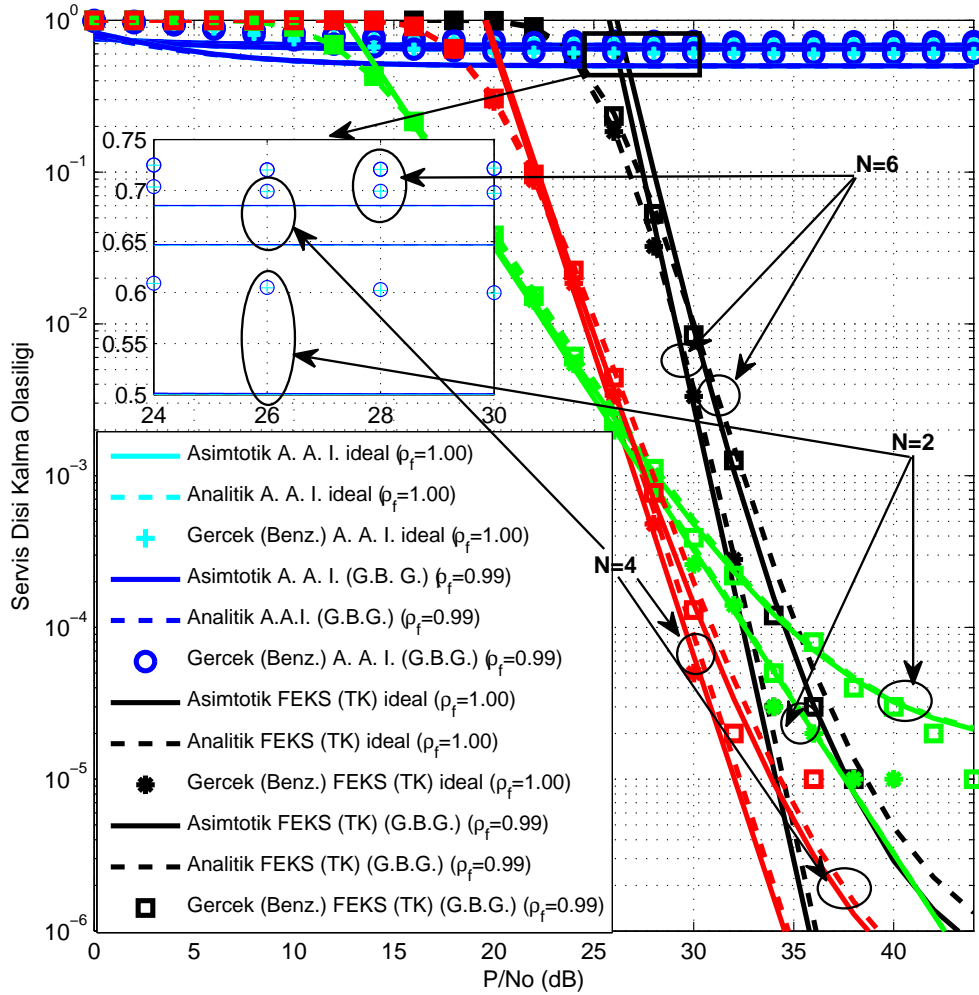
4.2.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı

4.2.1.1. Geri Bildirim Gecikmesi

Şekil 4.8’de kanal durum bilgisinin geri bildirim gecikmesinden dolayı mükemmel olmadığı durumda AAİ modeli ve FEKS metodunun servis dışı kalma olasılığı performans ölçütü kullanılarak analizine yer verilmektedir. İnceleme sırasında kullanıcı çifti sayısı, $N = 2, 4, 6$ olarak seçilmiştir. AAİ modeli uygulandığında, kanal durum bilgisi ideal olduğu durumda, her bir kullanıcı çifti diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşan hücre-içi etkileşim problemlerinden dolayı yüksek servis dışı kalma olasılığı bölgesinde doyuma uğramaktadır. Kanal durum bilgisinin geri bildirim gecikmesinden dolayı mükemmel olmadığı durumda, her bir kullanıcıda alınan sinyalde hata bileşenleri oluşmaktadır. Bu durum performans eğrilerinin yüksek servis dışı kalma olasılığı bölgesinde doyuma uğramasına sebebiyet vermektedir. Elde edilen bu sonuçlar analitik olarak (3.118), asimptotik olarak (3.136) ifadeleri ile tutarlılık göstermektedir. Kanal durum bilgisinin geri bildirim gecikmesinden dolayı ideal olmadığı durumda performans eğrilerinin eğiminde gözlemlenen değişikliğe ilişkin çeşitlilik ölçütü analizi de (3.142) ile tutarlılık göstermektedir.

FEKS metodu uygulandığında, düşük SGO bölgesinde, kanal durum bilgisinin ideal olduğu durumda kullanıcı çifti sayısının az olduğu durum çok olduğu duruma göre daha iyi performans sergilemektedir. Bu durum kanal durum bilgisinin GBG’den dolayı mükemmel olmaması durumunda da geçerliliğini sürdürmektedir. Yüksek SGO bölgesinde, kanal durum bilgisinin mükemmel olduğu durumda kullanıcı sayısının çok olması avantaja dönüşerek çeşitlilik ölçütü oluşturmaktadır. GBG’den dolayı kanal durum bilgisinin mükemmel olmaması çeşitlilik ölçütü değerinin N ’den 0 seviyesine düşmesine sebep olmaktadır. Çeşitlilik ölçütü üzerindeki bu olumsuz etki aynı zamanda kodlama kazancını da olumsuz yönde etkilemektedir. Elde edilen bu sonuçlar analitik olarak (3.124) ve asimptotik olarak da (3.138) ile tutarlılık göstermektedir.

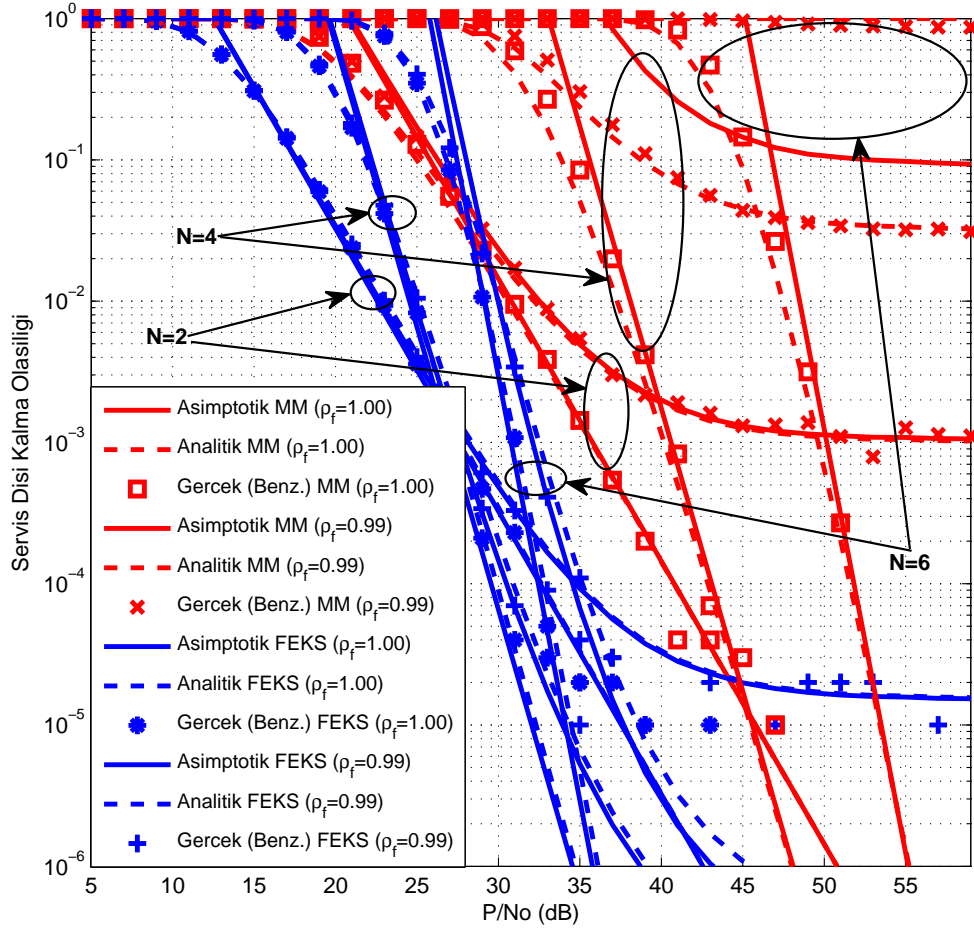
Şekil 4.9’da FEKS metodu ile MM metodunun GBG’li ortamda servis dışı kalma olasılığı



Şekil 4.8: AAI modeli ve FEKS metodunun GBG durumunda servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırması.

performans karşılaştırmasına yer verilmektedir.

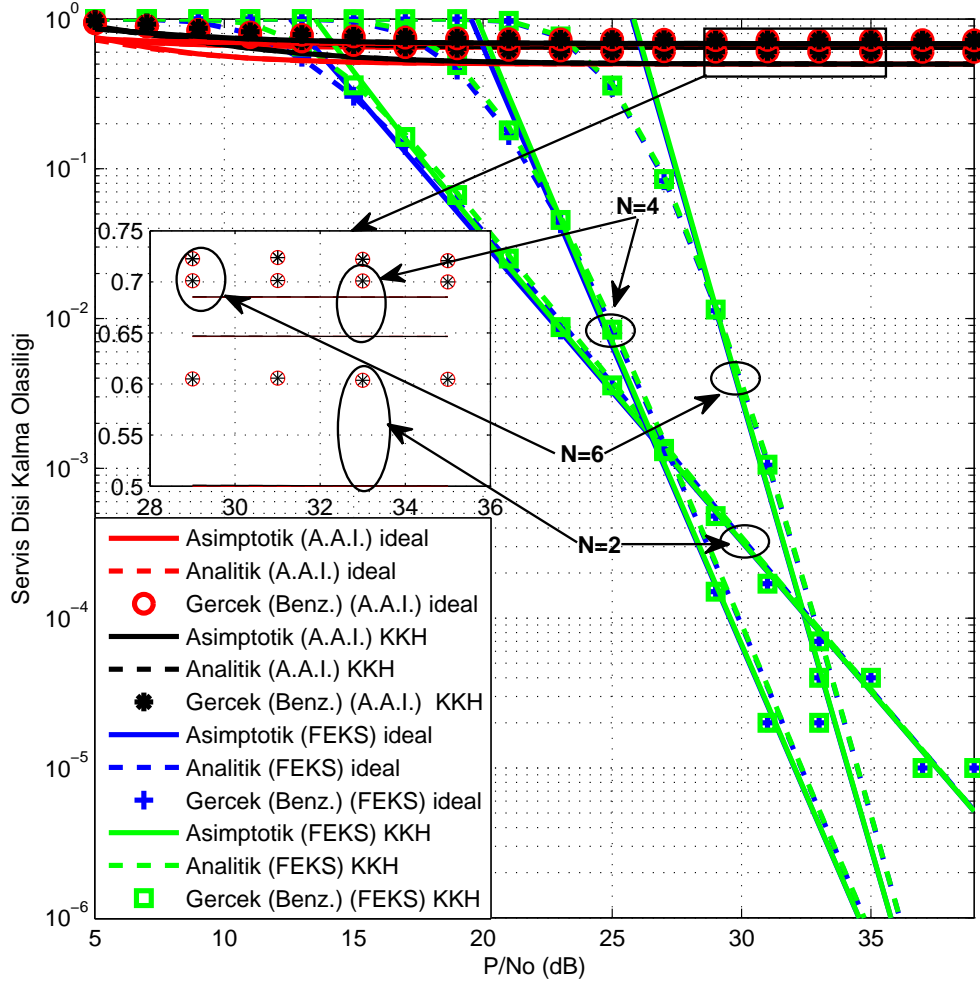
Şekil 4.9'dan görülebileceği üzere, kanal durum bilgisinin ideal olduğu durumda FEKS metodu MM metodundan daha iyi performans sağlamaktadır. Bu durum kanal durum bilgisinin GBG'den dolayı mükemmel olmadığı durumda da geçerliliğini sürdürmektedir. Kanal durum bilgisinin GBG'den dolayı mükemmel olmadığı durumda, yüksek SGO bölgesinde her iki metotta da çeşitlilik ölçütü değeri N seviyesinden 0 seviyesine dönüşmektedir. Bu durum her iki metotta da kodlama kazancında kayıpların oluşmasına sebep olmaktadır. Gözlemlenen bu sonuçlar FEKS ve MM metodları için analitik olarak (3.124) ve (3.134) asimptotik olarak ise (3.138) ve (3.140) ifadeleri ile tutarlılık göstermektedir.



Şekil 4.9: Geri bildirim gecikmeli ortamda FEKS metodu ile MM metodunun karşılaştırması.

4.2.1.2. Kanal Kestirim Hatası

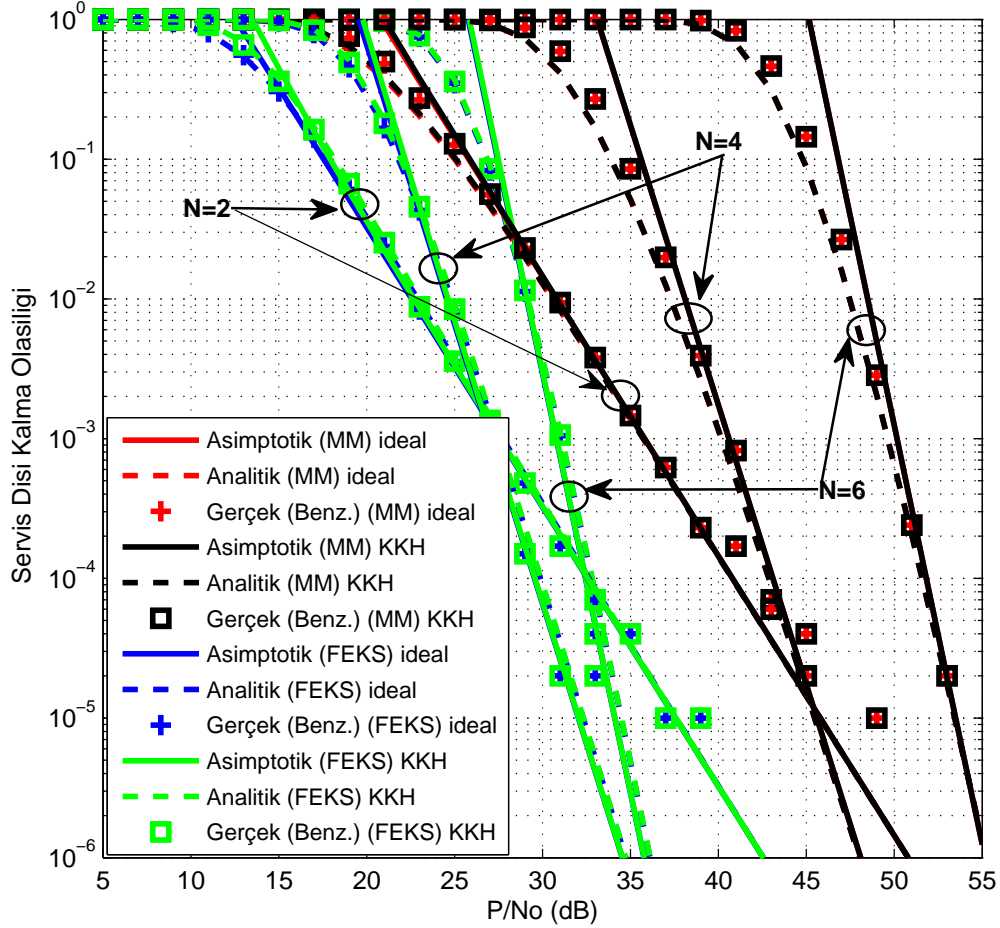
Şekil 4.10'da kanal durum bilgisinin KKH'dan dolayı mükemmel olmamasının AAİ modeli ve FEKS metodu'nun performansları üzerine olabilecek etkileri incelenmektedir. İnceleme sırasında performans ölçütü olarak servis dışı kalma olasılığı kullanılmıştır. Şekil 4.10'dan görüleceği üzere, AAİ modeli ve FEKS metodu için kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hata, düşük SGO bölgesinde kodlama kazancında kayıpların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu duruma pilot iletim sinyalinin gücü ile kestirimden kaynaklı oluşan hatanın gücünün birbiri ile ters orantılı olması sebep olmaktadır. Bir başka ifade ile düşük SGO bölgesinde pilot iletim sinyalinin iletim gücü düşüktür. Dolayısıyla kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatanın gücü yüksektir. Yüksek SGO bölgesinde ise pilot ile-



Şekil 4.10: AAİ modeli ve FEKS metodunun KKH durumunda servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırması.

tim sinyalinin gücü yüksek, buna karşın oluşan hatanın gücü ise düşüktür. Yüksek SGO bölgesinde KKH'nın kodlama kazancı üzerine etkileri ihmal edilecek düzeydedir. Diğer taraftan, KKH'nın yüksek SGO bölgesinde oluşan çeşitlilik ölçütü değerine herhangi bir etkisi olmadığı gözlemlenmektedir. Elde edilen bu sonuçlar AAİ modeli için analitik olarak (3.115), asimptotik olarak (3.135) ve çeşitlilik ölçütü analizinde (3.141) ile tutarlılık göstermektedir. FEKS metodu için ise analitik olarak (3.130) ve asimptotik olarak (3.137) ifadeleri ile tutarlılık göstermektedir.

Şekil 4.11'de FEKS metodu ile MM metodunun KKH'lı ortamda servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırmasına yer verilmiştir.



Şekil 4.11: KKH ortamında FEKS metodu ile MM metodu karşılaştırması.

Kanal durum bilgisinin KKH'den dolayı ideal olmadığı durumda, FEKS metodu MM metoduna göre servis dışı kalma olasılığı performansı yönünden daha iyi başarımleri sergilemektedir. Kullanıcı çifti sayısının, $N = 2, 4, 6$ olduğu durumda 10^{-6} servis dışı kalma olasılığı değeri için FEKS metodunda gerekli SGO çalışma bölgesi 35-45 dB aralığındadır. Bu durum MM metodunda ise 45-55 dB aralığında gerçekleşmektedir. KKH, FEKS metodu uygulandığında düşük SGO bölgesinde kodlama kazancında kayıpların oluşmasına sebep olmaktadır. Kodlama kazancında oluşan bu kayıplara pilot iletim sinyalinin varyansının kanal kestirimden kaynaklı oluşan hatanın varyansı ile ters orantılı olması sebep olmaktadır. Diğer taraftan, MM metodunun çalışma bölgesi yüksek SGO bölgesinde gerçekleştiği için MM metodu uygulandığı zaman KKH durumunda kodlama kazancı üzerine olabilecek etkileri ihmal edilecek düzeydedir. KKH'nın, FEKS ve MM metodlarının çeşitlilik ölçütü değerine herhangi bir etkisi olmamaktadır. Gözlemlenen bu sonuç-

lar, FEKS ve MM metodları için sırasıyla analitik olarak (3.130) ve (3.132), asimptotik olarak (3.137) ve (3.139) ile tutarlılık göstermektedir.

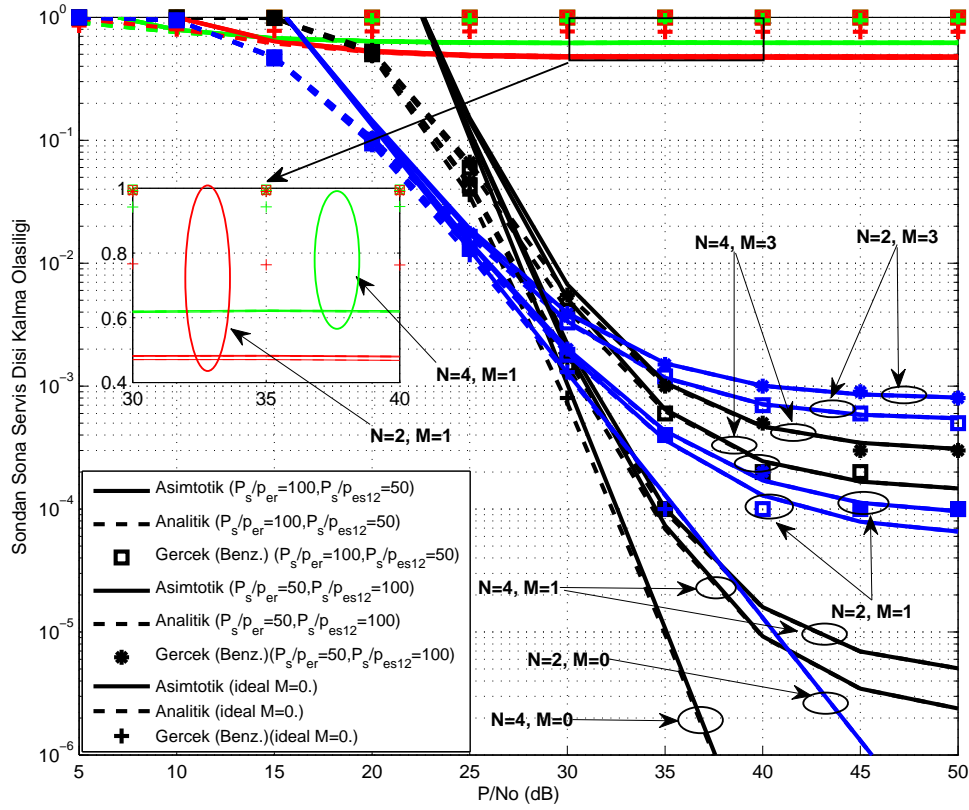
4.3. DIŞ KAYNAKLI EŞ-KANAL ETKİLEŞİMLERİN ÇOK KULLANICILI İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ MODELİ ÜZERİNE ETKİLERİ

4.3.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı

Şekil 4.12’de AAİ modeli ile FEKS metodlarının sonlu sayıda dış kaynaklı etkileşime maruz kalması sonucunda sistem performansı üzerine olabilecek etkileri belirlenmeye çalışılmaktadır. Performans ölçütü olarak servis dışı kalma olasılığı kullanılmıştır. Dış kaynaklı etkileşimlerin etkilerini detaylı bir şekilde inceleyebilmek için kullanıcı çiftlerine, x ve y , ve röle istasyonuna etkileyen dış kaynaklı etkileşimlerin farklı güç değerlerine sahip olduğu varsayılmıştır. İlk durumda, röle istasyonuna etki eden dış kaynaklı eş-kanal etkileşimin iletim gücünün kullanıcı çiftlerine etki eden dış kaynaklı eş-kanal etkileşimlerin gücüne göre daha yüksek olduğu varsayılmıştır. Bu durum matematiksel olarak ($P_s/P_{er} = 50, P_s/P_{es12} = 100$) ile ifade edilir. İkinci durum ise kullanıcı çiftlerine etkileyen dış kaynaklı eş-kanal etkileşimler röleye etkileyenlere oranla daha yüksektir. Bu durum da matematiksel olarak ($P_s/P_{er} = 100, P_s/P_{es12} = 50$) ile ifade edilir.

AAİ modelinde, her bir kullanıcı çifti sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hücre-içi etkileşim probleminden dolayı SGO boyunca çok yüksek servis dışı kalma olasılığı bölgesinde, (1 ve 10^{-1}), doyuma uğramaktadır. Dış kaynaklı eş-kanal etkileşimlerin iletim gücü hücre-içi etkileşimlerine göre daha düşük seviyelerde olduğu için sistem performansı üzerine olabilecek etkileri ihmal edilecek düzeydedir. Elde edilen bu sonuçlar analitik olarak (3.183) asimptotik olarak da (3.193) ile tutarlılık göstermektedir. Diğer taraftan çeşitlilik ölçütü değerinin 0 değerinde olması matematiksel olarak (3.195) ile ifade edilmiştir.

Diğer taraftan, sistem modeline FEKS metodu uygulandığında hücre-içi etkileşim problemine etkin bir çözüm bulunmuş olur. Bu durumun yanı sıra her bir zaman aralığında maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çifti seçim işlemi çeşitlilik ölçütünü oluşturmaktadır. Dış kaynaklı eş-kanal etkileşimlerin olduğu ortamda FEKS metodu uygulandığında ideal durumda oluşan çeşitlilik ölçütü N seviyesinden 0 seviyesine dönüşmektedir. Bu



Şekil 4.12: N kullanıcı ve M dış kaynaklı eş-kanal etkileşimin olduğu durumda AAİ modeli ve FEKS metodunun servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırması.

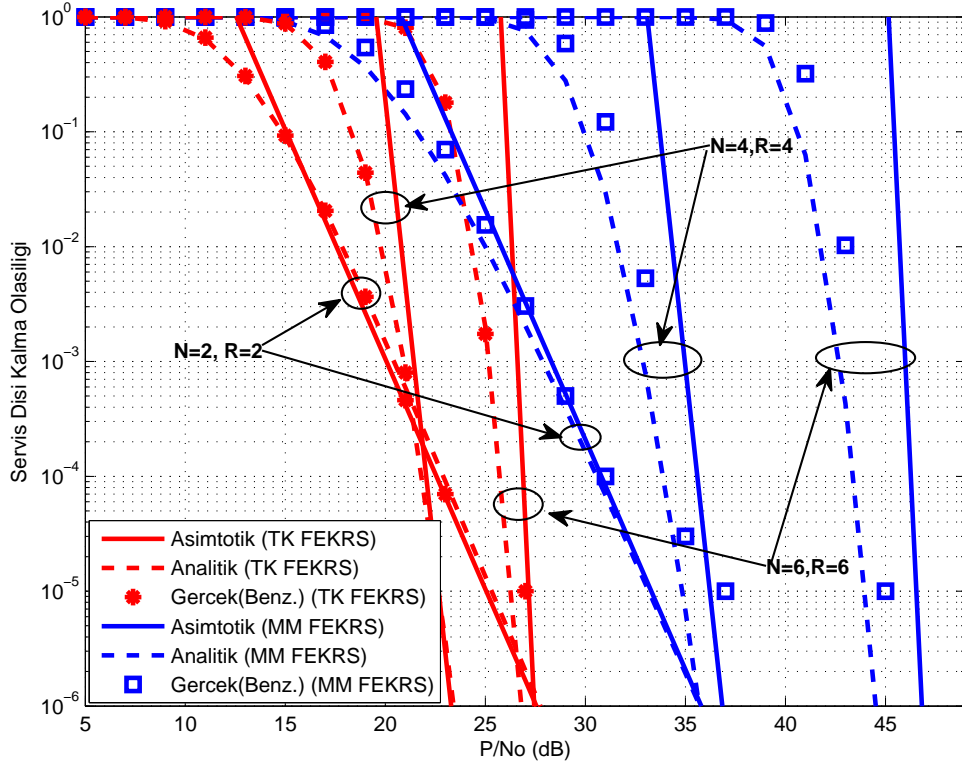
durum aynı zamanda sistem kodlama kazancında da kayıpların oluşmasına sebep olmaktadır. Diğer taraftan, ($P_s/P_{er} = 100, P_s/P_{es12} = 50$) durumu ($P_s/P_{er} = 50, P_s/P_{es12} = 100$) durumuna göre daha iyi sonuç vermektedir. Elde edilen bu sonuçlar analitik olarak (3.192) asimptotik olarak da (3.194) ile tutarlılık göstermektedir. Çeşitlilik ölçütü değerinin N'den 0 seviyesine dönüşmesi matematiksel olarak (3.196) ile ifade edilmektedir.

4.4. ÇOK KULLANICILI VE ÇOKLU İKİ YÖNLÜ KABLOSUZ RÖLELİ AĞ HABERLEŞME MODELİNDE PERFORMANS ANALİZİ

4.4.1. Servis Dışı Kalma Olasılığı

Şekil 4.13'te FOEKRS metoduna ilişkin servis dışı kalma olasılığı performans analizine yer verilmektedir. Performans analizinde hedef iletim değerinin ,R, 1.00 bps/Hz. ve kul-

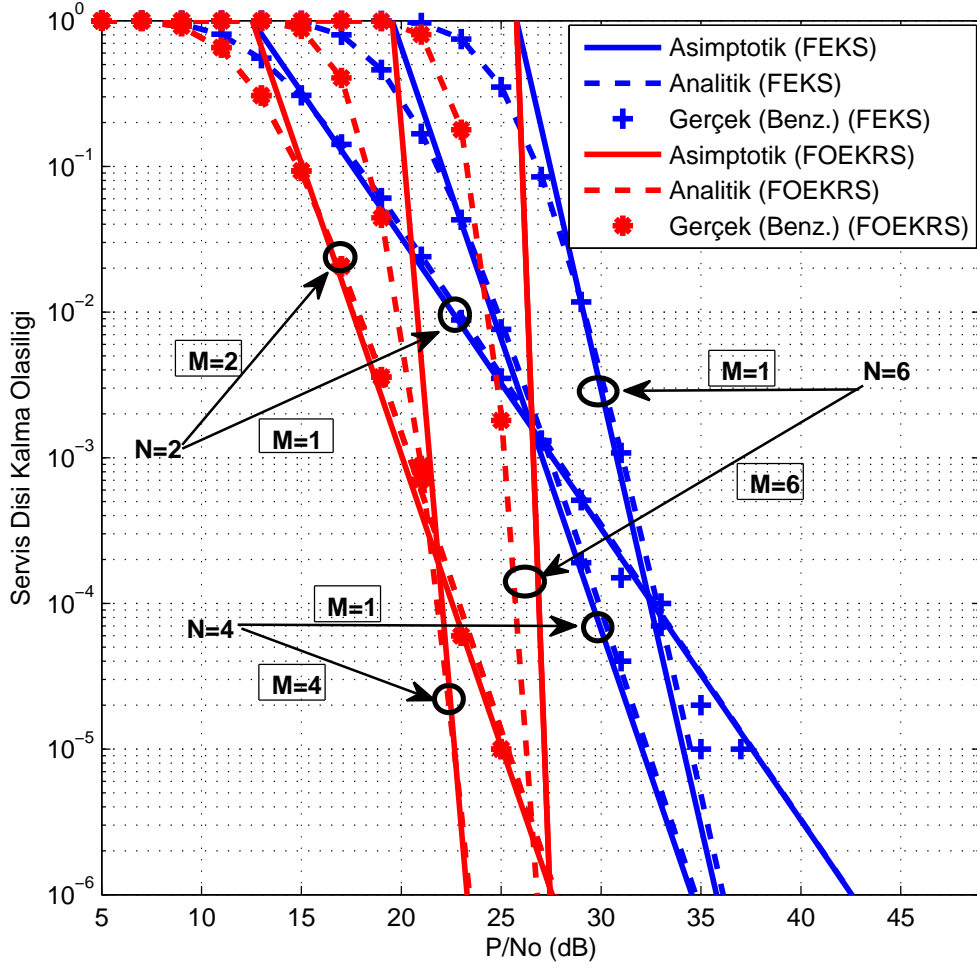
lanıcı çifti sayısının 2, 4 ve 6 olduğu durumlara ilişkin verilere yer verilmektedir.



Şekil 4.13: FOEKRS ve MM metodlarının servis dışı kalma olasılığı performans karşılaştırması.

Şekil 4.13'ten açıkça görüleceği üzere FOEKRS metodu MM metodundan daha iyi başarımlar sergilemektedir. 10^{-6} servis dışı kalma olasılığı seviyesine ulaşmak için FOEKRS metodu için gerekli olan SGO çalışma bölgesi 20-30 dB aralığındadır. Bu değer MM metodu için 35-45 dB aralığında gerçekleşmektedir. Her iki metotta da, düşük SGO bölgesinde kullanıcı sayısının az olduğu durum çok olduğu duruma göre daha iyi performans sergilemektedir. Bu duruma, (3.205) ifadesinde paydada bulunan N ifadesi sebep olmaktadır. Bu durum yüksek SGO bölgesinde avantaja dönüşerek çeşitlilik ölçütünün oluşmasına sebep olmaktadır. Her iki metotta da çeşitlilik ölçütünün değeri $L = M \times N$ 'ye eşittir. Çeşitlilik ölçütüne ilişkin elde edilen sonuçlar FOEKRS ve MM için sırasıyla (3.240) ve (3.241) ile tutarlılık göstermektedir. Servis dışı kalma olasılığına ilişkin elde edilen sonuçlar FOEKRS ve MM metodları için sırasıyla analitik olarak (3.220) ve (3.222), asimptotik olarak ise (3.228) ve (3.229) ile tutarlılık göstermektedir.

Şekil 4.14'te M röleli sistem modeli ile tek röleli sistem modelinin servis dışı kalma ola-



Şekil 4.14: M röleli FOEKRS metodu ile tek röleli FEKS metodlarının servis dışı kalma olasılığı karşılaştırması.

sılığın performans analizine yer verilmektedir. M röleli sistem modeli tek röleli sistem modeline göre daha düşük SGO değerinde daha düşük servis dışı kalma olasılığı değerleri sağlamaktadır. Bu duruma sebep olarak, M röleli sistem modelinde kullanıcı çiftlerinin röleler ile yaptığı toplam kanal yol sayısı $L = M \times N$ iken bu sayı tek röleli sistem modelinde N değerine eşittir. Bir başka ifade ile M röleli sistem modelinde işbirlikçi çeşitlilik (cooperative diversity) ve çok kullanıcı çeşitliliği (multiuser diversity) oluşmaktadır. Çeşitlilik ölçüt değeri ise bu değerlerin çarpımına eşittir. Tek röleli sistem modelinde ise sadece çok kullanıcı çeşitliliği oluşmaktadır. Elde edilen sonuçlar, M röleli FOEKRS metodu için analitik olarak (3.220), asimptotik olarak (3.228) ile tutarlılık göstermektedir. Tek röleli FEKS metodunda ise analitik olarak (3.34), asimptotik olarak (3.63) ile tutar-

lılık göstermektedir. Diğer taraftan çeşitlilik ölçütü analizinde M röleli FOEKRS metodu (3.240) ile tek röleli FEKS metodunda ise (3.69) ile tutarlılık göstermektedir.

Düşük SGO bölgesinde her iki modelde de kullanıcı çifti sayısının az olduğu durum çok olduğu duruma göre daha iyi sonuç vermektedir. Yüksek SGO bölgesinde ise bu durum değişerek kullanıcı sayısının fazla olması az olduğu duruma göre daha iyi sonuç vermektedir. M röleli sistem modelinin 10^{-6} servis dışı kalma olasılığı seviyesine ulaşması için gereken SGO değerleri 20-30 dB aralığında iken bu değer tek röleli sistem modelinde 35-45 dB aralığında gerçekleşmektedir.

4.4.2. Hata Olasılığı

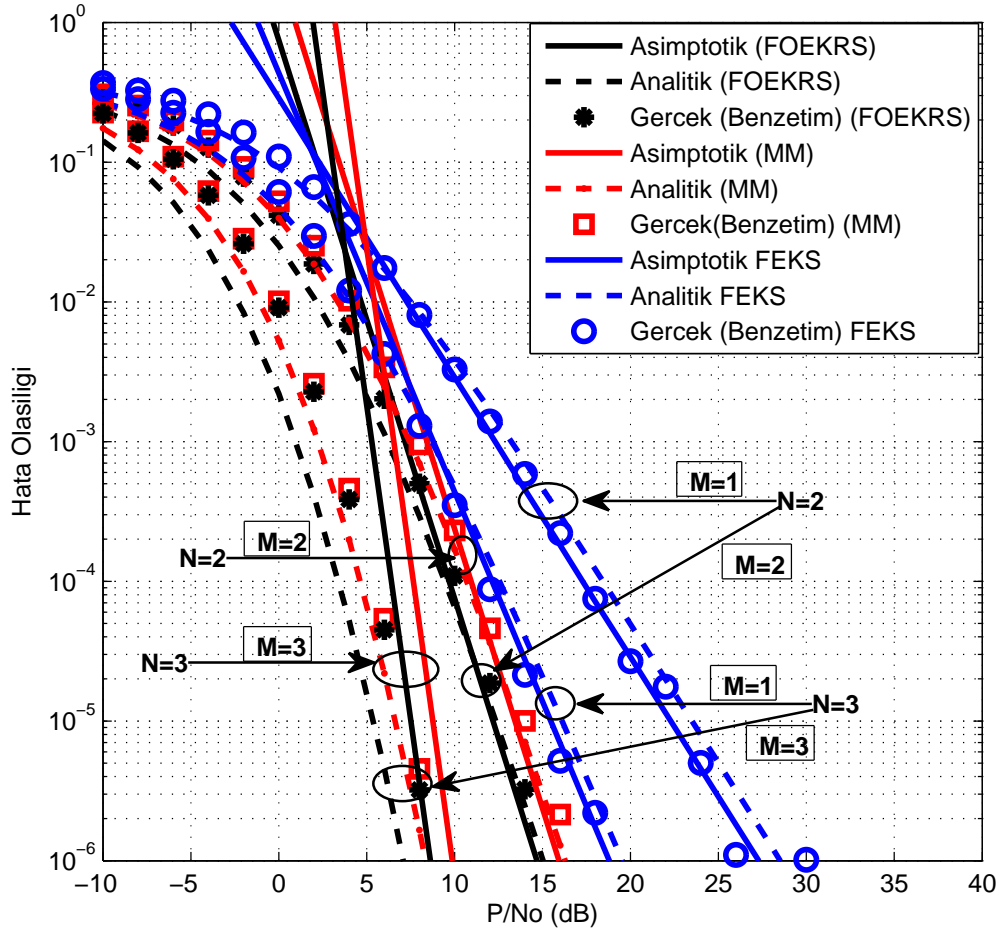
Şekil 4.15'te M röleli sistem modeli ile tek röleli sistem modeline ilişkin hata olasılığı performans analizine yer verilmektedir. Performans analizi sırasında kullanıcı sayısının, $N = 2, 3$ olduğu ve röle sayısının, $M = 1, 2, 3$ olduğu durumlar kullanılmaktadır.

$M > 1$ olduğu durumda FOEKRS metodunun hata olasılığı MM tabanlı hata olasılığından daha iyi başarımlar sağlamaktadır. $N = 3$ ve $M = 3$ olduğu durumda, FOEKRS ve MM metodlarının 10^{-6} hata olasılığı değerine ulaşması için gerekli SGO değeri sırasıyla 7 dB ve 8 dB'dir. $N = 2$ ve $M = 2$ olduğu durumda ise 10^{-6} hata olasılığı değeri için gerekli SGO değerleri FOEKRS ve MM metodları için sırasıyla 15 dB ve 17 dB'dir. Elde edilen bu sonuçlar FOEKRS ve MM metodları için analitik olarak sırasıyla (3.225) ve (3.227) ile asimptotik olarak ise (3.230) ve (3.231) ile tutarlılık göstermektedir. $M = 1$ olduğu ve N değerinin de 2 ve 3 olduğu durumda FEKS metodu için 10^{-6} hata olasılığı değeri için gerekli SGO değerleri sırasıyla 27 dB ve 19 dB'dir. Bu değerler analitik olarak (3.41) ve asimptotik olarak ise (3.65) ile tutarlılık göstermektedir.

4.4.3. Başarılabilir Kapasite

Şekil 4.16'da N kullanıcı ve M röleli, $N = 2, 4, 6$ ve $M = 2, 4, 6$, sistem modeli ile N kullanıcı tek röleli sistem modeline ilişkin başarılabilir oran performans değerlendirilmesine yer verilmektedir.

N kullanıcı ve M röleli, $M > 1$, sistem modelinde oluşan başarılabilir oran değeri N kullanıcı tek röleli sistem modeline göre daha iyi performans sergilemektedir. M röleli

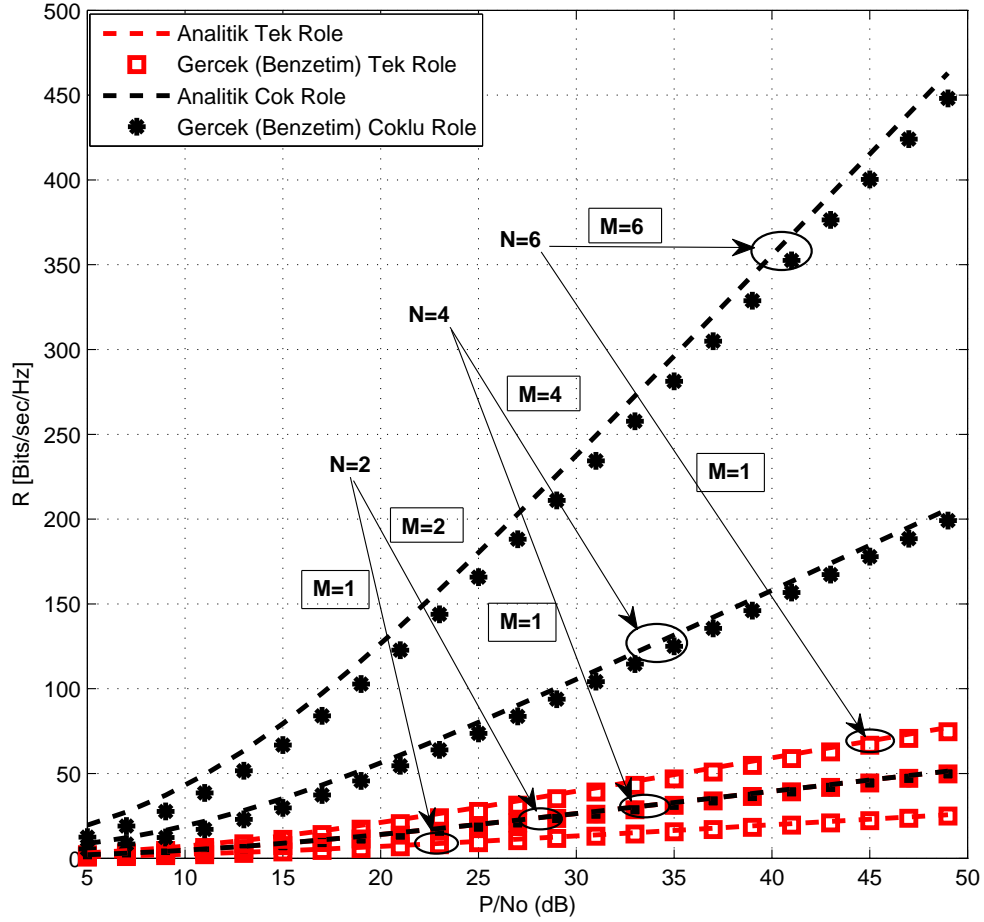


Şekil 4.15: FOEKRS, MM ve tek röleli FEKS metodlarının hata olasılığı karşılaştırması.

durumda, kullanıcı çiftlerinin M röle ile yaptığı toplam yol sayısı $L = M \times N$ değerine eşittir. Bu durum tek röleli durum için sadece N değerine eşittir. Kullanıcı çifti sayısı ve röle sayısındaki artış daha iyi başarılabilir oran değerleri sağlamaktadır. Elde edilen bu değerler tek ve çok röleli durumlar için sırasıyla (3.56) ve (3.239) ile tutarlılık göstermektedir.

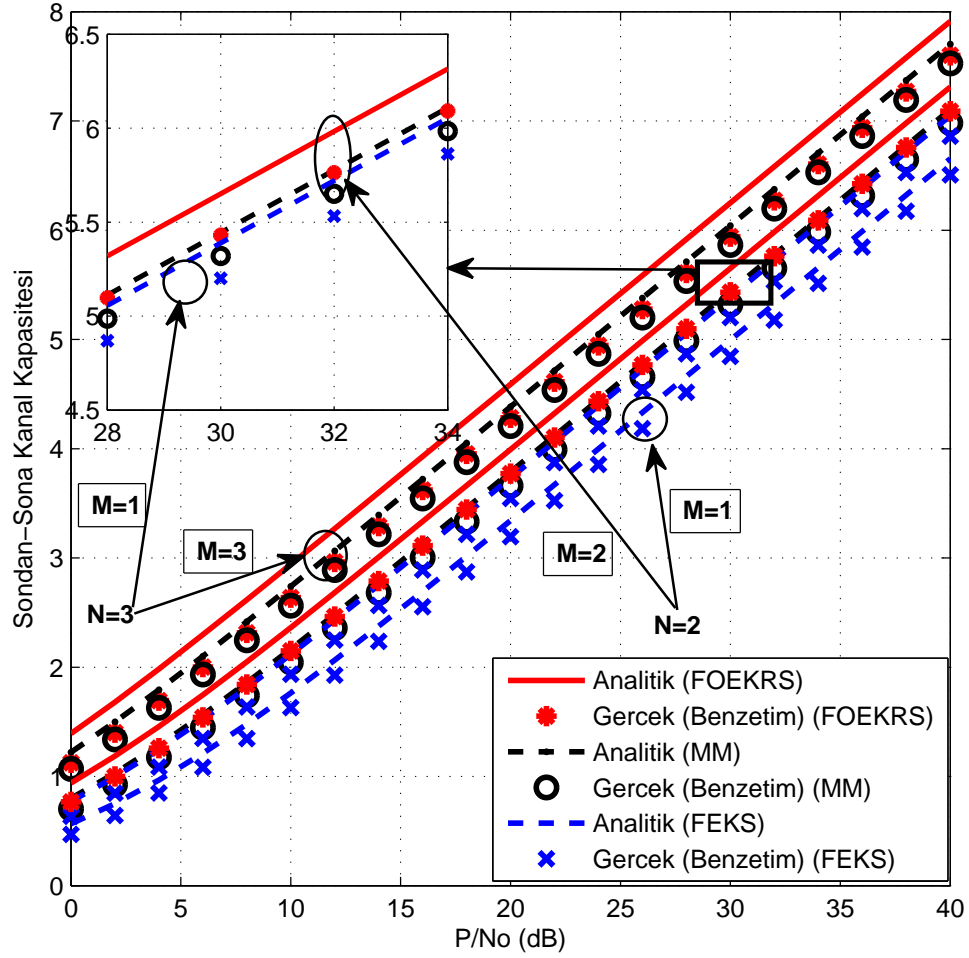
4.4.4. Kapasite Analizi

Şekil 4.17'de N kullanıcı ve M röleli, $N=2, 3$ ve $M=2, 3$, sistem modeli ile N kullanıcı tek röleli sistem modeline ilişkin sondan-sona kanal kapasitesi performans değerlendirmesine yer verilmektedir.



Şekil 4.16: N kullanıcı M röleli ve tek röleli FOEKRS modeline ilişkin başarılabılır oran değeri performans karşılaştırması.

N kullanıcı ve M röleli sistem modelinde, sondan-sona kanal kapasitesi performans ölçütü açısından FOEKRS metodu MM metoduna göre daha iyi performans sergilemektedir. Diğer taraftan, çok röleli sistem modeli de tek röleli sistem modeline göre daha iyi sondan-sona kanal kapasitesi performansı sergilemektedir. Bu duruma, tek röleli sistem modelindeki kullanıcı çiftlerinin röle istasyonu ile yaptıkları toplam yol sayısının N 'e, çok röleli sistem modelinde ise bu sayısının $L = M \times N$ değerine eşit olması sebep olmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, M röleli FOEKRS ve MM metodları için analitik olarak sırasıyla (3.234) ve (3.236) ile tutarlılık göstermektedir. Tek röleli model için ise analitik olarak (3.59) ile tutarlılık göstermektedir.



Şekil 4.17: N kullanıcı, M röleli FOEKRS, MM metodlarının ve N kullanıcı tek röleli kanal kapasitesi karşılaştırması.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tez çalışmasında çok kullanıcılı YG tabanlı iki yönlü kablosuz röleli ağlarda sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı hücre-içi etkileşim problemi incelenmiştir. İnceleme sırasında ele alınan hücre-içi etkileşim problemi kullanıcı çiftlerinin birbirleri ile aynı anda YG tabanlı iki yönlü kablosuz röle vasıtasıyla veri alışverişi yapması sonucunda oluşmaktadır. Bu durumun sistem performansı üzerine olumsuz yönde etkileri olmaktadır. Hücre-içi etkileşim probleminin çözümüne yönelik olarak literatürde kullanılan yöntemlerden farklı olarak, sistem içerisinde bulunan kullanıcı çiftlerinin toplam kapasitelerinin hesaplandığı ve her bir zaman aralığında maksimum toplam kapasiteye sahip olan kullanıcı çiftinin seçildiği ve sadece seçilen kullanıcı çiftinin veri alışverişi yapmasına izin verildiği “FEKS” metodu önerilmiştir. Bu metod, her bir zaman aralığında kullanıcı çifti seçim işlemi ile diğer kullanıcı çiftlerinin haberleşme sürecine katılmamasıyla hücre-içi etkileşim problemine optimuma yakın bir çözüm sağlamaktadır. Bu durumun yanı sıra, her bir zaman aralığında maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çifti seçimi yüksek SGO bölgesinde çeşitlilik ölçütü oluşturmaktadır. Diğer taraftan, FEKS metodu literatürde yaygın bir kullanım alanına sahip olan MM tabanlı kullanıcı çifti seçim metoduna göre daha iyi performans sergilemektedir.

Kullanıcı çiftlerinin iki yönlü röle ile veri alışverişi merkezi birim tarafından kontrol edilmektedir. Kanal durum bilgisinin ölçülmesi ve ilgili kullanıcı çiftlerine ait linklerin kanal kapasitesilerinin hesaplanması süreçleri merkezi birim tarafından kontrol edilmektedir. Bu süreçlerin başarılı bir şekilde tamamlanması kanal durum bilgisinin mükemmel bir şekilde elde edilmesine bağlıdır. Fakat, birçok pratik uygulamalarda kanal durum bilgisi her zaman mükemmel bir şekilde ölçüm yapıp elde edilemiyor. Kanal bilgisinin kestirimi sırasında kestirimden kaynaklı oluşabilecek hatalar mevcuttur. Diğer taraftan kestirilmiş olan kanal durum bilgisinin verici kısmına iletilmesi sırasında kanalın değişiminden kaynaklı oluşabilecek geri bildirim gecikmeleride kanal durum bilgisinin mükemmeliyetini etkilemektedir.

Kanal durum bilgisinin kanal kestiriminden kaynaklı oluşan hatadan dolayı mükemmel

olmaması pilot iletim sinyalinin gücünün düşük SGO bölgesinde gürültüye oranla düşük olması kodlama kazancında kayıpların oluşmasına sebep olmaktadır. Fakat bu durum yüksek SGO bölgesinde ihmal edilecek seviyelere gelmektedir. Hedef iletim değerinin artırılması sonucunda performans eğrilerinin SGO boyunca ötelenmesine yol açacağından dolayı kestirimden kaynaklı hatalar ihmal edilecek düzeylere gelmektedir. Diğer taraftan, pilot iletim sinyalinin gücü yüksek SGO bölgesinde yüksek olması (oluşabilecek olan hatanın düşük olması) çeşitlilik ölçütünün oluşmasına etki etmemektedir. Kanal durum bilgisinin verici tarafına iletimi sırasında kanalın değişmesi ile eski kanal durum bilgisinin vericiye gönderilmesi ile oluşan hatadan dolayı mükemmel olmaması durumunda, yüksek SGO bölgesinde oluşan başarılabılır çeşitlilik ölçütü değerini N seviyesinden 0 seviyesine düşmesine sebep olmaktadır. Bu durum aynı zamanda sistem kodlama kazancında büyük kayıpların oluşmasına sebep olmaktadır.

Günümüzde her bir hücresele kapsama alanı içerisindeki hareketli kullanıcı sayısı hızla artmaktadır. Bu durum, aynı veya komşu hücresele kapsama alanı içerisinde bulunan aynı frekans bandında çalışan dış kaynaklı istasyonlardan sistem modeline etki eden eş-kanal etkileşimlerin oluşmasına yol açmaktadır. Bu etkileşimler sistem performansını ciddi bir şekilde etkileyerek güvenilir haberleşme yapılmasını engellemektedir. Dış kaynaklı istasyonlardan kaynaklı oluşan etkileşimlerin tez çalışması sırasında kullanılan çok kullanıcılu tekli iki-yönlü kablosuz röleli sistem modeline etkileri incelenmiştir. İnceleme sırasında, kullanıcı çiftlerinin aynı anda veri alışverişi yaptığı AAİ modeli ve hücre-içi etkileşim probleminin çözümüne yönelik önerilen FEKS metodu üzerine olan etkiler ele alınmıştır. Analitik, asimptotik ve Monte-Carlo benzetim sonuçlarına göre, dış kaynaklı etkileşimler, AAİ modelinin sistem performansı üzerinde bozucu etkiler oluşturmaktadır. Diğer taraftan dış kaynaklı etkileşimler, FEKS metodu ile elde edilen başarılabılır çeşitlilik ölçütü değerini N'den 0 değerine düşürürken sistem kodlama kazancında da kayıplar oluşturmaktadır. Dış kaynaklı istasyonların birbirinden farklı iletim güçlerine sahip olduğu ve röle istasyonuna kullanıcı çiftlerine etkiyenden daha fazla iletim gücüne sahip bir etkileşim olduğu durumda daha iyi performans sonuçları verdiği gözlemlenmiştir.

Sistem modelinde, bir adet iki yönlü röle yerine çok sayıda röle olması ve kullanıcı çiftlerinin seçilen röle ile veri alışverişi yapması sistem genel giderlerinin azaltılması yönünden fayda sağlamaktadır. Fakat bu durum her bir kullanıcıda, sistem içerisindeki diğer kullanıcı çiftlerinden kaynaklı oluşan hücre-içi etkileşim problemine çözüm olmamaktadır. Bu

problemin çözümüne yönelik, “FOEKRS” metodu önerilmiştir. Bu yeni yöntem, sistem içerisinde bulunan kullanıcı çiftlerinin her bir röle istasyonu ile yaptıkları kanalların toplam kapasitelerinin hesaplandığı ve maksimum toplam kapasiteye sahip kullanıcı çifti ve rölenin seçilmesine dayanmaktadır. FOEKRS metodu, hücre-içi etkileşim problemine optimuma yakın çözüm sağlamasının yanı sıra MM tabanlı kullanıcı çifti ve röle seçim metodundan daha iyi performans sergilemektedir. Diğer taraftan, sistem modelinin çok kullanıcı ve çok röleli olduğu durum, çok kullanıcı ve tek röleli olduğu duruma göre kodlama kazancı bakımından daha iyi başarımlar sonuçları vermektedir. Tek röleli sisteme göre sistem performansında gözlemlenen iyileşme kullanıcı çifti seçimi ile oluşan çok kullanıcı çeşitliliği ile röle seçimi ile oluşan işbirlikçi çeşitliliğin birleşiminden kaynaklanmaktadır. Tek röleli sistem modelinde ise sadece çok kullanıcı çeşitliliği oluşmaktadır.

Sonuç olarak, tez çalışması ile elde edilen çıkarımların literatüre özgün katkılar sağlamanın yanı sıra gelecek nesil kablosuz haberleşme teknolojisi alanında çalışma yapan hücresel ağ planlayıcılarına da yol gösterici niteliğindedir. Hücresel kapsama alanında çok kullanıcı ve tek/çok röleli olduğu sistem modelinde sistem genel giderlerinin azaltılmasına yönelik kullanıcı ve röle seçimi sürecinde yaygın bir kullanım alanına sahip olan MM metodunun yerine FEKS ve FOEKRS metodlarının kullanılması sistem kodlama kazancı bakımından avantaj sağlayacaktır. Diğer taraftan, çok kullanıcı kablosuz haberleşme senaryolarında röle istasyonun/istasyonlarının hücresel kapsama alanı içerisindeki optimum pozisyonunun belirlenmesi noktasında aydınlatıcı bilgiler vermektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Laneman, J. N., Tse, D. N. C., Wornel, G. W., 2004, Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behaviour, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080.
- [2]. Kramer, G., Gastpar, M., Gupta, P., 2005, Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.51, no.9, pp.3037,3063, doi: 10.1109/TIT.2005.853304.
- [3]. Chen, H., Gershman, A. B., Shahbazpanahi, S., 2009, Filter-and-forward distributed beamforming for relay networks in frequency selective fading channels, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2009*, 19-24 April 2009 Taipei, ISBN: 978-1-4244-2353-8, vol., no., pp.2269-2272, doi: 10.1109/ICASSP.2009.4960072.
- [4]. Cover, T. M., Gamal, E. A., 1979, Capacity theorems for the relay channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 25. No. 5 pp.572-584.
- [5]. Shannon, C. E., 1961, Two-way communication channels, *Proceedings of the 4th Berkeley Symposium Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley California, University of California Press, Berkeley California, Vol. 1, pp. 611–644.
- [6]. Kim, S. J., Mitran, P., Tarokh, V., 2008, Performance Bounds for Bidirectional Coded Cooperation Protocols, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no. 11, pp. 5235-5241, doi: 10.1109/TIT.2008.929913.
- [7]. Katti, S., Gollakota, S., Katabi, D., 2007, Embracing Wireless Interference: Analog Network Coding, *SIGCOMM '07 Proceedings of the 2007 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, 27-31 August Kyoto Japan, pp. 397-408.
- [8]. Esli, C., Wittneben, A., 2008, One-and Two-Way Decode-and-Forward Relaying for Wireless Multiuser MIMO Networks, *Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM 2008*, 30 November-4 December 2008 New Orleans, LA, USA, vol., no., pp.1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.765.
- [9]. Joung, J., Sayed, A. H., 2010, Multiuser Two-Way Amplify-and-Forward Relay Processing and Power Control Methods for Beamforming Systems, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.58, no.3, pp.1833-1846, doi: 10.1109/TSP.2009.2038668.
- [10]. Liu, M., Zhang, J., Zhang, P., 2014, Multipair Two-Way Relay Networks with Very Large Antenna Arrays, *IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 14-17 September 2014 Vancouver, Canada, vol., no., pp.1,5, doi: 10.1109/VTC-Fall.2014.6966067.
- [11]. Ngo, H. Q., Larsson, E. G., 2013, Spectral efficiency of the multipair two-way relay channel with massive arrays, *2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and*

- Computers*, 3-6 November 2013 Pacific Grove, CA, USA, vol., no., pp.275,279, doi: 10.1109/ACSSC.2013.6810276.
- [12]. Gong, P., Xu, J., Qiu, L., 2011, Zero-forcing dirty paper coding aided physical-layer network coding for MIMO two-way relaying channels with multiple users, *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, Pp: 53-58 Vol: 18, issue: 2, DOI: 10.1016/S1005-8885(10)60044-1.
- [13]. Chung, H., Lee, N., Shim, B., Oh, T. W., 2012, Joint transceiver and relay beamforming design for multi-pair two-way relay systems, *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 10-15 June 2012 Ottawa, Canada, vol., no., pp.3795,3799, doi: 10.1109/ICC.2012.6364260.
- [14]. Long, W., Gao, H., Lv, T., 2014, Asymmetric signal space alignment for multi-pair two-way relaying network, *2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 10-14 June 2014 Sydney Australia, vol., no., pp.308,313, doi: 10.1109/ICCW.2014.6881214.
- [15]. Chen, Y., Shu, F., Wang, J., Gui, L., Tong, J., 2014, High-performance beamforming and spatial channel pairing schemes at relay station for AF-based multi-pair two-way relay networks, *2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 23-25 October 2014 Hefei, China, vol., no., pp.1,4, doi: 10.1109/WCSP.2014.6992011.
- [16]. Cui, H., Song, L., Jiao, B., 2014, Multi-Pair Two-Way Amplify-and-Forward Relaying with Very Large Number of Relay Antennas, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.13, no.5, pp.2636,2645, doi: 10.1109/TWC.2014.032514.130885.
- [17]. Chung, H., Lee, N., Shim, B., Oh, T., 2012, On the Beamforming Design for MIMO Multipair Two-Way Relay Channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.61, no.7, pp.3301,3306, doi: 10.1109/TVT.2012.2203619.
- [18]. Zaeri-Amirani, M., Shahbazpanahi, S., Mirfakhraie, T., Ozdemir, K., 2012, Performance Tradeoffs in Amplify-and-Forward Bidirectional Network Beamforming, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.60, no.8, pp.4196,4209, doi: 10.1109/TSP.2012.2197203.
- [19]. Joung, J., Sayed, A.H., 2009, Multiuser two-way relaying method for beamforming systems, *IEEE 10th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, SPAWC '09*, 21-24 June 2009 Perugia, Italy, vol., no., pp.280,284, doi: 10.1109/SPAWC.2009.5161791.
- [20]. Goldsmith, A. J., 2005, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, ISBN: 9780521837163.
- [21]. Prasad, R., 2004, *OFDM for Wireless Communications Systems*, Artech House, ISBN: 1-58053-796-0.
- [22]. Yang, S. C., 2010, *OFDMA System Analysis and Design*, Artech House, Norwood, MA, ISBN-13: 978-1-60807-076-3.

- [23]. Chen, M., Yener, A., 2009, Multiuser two-way relaying: detection and interference management strategies, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.8, no.8, pp.4296-4305, doi: 10.1109/TWC.2009.081165.
- [24]. Chen, M., Yener, A., 2010, Power allocation for F/TDMA multiuser two-way relay networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.9, no.2, pp.546-551, doi: 10.1109/TWC.2010.02.090336.
- [25]. Boostanimehr, H., Bhargava, V. K., 2014, Outage Probability Analysis for Multi-User Single-Relay OFDMA DF Networks in Frequency Selective Rayleigh Fading Channels, *IEEE Communications Letters*, vol.18, no.2, pp.245,248, doi: 10.1109/LCOMM.2013.112713.132078.
- [26]. Sidhu, G.A.S., Gao, F., Chen, W., Nallanathan, A., 2011, A Joint Resource Allocation Scheme for Multiuser Two-Way Relay Networks, *IEEE Transactions on Communications*, vol.59, no.11, pp.2970,2975, doi: 10.1109/TCOMM.2011.071111.100199.
- [27]. Zhao, R., Yang, L., Zhu, W.-P., He, Z., 2010, OFDM amplify-and-forward two-way relaying for MIMO multiuser networks, *2010 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 14-19 March 2010 Dallas TX USA, vol., no., pp.3238,3241, doi: 10.1109/ICASSP.2010.5496052.
- [28]. Jeon, Y., Kim, Y.-T., Park, M., Lee, I., 2012, Opportunistic Scheduling for Multi-User Two-Way Relay Systems with Physical Network Coding, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.11, no.4, pp.1290-1294, doi: 10.1109/TWC.2012.021412.111189.
- [29]. Jang, Y.-U., Lee, Y. H., 2010 , Performance Analysis of User Selection for Multi-user Two-Way Amplify-and-Forward Relay, *IEEE Communications Letters*, vol.14, no.11, pp.1086-1088, doi:10.1109/LCOMM.2010.100410.101004.
- [30]. Zhang, X., Peng, M., Ding, Z., Wang, W., 2012, Multi-User Scheduling for Network Coded Two-Way Relay Channel in Cellular Systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.11, no.7, pp.2542-2551, doi: 10.1109/TWC.2012.051712.111377.
- [31]. Ozduran V., Cioffi, J. M., Yarman, B. S., 2013, Opportunistic Source-Pair Selection (OSPS) Method for Multiuser Bi- directional Wireless Relaying Networks, *14th IEEE workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communication (SPAWC)*, 16-19 June 2013 Darmstadt, Germany, vol., no., pp.565,569, doi: 10.1109/SPAWC.2013.6612113.
- [32]. Ozduran V., Soleimani-Nasab, E., Yarman, B. S., 2015, Opportunistic Source-Pair Selection for Multiuser Two- Way Wireless Relaying Networks, *IET Communications* dergisine gönderildi. Gönderim tarihi: 21.06.2015.
- [33]. Krikidis, I., Thompson, J. S., Mclaughlin, S., Goertz, N., 2009, Max-min relay selection for legacy amplify-and-forward systems with interference, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol:8, number:6, pages:3016-3027, doi:10.1109/TWC.2009.080383.

- [34]. He, Z., Jiang, W., Rong, Y., 2015, Robust Design for Amplify-and-Forward MIMO Relay Systems With Direct Link and Imperfect Channel Information, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.14, no.1, pp.353,363, doi: 10.1109/TWC.2014.2347274.
- [35]. Ibrahim, A. S., Liu, K. J. R., 2009, Mitigating channel estimation error via cooperative communications, *IEEE International Conference on Communications, ICC '09*, 14-18 June 2009 Dresden, Germany, vol., no., pp.1-5, 14-18 doi: 10.1109/ICC.2009.5199186.
- [36]. Ikki, S. S., Aissa, S., 2011, Error probability analysis of two-way amplify-and-forward relaying in the presence of imperfect channel estimations, *2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 11-14 September 2011 Toronto Canada, vol., no., pp.1963,1967, doi: 10.1109/PIMRC.2011.6139854.
- [37]. Tabataba, F. S., Sadeghi, P., Hucher, C., Pakravan, M. R., 2012, Impact of Channel Estimation Errors and Power Allocation on Analog Network Coding and Routing in Two-Way Relaying, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.61, no.7, pp.3223,3239, doi: 10.1109/TVT.2012.2201969.
- [38]. Choi, D., Lee, J. H., 2014, Outage Probability of Two-Way Full-Duplex Relaying With Imperfect Channel State Information, *IEEE Communications Letters*, vol.18, no.6, pp.933,936, doi: 10.1109/LCOMM.2014.2320940.
- [39]. Chiong, C. W. R., Rong Y., Xiang, Y., 2015, Channel Estimation for Two-Way MIMO Relay Systems in Frequency-Selective Fading Environments, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.14, no.1, pp.399,409, doi: 10.1109/TWC.2014.2347321.
- [40]. Yadav, S., Upadhyay, P., 2015, Impact of Outdated Channel Estimates on Opportunistic Two-Way ANC-Based Relaying with Three-Phase Transmissions, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.PP, no.99, pp.1,1 doi: 10.1109/TVT.2014.2387480.
- [41]. Degenhardt, H., Hohmann, F., Klein, A., 2012, Pilot transmission scheme and robust filter design for non-regenerative multi-pair two-way relaying, *23rd IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 9-12 Sept. 2012, vol., no., pp.2101-2106, doi: 10.1109/PIMRC.2012.6362701.
- [42]. Fan, L., Lei, X. , Chen, H., Zhou, W., 2014, Impact of channel estimation error on fixed-gain two-way relay network with user/antenna selection, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, Vol. 25, Issue 5, pp. 490–495, <http://dx.doi.org/10.1002/ett.2594>.
- [43]. Fan, L., Lei, X., Fan, P., Hu, R. Q., 2012, Outage Probability Analysis and Power Allocation for Two-Way Relay Networks with User Selection and Outdated Channel State Information, *IEEE Communications Letters*, vol.16, no.5, pp.638-641, doi: 10.1109/LCOMM.2012.031212.112448.

- [44]. Cui, H., Zhang, R., Song, L., Jiao, B., 2011, Performance Analysis of Bidirectional Relay Selection with Imperfect Channel State Information, arXiv:1112.2374 [cs.NI].
- [45]. Liu, Y., Petropulu, A., 2012, Antenna selection in relay networks with multiple source-destination pairs in the presence of imperfect CSI, *2012 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, 21-23 March 2012 Princeton, NJ, USA, vol., no., pp.1-5, doi: 10.1109/CISS.2012.6310718.
- [46]. Ma, Y., Zhang, D., Leith, A., Wang, Z., 2009, Error performance of transmit beamforming with delayed and limited feedback, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.8, no.3, pp.1164-1170, doi: 10.1109/TWC.2008.080570.
- [47]. Wang, C., Liu, T.C.-K., Dong, X., 2012, Impact of Channel Estimation Error on the Performance of Amplify-and-Forward Two-Way Relaying, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.61, no.3, pp.1197,1207, doi: 10.1109/TVT.2012.218596.
- [48]. Seyfi, M., Muhaidat, S., Liang, J., 2010, Amplify-and-Forward Selection Cooperation with Channel Estimation Error, *2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, 6-10 December 2010 Miami, Florida, USA, vol., no., pp.1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683505.
- [49]. Zhong, K., Lei, X., Hu, S., Li, S., 2014, On channel estimation and detection for amplify-and-forward orthogonal frequency division multiplexing-based two-way relay systems under unknown non-reciprocal doubly selective fading channels, *IET Communications*, vol.8, no.3, pp.378,389, doi: 10.1049/iet-com.2013.0249.
- [50]. Ozduran, V., Yarman, B. S., Cioffi, J. M., 2015, Opportunistic Source-Pair Selection (OSPS) Method with Imperfect Channel State Information in Multiuser Bidirectional Wireless Relaying Networks, *IEEE Transaction on Communications* dergisine gönderildi. Gönderim tarihi: 03.08.2015.
- [51]. Ikki, S.S., Aissa, S., 2012, Performance Analysis of Two-Way Amplify-and-Forward Relaying in the Presence of Co-Channel Interferences, *IEEE Transactions on Communications*, vol.60, no.4, pp.933,939, doi: 10.1109/TCOMM.2012.013112.110188.
- [52]. Long, Y., Gao, Y., Guo, M., Zang, G., 2014, Outage analysis of two-way AF relaying systems with imperfect CSI and multiple interferers over Nakagami- m fading channels, *2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, 26-28 April 2014 Shenzhen, Guangdong, China, vol., no., pp.535,538, doi: 10.1109/ICIST.2014.6920534.
- [53]. Hataminia, S., Vahidian, S., Mohammadi, M., Ahmadian-Attari, M., 2014, Performance analysis of two-way decode-and-forward relaying in the presence of co-channel interferences, *IET Communications*, vol.8, no.18, pp.3349,3356, doi: 10.1049/iet-com.2014.0592.

- [54]. Benevides da Costa, D., Ding, H., Yacoub, M.D., Ge, J., 2012, Two-Way Relaying in Interference-Limited AF Cooperative Networks Over Nakagami- m Fading, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.61, no.8, pp.3766,3771, doi: 10.1109/TVT.2012.2208773.
- [55]. Yang, L., Qaraqe, K., Serpedin, E., Alouini, M.-S., 2013, Performance Analysis of Amplify-and-Forward Two-Way Relaying with Co-Channel Interference and Channel Estimation Error, *IEEE Transactions on Communications*, vol.61, no.6, pp.2221,2231, doi: 10.1109/TCOMM.2013.032713.120719.
- [56]. Shen, J., Sha, N., Cai, Y., Cai, C., Yang, W., 2011, Outage probability of two-way amplify-and-forward relaying system with interference-limited relay, *2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 9-11 November 2011 Nanjing, China, vol., no., pp.1,5, doi: 10.1109/WCSP.2011.6096770.
- [57]. Liang, X., Jin, S., Wang, W., Gao X., Wong, K-K., 2012, Outage Probability of Amplify-and-Forward Two-Way Relay Interference-Limited Systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.61, no.7, pp.3038,3049, doi: 10.1109/TVT.2012.2201514.
- [58]. Soleimani-Nasab, E., Matthaiou, M., Ardebilipour, M., Karagiannidis, G., 2013, Two-Way AF Relaying in the Presence of Co-Channel Interference, *IEEE Transactions on Communications*, vol.PP, no.99, pp.1,14, doi:10.1109/TCOMM.2013.053013.120840.
- [59]. Mandpura, A. K., Prakriya, S., Mallik, R. K., 2013, Outage probability of Amplify-and-Forward two-way cooperative systems in presence of multiple co-channel interferers, *2013 National Conference on Communications (NCC)*, 15-17 February 2013 New Delhi, India, vol., no., pp.1,5, doi: 10.1109/NCC.2013.6487961.
- [60]. Hemachandra, K.T., Beaulieu, N.C., 2012, Opportunistic scheduling in dual-hop multiuser relay networks in the presence of co-channel interference, *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 3-7 December 2012 Anaheim, CA, USA, vol., no., pp.4635,4640, doi: 10.1109/GLOCOM.2012.6503850.
- [61]. Chen, Z., Cai, Y., Wang, L., 2012, Outage probability of two-way AF relaying in the presence of channel estimation error and Co-Channel interference, *2012 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 25-27 October 2012 Huangshan, China, vol., no., pp.1,5, doi: 10.1109/WCSP.2012.6542970.
- [62]. Ozduran, V., Yarman, B.S., 2014, Impact of the External Co-Channel Interferences over Multiuser Bi-directional Wireless Relaying Networks-Part I: System Description and Outage Analysis, *Wireless Personal Communication*, Vol. 78, Issue 2, pp 1277-1295, doi: 10.1007/s11277-014-1817-9.
- [63]. Ozduran, V., Yarman, B.S., 2015, Impact of the External Co-Channel Interferences over Multiuser Bi-directional Wireless Relaying Networks: Theoretical Approach, *IEEE Transactions on Communications* dergisine gönderildi. Gönderim tarihi: 16.04.2015.

- [64]. Torrellas, M., Agustin, A., Vidal, J., 2013, Coordinated beamforming access for interfering half-duplex relay networks, *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 9-13 June 2013 Budapest, Hungary, vol., no., pp.122,126, doi: 10.1109/ICCW.2013.6649213.
- [65]. Wang, C., Chen, H., Yin, Q., Feng, A., Molisch, A.F., 2011, Multi-User Two-Way Relay Networks with Distributed Beamforming, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.10, no.10, pp.3460-3471, doi: 10.1109/TWC.2011.081011.102277.
- [66]. Shin, H., Lee, J. H., 2011, Joint Resource Allocation for Multiuser Two-Way OFDMA Relay Networks with Proportional Fairness, *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 5-8 September 2011 San Francisco, USA, vol., no., pp.1,5, doi: 10.1109/VETECONF.2011.6093171.
- [67]. Wan, Q., Ma, G., 2014, Resource allocation in AF-OFDMA two-way relay systems, *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, 16-23 August 2014 Beijing, China, vol., no., pp.1,4, doi: 10.1109/URSI-GASS.2014.6929282.
- [68]. Zhang, H., Liu, Y., Tao, M., 2012, Resource Allocation with Subcarrier Pairing in OFDMA Two-Way Relay Networks, *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.1, no.2, pp.61,64, doi: 10.1109/WCL.2012.011712.110170.
- [69]. Xu, G., Ma, W., Ren, Y., Huang, Q., Wang, Y., 2014, Joint Resource Allocation for Multi-User and Two-Way Multi-Relay OFDMA Networks, *2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 18-21 May 2014 Seoul, Korea, vol., no., pp.1,5, doi: 10.1109/VTCSpring.2014.7022968.
- [70]. Liao, Y.-J., Chien, F.-T., Chang, M.-K., 2012, Relay selection in multiuser two-way cooperative relaying systems, *2012 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, 3-6 December 2012 Hollywood, CA, USA, vol., no., pp.1,6.
- [71]. Bai, B., Chen, W., Ben Letaief, K., Cao, Z., 2011, Optimal Relay Selection and Channel Allocation for Multi-User Analog Two-Way Relay Systems, *2011 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, 5-9 December 2011 Houston TX, USA, vol., no., pp.1,5, doi: 10.1109/GLOCOM.2011.6134204.
- [72]. Li, E., Yang, S., Wu, H., 2012, A Source-Relay Selection Scheme in Two-Way Amplify-and-Forward Relaying Networks, *IEEE Communications Letters*, vol.16, no.10, pp.1564,1567, doi: 10.1109/LCOMM.2012.081612.121389.
- [73]. Zhang, C., Ge, J., LI, J., Rui, Y., Guizani, M., 2014, A Unified Approach for Calculating Outage Performance of Two-Way AF Relaying over Fading Channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.PP, no.99, pp.1,1 doi: 10.1109/TVT.2014.2329853.

- [74]. Ozduran, V., Yarman, B.S., Cioffi, J. M., 2015, Opportunistic Joint Source-Pair and Relay Selection (OJSPRS) Method in Multiuser Bi- directional Wireless Relaying Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communication* dergisine gönderildi. Gönderim tarihi: 27.03.2014.
- [75]. Van Veen, B.D., Buckley, K.M., 1988, Beamforming: a versatile approach to spatial filtering, *IEEE ASSP Magazine*, vol.5, no.2, pp.4,24, doi: 10.1109/53.665.
- [76]. Wiesel, A., Eldar, Y.C., Shamai, S., 2008, Zero-Forcing Precoding and Generalized Inverses, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.56, no.9, pp.4409,4418, doi: 10.1109/TSP.2008.924638.
- [77]. Costa, M. H. M., 1983, Writing on dirty paper (Corresp.), *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.29, no.3, pp.439,441, doi: 10.1109/TIT.1983.1056659.
- [78]. Gong, Y., Zhu, Y., 2011, A relay selection scheme based on the harmonic mean in two-way relay networks with physical layer network coding, *2011 Global Mobile Congress (GMC)*, 17-18 October 2011 Shanghai, China, vol., no., pp.1,5, doi: 10.1109/GMC.2011.6103932.
- [79]. Hasna, M. O., Alouini, M.-S., 2003, End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.2, no.6, pp.1126,1131, doi: 10.1109/TWC.2003.819030.
- [80]. David, H. A., Nagaraja, H. N., 2003, Order Statistics, 3rd Edition, Wiley, ISBN: 978-0-471-38926-2.
- [81]. Duong, T. Q., Bao, V. N. Q., Zepernick, H., 2009, On the performance of selection decode-and-forward relay networks over Nakagami- m fading channels, *IEEE Communications Letters*, vol.13, no.3, pp.172,174, doi: 10.1109/LCOMM.2009.081858.
- [82]. Gradshteyn, I. S., Ryzhik, I. M., 2007, Tables of Integrals, Series and Products, 7th edition, Elsevier Inc., ISBN-13: 978-0123736376.
- [83]. Aalo, V.A., Zhang, J., 2001, Performance analysis of maximal ratio combining in the presence of multiple equal-power cochannel interferers in a Nakagami fading channel, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.50, no.2, pp.497,503, doi: 10.1109/25.923061.

EKLER

A. EK-1.

A.1. AAİ Modelinde $F\gamma_{X_k^{ust}}$ ve $F\gamma_{Y_k^{ust}}$ İfadelerinin Hesaplaması

γ_{X_k} ve γ_{Y_k} , (3.22) ve (3.23) ifadeleri (A.1) ve (A.2) ile tekrar ifade edilir.

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k^{ust}} = \min \left(\gamma_x, \frac{\gamma_y}{\gamma_A + \gamma_B + 1} \right) = \min (X, Y) \quad (\text{A.1})$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k^{ust}} = \min \left(\gamma_y, \frac{\gamma_x}{\gamma_A + \gamma_B + 1} \right) = \min (U, V) \quad (\text{A.2})$$

Burada, $\underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^{N-1} \gamma_{x_i} + 1}_{\gamma_R} = \gamma_A$ ve $\underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^{N-1} \gamma_{y_i} + 1}_{\gamma_J} = \gamma_B$ 'dir.

(A.1)'de X ve Y ifadeleri $X = \gamma_x$, $Y = \frac{\gamma_y}{\gamma_R + \gamma_J + 3}$ şeklinde ifade edilir.

$$F_{\gamma_{X_k^{ust}}} = 1 - P_r (\gamma_x > \gamma, \gamma_y > \gamma) \quad (\text{A.3})$$

$$F_{\gamma_{X_k^{ust}}} = 1 - P_r (1 - F_x(\gamma)) (1 - F_y(\gamma)) \quad (\text{A.4})$$

γ_x 'in PDF'si, $f\gamma_x(\gamma) = \frac{1}{P\Omega_{hk}} \exp\left(-\frac{\gamma}{P\Omega_{hk}}\right)$ ve γ_y 'nin PDF'si $f\gamma_y(\gamma) = \frac{1}{P\Omega_{gk}} \exp\left(-\frac{\gamma}{P\Omega_{gk}}\right)$ şeklinde ifade edilir [51]. Burada, $\Omega_{hk} = \mathbb{E}(|h_k|^2)$ ve $\Omega_{gk} = \mathbb{E}(|g_k|^2)$ 'dir.

Burada, $M=N-1$, M adet Rayleigh dağılımının toplamı Gamma dağılımını ifade etmektedir. γ_R ve γ_J ifadelerinin PDF'si aşağıdaki gibi hesaplanır [51].

$$f\gamma_R(x) = \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^M \frac{x^{M-1}}{(M-1)!} \exp\left(-\frac{x}{P\Omega_h}\right) \text{ ve } f\gamma_J(x) = \left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^M \frac{x^{M-1}}{(M-1)!} \exp\left(-\frac{x}{P\Omega_g}\right)$$

Burada, $\Omega_h = \mathbb{E}(|h_i|^2)$ ve $\Omega_g = \mathbb{E}(|g_i|^2)$ ile ifade edilir. γ_x ifadesinin CDF'sini elde etmek için PDF ifadesinin 0'dan γ değerine göre integrali alındığında (A.5) ile ifade elde edilir.

$$F_{\gamma_x}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{P\Omega_{hk}}\right) \quad (\text{A.5})$$

(A.1)'de Y ifadesi $Y = \frac{\gamma_y}{\gamma_R + \gamma_J + 3}$ şeklinde yazılabilir. PDF ifadesini elde edebilmek için paydada bulunan iki rastgele değişkenin PDF ifadelerinin toplanması gerekmektedir. İki

PDF ifadesinin toplamı (A.6)'da ifade edildiği gibi onların konvolüsyonlarına eşittir [51].

$$f_{\gamma_R+\gamma_J}(\gamma) = \int_0^\gamma f_{\gamma_R}(x)f_{\gamma_J}(\gamma-x) dx \quad (\text{A.6})$$

f_{γ_R} ve f_{γ_J} ifadeleri (A.6)'da yerine yazıldığında (A.7) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned} f_{\gamma_R+\gamma_J}(\gamma) &= \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^M \left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^M \frac{1}{(M-1)!} \frac{1}{(M-1)!} \exp\left(\frac{-\gamma}{P\Omega_g}\right) \\ &\times \int_0^\gamma x^{M-1} (\gamma-x)^{M-1} \exp\left(\frac{-x}{P\Omega_h} + \frac{x}{P\Omega_g}\right) dx \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

(A.7) ifadesindeki integral, [82, Eq. (3.383.2)] yardımıyla çözülür ve (A.8) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} f_{\gamma_R+\gamma_J}(\gamma) &= \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^M \left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^M \frac{1}{(M-1)!} \frac{1}{(M-1)!} \exp\left(\frac{-\gamma}{P\Omega_g}\right) \\ &\times \left(\sqrt{\Pi} \left(\frac{\gamma}{\left(\frac{1}{P\Omega_g} - \frac{1}{P\Omega_h}\right)}\right)^{M-\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{\left(\frac{1}{P\Omega_g} - \frac{1}{P\Omega_h}\right)\gamma}{2}\right)\right) \\ &\times \Gamma(M) I_{M-\frac{1}{2}}\left(\frac{\left(\frac{1}{P\Omega_g} - \frac{1}{P\Omega_h}\right)\gamma}{2}\right) \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

(A.8) ifadesi $\Gamma(M) = (M-1)!$ ile sadeleştirilir ve (A.9) şeklinde ifade edilir.

$$\begin{aligned} f_{\gamma_R+\gamma_J}(\gamma) &= \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^M \left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^M \frac{1}{(M-1)!} \left(\sqrt{\Pi} \left(\frac{\gamma}{\left(\frac{1}{P\Omega_g} - \frac{1}{P\Omega_h}\right)}\right)^{M-\frac{1}{2}}\right) \\ &\times \exp\left(\frac{\left(\frac{1}{P\Omega_g} - \frac{1}{P\Omega_h}\right)\gamma}{2}\right) I_{M-\frac{1}{2}}\left(\frac{\left(\frac{1}{P\Omega_g} - \frac{1}{P\Omega_h}\right)\gamma}{2}\right) \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

(A.9) ifadesinin karmaşık formundan dolayı [51]'de verilen yaklaşım metodu kullanılarak ve i.i.d. durumu, $\Omega_h = \Omega_g = \Omega_f$, göz önüne alınarak (A.10) ifadesi elde edilir.

$$f_{\gamma_R+\gamma_J}(\gamma) = \left(\frac{1}{P\Omega_f}\right)^{2M} \frac{\gamma^{2M-1}}{(2M-1)!} \exp\left(\frac{-\gamma}{P\Omega_f}\right) \quad (\text{A.10})$$

Y ifadesinin, $\frac{f_{\gamma_y}}{f_{\gamma_R+\gamma_R}}$, PDF'ini elde etmek için bölme işlemi [83] yardımı ile (A.11) ile ifade edilir.

$$f_Y(\gamma) = \int_0^\infty (3+x) f_{\gamma_y}[(3+x)\gamma] f_{\gamma_R+\gamma_J}(x) dx \quad (\text{A.11})$$

(A.5) ve (A.10) ifadeleri (A.11)'de yerine yazıldığında (A.12) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
f_Y(\gamma) &= \int_0^\infty (3+x) f_{\gamma_y}[(3+x)\gamma] f_{\gamma_{R+\gamma_J}}(x) dx \\
&= \int_0^\infty 3f_{\gamma_y}[(3+x)\gamma] f_{\gamma_{R+\gamma_J}}(x) dx + \int_0^\infty x f_{\gamma_y}[(3+x)\gamma] f_{\gamma_{R+\gamma_J}}(x) dx \\
&= 3 \frac{1}{P\Omega_{gk}} \left(\frac{1}{P\Omega_f} \right)^{2M} \frac{1}{(2M-1)!} \exp\left(-\frac{3\gamma}{P\Omega_{gk}}\right) \int_0^\infty x^{2M-1} \exp\left(-\frac{(x)\gamma}{P\Omega_{gk}} - \frac{x}{P\Omega_f}\right) dx \\
&+ \frac{1}{P\Omega_{gk}} \left(\frac{1}{P\Omega_f} \right)^{2M} \frac{1}{(2M-1)!} \exp\left(-\frac{3\gamma}{P\Omega_{gk}}\right) \int_0^\infty x^{2M} \exp\left(-\frac{(x)\gamma}{P\Omega_{gk}} - \frac{x}{P\Omega_f}\right) dx
\end{aligned} \tag{A.12}$$

(A.12)'deki integral ifadesi, [82, Eq. (3.351.3)] yardımıyla çözümlenerek (A.13) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
f_Y(\gamma) &= \left[3 \frac{1}{P\Omega_{gk}} \left(\frac{P\Omega_{gk}/P\Omega_f}{\gamma + P\Omega_{gk}/P\Omega_f} \right)^{2M} + (2M) \left(\frac{(P\Omega_{gk}/P\Omega_f)^{2M}}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P\Omega_f)^{2M+1}} \right) \right] \\
&\times \exp\left(-\frac{3\gamma}{P\Omega_{gk}}\right)
\end{aligned} \tag{A.13}$$

[51] ve [83] yardımıyla, (A.13) ifadesinin CDF'si (A.14) ile ifade edilir.

$$F_Y(\gamma) = 1 - \left(\frac{(P\Omega_{gk}/P\Omega_f)^{2M}}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P\Omega_f)^{2M+1}} \right) \exp\left(-\frac{3\gamma}{P\Omega_{gk}}\right) \tag{A.14}$$

$F_X(\gamma)$, (A.5), ve $F_Y(\gamma)$, (A.14), ifadeleri (A.4)'te yerine yazıldığında $F_{\gamma_{X_k}}^{\text{ust}}$ ifadesi (A.15) ile elde edilir.

$$F_{\gamma_{X_k}}^{\text{ust}}(\gamma) = 1 - \left(\frac{(P\Omega_{gk}/P\Omega_f)^{2M}}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P\Omega_f)^{2M+1}} \right) \exp\left(-\gamma \left(\frac{1}{P\Omega_{hk}} + \frac{3}{P\Omega_{gk}} \right)\right) \tag{A.15}$$

Benzer şekilde, $F_{\gamma_{Y_k}}^{\text{ust}}(\gamma)$ ifadesini hesaplamak için (A.2)'deki V ifadesinin PDF'si (A.16) ile hesaplanır.

$$\begin{aligned}
f_V(\gamma) &= \left[3 \frac{1}{P\Omega_{hk}} \left(\frac{P\Omega_{hk}/P\Omega_f}{\gamma + P\Omega_{hk}/P\Omega_f} \right)^{2M} + (2M) \left(\frac{(P\Omega_{hk}/P\Omega_f)^{2M}}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P\Omega_f)^{2M+1}} \right) \right] \\
&\times \exp\left(-\frac{3\gamma}{P\Omega_{hk}}\right)
\end{aligned} \tag{A.16}$$

[51] ve [83] yardımıyla, F_V ifadesi (A.17) ile hesaplanır.

$$F_V(\gamma) = 1 - \left(\frac{(P\Omega_{hk}/P\Omega_f)^{2M}}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P\Omega_f)^{2M+1}} \right) \exp\left(-\frac{3\gamma}{P\Omega_{hk}}\right) \tag{A.17}$$

F_U ifadesi (A.18) ile hesaplanır.

$$F_U(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{P\Omega_{gk}}\right) \quad (\text{A.18})$$

$F_U(\gamma)$ ve $F_V(\gamma)$ ifadeleri (A.4)'te yerine yazıldığında $\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}$ ifadesinin CDF'i (A.19) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \left(\frac{((P\Omega_{hk})/P\Omega_f)^{2M}}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P\Omega_f)^{2M+1}}\right) \exp\left(-\gamma\left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{3}{P\Omega_{hk}}\right)\right) \quad (\text{A.19})$$

A.2. FEKS Metodunda $F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}$ ve $F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}$ İfadelerinin Hesaplaması

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{\text{ust}} = \min\left(\frac{P|g_k|^2}{2}, P|h_k|^2\right) = \min(A, B) \quad (\text{A.20})$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} = \min\left(\frac{P|h_k|^2}{2}, P|g_k|^2\right) = \min(C, D) \quad (\text{A.21})$$

$|h_k|^2$ ve $|g_k|^2$ ifadeleri Rayleigh dağılımına sahip olduğu için, $\frac{P|g_k|^2}{2}$ ve $P|h_k|^2$ ifadelerinin PDF'i (A.22) ve (A.23) ile hesaplanır.

$$f_{|g_k|^2}(x) = \frac{2}{P\Omega_{gk}} \exp\left(\frac{-2x}{P\Omega_{gk}}\right) \quad (\text{A.22})$$

$$f_{|h_k|^2}(x) = \frac{1}{P\Omega_{hk}} \exp\left(\frac{-x}{P\Omega_{hk}}\right) \quad (\text{A.23})$$

(A.22) ve (A.23) ifadelerinin 0'dan γ değerine integrali alındığında (A.24) ve (A.25) ifadeleri elde edilir.

$$F_A(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{2\gamma}{P\Omega_{gk}}\right) \quad (\text{A.24})$$

$$F_B(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{P\Omega_{hk}}\right) \quad (\text{A.25})$$

A ve B , (A.20), ifadeleri birbirinden bağımsız olduğu için $\gamma_{X_k}^{\text{ust}}$ ifadesi (A.26) ve (A.27) ile ifade edilebilir.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - P_r(A > \gamma, B > \gamma) \quad (\text{A.26})$$

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - (1 - F_A(\gamma))(1 - F_B(\gamma)) \quad (\text{A.27})$$

(A.24) ve (A.25) ifadeleri (A.27)'de yerine yazıldığında $F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}$ ifadesi (A.28) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma\left(\frac{1}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}}\right)\right) \quad (\text{A.28})$$

Benzer şekilde, $F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}$ ifadesi (A.29) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma\left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}}\right)\right) \quad (\text{A.29})$$

A.3. AAİ Modeli İçin TK İfadesinin $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ İfadesine Dönüştürülmesi

Logaritmik ifadelerin özelliklerinden faydalanılarak ve [78] yardımıyla AAİ modelindeki toplam kapasite ifadesi (A.30)'da ifade edildiği gibi $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ ifadesine dönüştürülür.

$$\begin{aligned} TK_{(\text{AAI})} &= \left[\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \log_2(1 + \gamma_{X_k}) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \log_2(1 + \gamma_{Y_k}) \right] \leq R \\ &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N [\log_2(1 + \gamma_{X_k})(1 + \gamma_{Y_k})] \leq R \\ R &\approx \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} [\log_2(1 + 2\sqrt{\gamma_{X_k}\gamma_{Y_k}} + \gamma_{X_k}\gamma_{Y_k})] \\ &= \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} [\log_2(1 + \sqrt{\gamma_{X_k}\gamma_{Y_k}})^2] \leq R \\ &= \sum_{k=1}^N \left[\log_2\left(1 + \frac{2\gamma_{X_k}\gamma_{Y_k}}{\gamma_{X_k} + \gamma_{Y_k}}\right) \right] \leq R \\ &= \sum_{k=1}^N \left[\log_2\left(1 + \frac{2}{\frac{1}{\gamma_{X_k}} + \frac{1}{\gamma_{Y_k}}}\right) \right] \leq R \\ &= \prod_{k=1}^N \left[1 + \underbrace{\left(\frac{2}{\frac{1}{\gamma_{X_k}} + \frac{1}{\gamma_{Y_k}}}\right)}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}} \right] \leq \underbrace{2^R}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}} \\ &= \left[1 + \underbrace{\left(\frac{2}{\frac{1}{\gamma_{X_k}} + \frac{1}{\gamma_{Y_k}}}\right)}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}} \right]^N \leq \underbrace{2^R}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}} \\ &= \underbrace{\left[\left(\frac{\gamma_{X_k}\gamma_{Y_k}}{\gamma_{X_k} + \gamma_{Y_k}}\right) \right]}_{\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})} \leq \underbrace{\frac{2^{\frac{R}{N}} - 1}{2}}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}} \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

A.4. $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ İfadelerinin CDF Hesaplaması

$$\begin{aligned}
F_{AAI}(\gamma_{th}^{TK}) &= \left(\min(\gamma_{X_k}^{ust}, \gamma_{Y_k}^{ust}) \leq \underbrace{\frac{2^{\frac{R}{N}} - 1}{2}}_{\gamma_{th}^{TK}} \right) \\
&= 1 - P_r(\gamma_{X_k}^{ust} \geq \gamma_{th}^{TK}, \gamma_{Y_k}^{ust} \geq \gamma_{th}^{TK}) \\
&= 1 - P_r\left(\min\left(\gamma_{x_k}, \frac{\gamma_{y_k}}{\gamma_R + \gamma_J + 3}\right) \geq \gamma_{th}^{TK}, \left(\gamma_{y_k}, \frac{\gamma_{x_k}}{\gamma_R + \gamma_J + 3} \geq \gamma_{th}^{TK}\right)\right) \\
&= 1 - \mathbb{E}_{\gamma_R, \gamma_J} \left[P_r(\gamma_{x_k} \geq \gamma_{th}^{TK}(\gamma_R + \gamma_J + 3), \gamma_{y_k} \geq \gamma_{th}^{TK}(\gamma_R + \gamma_J + 3)) | \gamma_R, \gamma_J \right] \\
&= 1 - \mathbb{E}_{\gamma_R, \gamma_J} \left[e^{-\frac{\gamma_{th}^{TK}(\gamma_R + \gamma_J + 3)}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{th}^{TK}(\gamma_R + \gamma_J + 3)}{P\Omega_{gk}}} \right] \\
&= 1 - \mathbb{E}_{\gamma_R} \left[e^{-\frac{\gamma_{th}^{TK}(\gamma_R + 3)}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{th}^{TK}(\gamma_R + 3)}{P\Omega_{gk}}} f_{\gamma_R}(\gamma_R) d\gamma_R \right] \mathbb{E}_{\gamma_J} \left[e^{-\frac{\gamma_{th}^{TK}(\gamma_J)}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{th}^{TK}(\gamma_J)}{P\Omega_{gk}}} f_{\gamma_J}(\gamma_J) d\gamma_J \right] \\
&= 1 - \left[e^{-\frac{3\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} - \frac{3\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}}} \int_0^\infty e^{-\gamma_R \left(-\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}}\right)} f_{\gamma_R}(\gamma_R) d\gamma_R \right] \\
&\quad \times \left[\int_0^\infty e^{-\gamma_J \left(-\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}}\right)} f_{\gamma_J}(\gamma_J) d\gamma_J \right] \\
&= 1 - \left[e^{\left(-\frac{3\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} - \frac{3\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}}\right)} \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^{N-1} \frac{1}{(N-2)!} \int_0^\infty e^{-\gamma_R \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h}\right)} (\gamma_R)^{N-2} d\gamma_R \right] \\
&\quad \times \left[\left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^{N-1} \frac{1}{(N-2)!} \int_0^\infty e^{-\gamma_J \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g}\right)} (\gamma_J)^{N-2} d\gamma_J \right] \\
&= 1 - \left[e^{\left(-\frac{3\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} - \frac{3\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}}\right)} \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h}\right)^{1-N} \right] \\
&\quad \times \left[\left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g}\right)^{1-N} \right] \\
&= 1 - \left[\left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h}\right)^{1-N} \right. \\
&\quad \left. \times \left(\frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{TK}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g}\right)^{1-N} e^{-\gamma_{th}^{TK} \left(\frac{3}{P\Omega_{hk}} + \frac{3}{P\Omega_{gk}}\right)} \right] \tag{A.31}
\end{aligned}$$

A.5. FEKS Metodu İçin TK İfadesinin HO İfadesine Dönüştürülmesi

Logaritmik ifadelerin özelliklerinden faydalanılarak ve [78] yardımıyla FEKS metodunda kullanılan toplam kapasite ifadesi (A.32)'de ifade edildiği gibi HO problemine dönüştürülür.

$$\begin{aligned}
\text{TK}_{\text{FEKS}} &= \left[\frac{1}{2N} \log_2 (1 + \gamma_{X_k}) + \frac{1}{2N} \log_2 (1 + \gamma_{Y_k}) \right] \leq R \\
&= \frac{1}{2N} [\log_2 (1 + \gamma_{X_k}) (1 + \gamma_{Y_k})] \leq R \\
&= R \approx \frac{1}{2N} [\log_2 (1 + 2\sqrt{\gamma_{X_k} \gamma_{Y_k}} + \gamma_{X_k} \gamma_{Y_k})] \\
&= \frac{1}{2N} [\log_2 (1 + \sqrt{\gamma_{X_k} \gamma_{Y_k}})^2] \leq R \\
&= \left[\log_2 \left(1 + \frac{2\gamma_{X_k} \gamma_{Y_k}}{\gamma_{X_k} + \gamma_{Y_k}} \right) \right] \leq NR \\
&= \left[\log_2 \left(1 + \frac{2}{\frac{1}{\gamma_{X_k}} + \frac{1}{\gamma_{Y_k}}} \right) \right] \leq NR \\
&= \left[\left(\frac{2}{\frac{1}{\gamma_{X_k}} + \frac{1}{\gamma_{Y_k}}} \right) \right] \leq \underbrace{2^{NR} - 1}_{\gamma_{\text{th}}} \tag{A.32}
\end{aligned}$$

B. EK-2.

B.1. GBG Durumunda $\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}})$ İfadesinin CDF Hesabı

$$\begin{aligned}
F_{\text{AAI}}^{(\text{GBG})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) &= \left(\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}}) \leq \underbrace{\frac{2^{\frac{R}{N}} - 1}{2}}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}} \right) \\
&= 1 - P_r(\gamma_{X_k}^{\text{ust}} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) \\
&= 1 - P_r \left(\min \left(\frac{\gamma_x \rho_{\text{fk}}^2}{\left[\frac{P(1-\rho_{\text{fk}}^2) \sigma_{\varepsilon_{\text{hk}}}^2}{N_0} \right]}, \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \frac{\gamma_y \rho_{\text{fk}}^2}{\left[\frac{4P(1-\rho_{\text{fk}}^2) \sigma_{\varepsilon_{\text{hk}}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{\text{fk}}^2) \sigma_{\varepsilon_{\text{gk}}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{\text{fi}}^2 + \gamma_B \rho_{\text{fi}}^2 + \frac{P(1-\rho_{\text{fi}}^2) \sigma_{\varepsilon_{\text{B}}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{\text{fi}}^2) \sigma_{\varepsilon_{\text{A}}}^2}{N_0} + 1 \right]} \right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}, \right. \\
&\quad \left. \min \left(\frac{\gamma_x \rho_{\text{fk}}^2}{\left[\frac{4P(1-\rho_{\text{fk}}^2) \sigma_{\varepsilon_{\text{gk}}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{\text{fk}}^2) \sigma_{\varepsilon_{\text{hk}}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{\text{fi}}^2 + \gamma_B \rho_{\text{fi}}^2 + \frac{P(1-\rho_{\text{fi}}^2) \sigma_{\varepsilon_{\text{B}}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{\text{fi}}^2) \sigma_{\varepsilon_{\text{A}}}^2}{N_0} + 1 \right]} \right), \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \left. \left. \left. \left. \frac{\gamma_y \rho_{fk}^2}{\left[\frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} \right]} \right) \right) \right) \right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \right) \\
& = 1 - \mathbb{E}_{\gamma_A, \gamma_B} \left[P_r \left(\gamma_x \rho_{fk}^2 \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{fi}^2 \right. \right. \right. \\
& \quad \left. \left. \left. + \gamma_B \rho_{fi}^2 + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right] \right) \right], \\
& \gamma_{yk} \rho_{fk}^2 \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{fi}^2 \right. \\
& \quad \left. \left. + \gamma_B \rho_{fi}^2 + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right] \mid \gamma_A, \gamma_B \right] \\
& = 1 - \mathbb{E}_{\gamma_A, \gamma_B} \left[\rho_{fk}^4 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{fi}^2 + \gamma_B \rho_{fi}^2 + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}} \right. \\
& \quad \left. \times e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{fi}^2 + \gamma_B \rho_{fi}^2 + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} \right] \\
& = 1 - \mathbb{E}_{\gamma_A} \left[\rho_{fk}^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{fi}^2 + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}} \right. \\
& \quad \left. \times e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_{fi}^2 + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} f_{\gamma_A}(\gamma_A) d_{\gamma_A} \right] \\
& \times \mathbb{E}_{\gamma_B} \left[\rho_{fk}^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\gamma_B \rho_{fi}^2 + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{hk}}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\gamma_B \rho_{fi}^2 + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{gk}}} f_{\gamma_B}(\gamma_B) d_{\gamma_B} \right] \\
& = 1 - \left[\rho_{fk}^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}} \right. \\
& \quad \left. \times e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} \int_0^\infty e^{-\gamma_A \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} \right)} f_{\gamma_A}(\gamma_A) d_{\gamma_A} \right] \\
& \quad \times \left[\rho_{fk}^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{hk}}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{gk}}} \int_0^\infty e^{-\gamma_B \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} \right)} f_{\gamma_B}(\gamma_B) d_{\gamma_B} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 1 - \left[\rho_{fk}^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}} \right. \\
&\times e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} \\
&\times \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \frac{1}{(N-2)!} \int_0^\infty e^{-\gamma_A \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)} \gamma_A^{N-2} d\gamma_A \Big] \\
&\times \left[\rho_{fk}^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{hk}}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{gk}} \right] \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \frac{1}{(N-2)!} \\
&\times \int_0^\infty e^{-\gamma_B \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)} \gamma_B^{N-2} d\gamma_B \Big] \\
&= 1 - \left[\rho_{fk}^4 \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right. \\
&\times \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_{fi}^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N} \\
&\times e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}} \\
&\times e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fk}^2)\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_A}^2}{N_0} + \frac{P(1-\rho_{fi}^2)\sigma_{\varepsilon_B}^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} \Big] \tag{B.1}
\end{aligned}$$

Burada, $\Omega_{hk} = \mathbb{E}(|\hat{h}_k|^2)$, $\Omega_{gk} = \mathbb{E}(|\hat{g}_k|^2)$, $\Omega_h = \mathbb{E}(|\hat{h}_i|^2)$ ve $\Omega_g = \mathbb{E}(|\hat{g}_i|^2)$ 'dir.

B.2. KKH Durumunda $\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}})$ İfadesinin CDF Hesabı

$$\begin{aligned}
F_{\text{AAI}}^{(\text{KKH})}(\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) &= \left(\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}}) \leq \underbrace{\frac{2^{\frac{R}{N}} - 1}{2}}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}} \right) \\
&= 1 - P_r(\gamma_{X_k}^{\text{ust}} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) \\
&= 1 - P_r \left(\min \left(\frac{\gamma_x \rho_e^2}{\left[\frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} \right]}, \frac{\gamma_y \rho_e^2}{\left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]} \right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \min \left(\frac{\gamma_x \rho_e^2}{\left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}, \frac{\gamma_y \rho_e^2}{\left[\frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} \right]} \right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \\
& = 1 - \mathbb{E}_{\gamma_A, \gamma_B} \left[P_r \left(\gamma_{x_k} \rho_e^2 \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} \right. \right. \right. \\
& \quad \left. \left. \left. + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right] \right), \right. \\
& \quad \left. \gamma_{y_k} \rho_e^2 \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right] \mid \gamma_A, \gamma_B \right] \\
& = 1 - \mathbb{E}_{\gamma_A, \gamma_B} \left[\rho_e^4 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}} \right. \\
& \quad \left. \times e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} \right] \\
& = 1 - \mathbb{E}_{\gamma_A} \left[\rho_e^2 e^{-\frac{-\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \gamma_A \rho_e^2 + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} f_{\gamma_A}(\gamma_A) d\gamma_A \right] \\
& \quad \times \mathbb{E}_{\gamma_B} \left[\rho_e^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{hk}}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\gamma_B \rho_e^2 + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{gk}}} f_{\gamma_B}(\gamma_B) d\gamma_B \right] \\
& = 1 - \left[\rho_e^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} \right. \\
& \quad \times \int_0^\infty e^{\gamma_A \left(-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} \right)} f_{\gamma_A}(\gamma_A) d\gamma_A \\
& \quad \times \left[\rho_e^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{P\sigma_B^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{hk}}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{P\sigma_B^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{gk}}} \int_0^\infty e^{\gamma_B \left(-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} \right)} f_{\gamma_B}(\gamma_B) d\gamma_B \right] \\
& = 1 - \left[\rho_e^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} \right. \\
& \quad \times \left. \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \frac{1}{(N-2)!} \int_0^\infty e^{-\gamma_A \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)} (\gamma_A)^{N-2} d\gamma_A \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\rho_e^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{P\sigma_B^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{P\sigma_B^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{gk}}} \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \frac{1}{(N-2)!} \right. \\
& \times \left. \int_0^\infty e^{-\gamma_B \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)} (\gamma_B)^{N-2} d\gamma_B \right] \\
& = 1 - \left[\left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right. \\
& \times \left. \rho_e^2 e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} \right] \\
& \times \left[\rho_e^2 \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N} e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{P\sigma_B^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{P\sigma_B^2}{N_0} \right]}{P\Omega_{gk}}} \right] \\
& = 1 - \left[\rho_e^4 \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right. \\
& \times \left. \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \rho_e^2}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N} \right. \\
& \times \left. e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left[\frac{4P\sigma_{\varepsilon_{hk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_{\varepsilon_{gk}}^2}{N_0} + \frac{P\sigma_A^2}{N_0} + \frac{P\sigma_B^2}{N_0} + 1 \right]}{P\Omega_{gk}}} \right] \tag{B.2}
\end{aligned}$$

B.3. FEKS Metodunda KKH Durumunda $F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}$ ve $F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}$ İfadelerinin Hesaplaması

(3.125) ifadesi (B.3) ile tekrardan yazılırsa,

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{\text{ust}} = \min \left(|\hat{h}_k|^2 A, |\hat{g}_k|^2 B \right) = \min \left(\gamma_{h_k}^{x_k}, \gamma_{g_k}^{x_k} \right) \tag{B.3}$$

$|\hat{h}_k|^2$ ve $|\hat{g}_k|^2$ ifadeleri Rayleigh dağılımına sahip olduğu için $|\hat{h}_k|^2 A$ ve $|\hat{g}_k|^2 B$ ifadelerinin PDF ifadeleri (B.4) ve (B.5) ile hesaplanır.

$$f_{A|\hat{h}_k|^2}(x) = \frac{1}{A\Omega_{hk}} \exp \left(\frac{-x}{A\Omega_{hk}} \right) \tag{B.4}$$

$$f_{B|\hat{g}_k|^2}(x) = \frac{1}{B\Omega_{gk}} \exp \left(\frac{-x}{B\Omega_{gk}} \right) \tag{B.5}$$

(B.4) ve (B.5) ifadelerinin 0'dan γ değerine integrali alındığında (B.6) ve (B.7) ifadeleri elde edilir.

$$F_{\gamma_{hk}^{ust}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{A\Omega_{hk}}\right) \quad (B.6)$$

$$F_{\gamma_{gk}^{ust}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{B\Omega_{gk}}\right) \quad (B.7)$$

(B.3) ifadesindeki terimler, γ_{hk}^{ust} ve γ_{gk}^{ust} , birbirinden bağımsız olduğu için $\gamma_{X_k}^{ust}$ ifadesi (B.8) ve (B.9) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{X_k}^{ust}}(\gamma) = 1 - P_r\left(\gamma_h^{X_k} > \gamma, \gamma_g^{Y_k} > \gamma\right) \quad (B.8)$$

$$F_{\gamma_{X_k}^{ust}}(\gamma) = 1 - (1 - F_{\gamma_{hk}^{ust}}(\gamma))(1 - F_{\gamma_{gk}^{ust}}(\gamma)) \quad (B.9)$$

(B.6) ve (B.7) ifadesi (B.9)'da yerine yazıldığında $F_{\gamma_{X_k}^{ust}}$ ifadesi (B.10) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{X_k}^{ust}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma\left(\frac{1}{A\Omega_{hk}} + \frac{1}{B\Omega_{gk}}\right)\right) \quad (B.10)$$

Benzer şekilde, $F_{\gamma_{Y_k}^{ust}}$ ifadesi (B.11) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{Y_k}^{ust}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma\left(\frac{1}{C\Omega_{hk}} + \frac{1}{D\Omega_{gk}}\right)\right) \quad (B.11)$$

B.4. FEKS Metodunda GBG Durumunda $F_{\gamma_{X_k}^{ust}}$ ve $F_{\gamma_{Y_k}^{ust}}$ İfadelerinin Hesaplaması

(3.119) ve (3.120) ifadeleri (B.12) ve (B.13) ile tekrardan yazılırsa,

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{ust} = \min\left(|\hat{h}_k|^2 E, |\hat{g}_k|^2 F\right) = \min\left(\gamma_{hk}^{X_k}, \gamma_{gk}^{X_k}\right) \quad (B.12)$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{ust} = \min\left(|\hat{h}_k|^2 J, |\hat{g}_k|^2 L\right) = \min\left(\gamma_{hk}^{Y_k}, \gamma_{gk}^{Y_k}\right) \quad (B.13)$$

Bölüm B.3'te, KKH durumunda kullanılan yöntemler vasıtasıyla $\gamma_{X_k}^{ust}$ ve $\gamma_{Y_k}^{ust}$ ifadelerinin CDF'leri sırasıyla (B.14) ve (B.15)'teki gibi hesaplanır.

$$F_{\gamma_{X_k}^{ust}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma\left(\frac{1}{E\Omega_{hk}} + \frac{1}{F\Omega_{gk}}\right)\right) \quad (B.14)$$

$$F_{\gamma_{Y_k}^{ust}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma\left(\frac{1}{J\Omega_{hk}} + \frac{1}{L\Omega_{gk}}\right)\right) \quad (B.15)$$

C. EK-3.

C.1. Dış Kaynaklı Etkileşimler Etkisinde AAİ Modelinde $F_{\gamma_{X_k}}^{\text{ust}}$ ve $F_{\gamma_{Y_k}}^{\text{ust}}$ İfadelerinin Hesaplaması

γ_{X_k} ve γ_{Y_k} ifadelerinin üst-sınır değerleri (C.1) ve (C.2) ile gösterilir.

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{\text{ust}} = \min \left(\frac{\gamma_x}{\gamma_D}, \frac{\gamma_y}{(\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_D)} \right) = \min(X, Y) \quad (\text{C.1})$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} = \min \left(\frac{\gamma_y}{\gamma_E}, \frac{\gamma_x}{(\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_E)} \right) = \min(U, V) \quad (\text{C.2})$$

Burada, $\underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^{N-1} \gamma_{x_i} + 1}_{\gamma_R} = \gamma_A$; $\underbrace{\sum_{i=1, i \neq k}^{N-1} \gamma_{y_i} + 1}_{\gamma_J} = \gamma_B$; $\underbrace{\sum_{j=1}^M \gamma_{f_j} + 1}_{\gamma_K} = \gamma_C$; $\underbrace{\sum_{j=1}^M \gamma_{z_j} + 1}_{\gamma_L} = \gamma_D$;

$\underbrace{\sum_{j=1}^M \gamma_{t_j} + 1}_{\gamma_S} = \gamma_E$ 'dir.

X ve Y ifadeleri, (C.1), $X = \frac{\gamma_x}{\gamma_D} = \frac{\gamma_x}{\gamma_S + 1}$, $Y = \frac{\gamma_y}{\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_D} = \frac{\gamma_y}{\gamma_R + \gamma_J + \gamma_K + \gamma_L + 4}$ şeklinde ifade edilir.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}} = 1 - P_r(\gamma_X > \gamma, \gamma_Y > \gamma) \quad (\text{C.3})$$

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}} \approx 1 - P_r(1 - F_X(\gamma))(1 - F_Y(\gamma)) \quad (\text{C.4})$$

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}} \approx 1 - P_r(1 - F_U(\gamma))(1 - F_V(\gamma)) \quad (\text{C.5})$$

γ_x ifadesinin PDF'si, $f_{\gamma_x}(\gamma) = \frac{1}{P\Omega_{hk}} \exp\left(-\frac{\gamma}{P\Omega_{hk}}\right)$ ve γ_y ifadesinin PDF'si $f_{\gamma_y}(\gamma) = \frac{1}{P\Omega_{gk}} \exp\left(-\frac{\gamma}{P\Omega_{gk}}\right)$ şeklinde ifade edilir [51]. Burada, $\Omega_{hk} = \mathbb{E}(|h_k|^2)$ ve $\Omega_{gk} = \mathbb{E}(|g_k|^2)$

γ_R ; γ_J ; γ_K ; γ_L ve γ_M ifadelerinin PDF'leri aşağıdaki gibi ifade edilir [51].

$$f_{\gamma_R}(x) = \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^{N-1} \frac{x^{N-2}}{(N-2)!} \exp\left(-\frac{x}{P\Omega_h}\right)$$

$$f_{\gamma_J}(x) = \left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^{N-1} \frac{x^{N-2}}{(N-2)!} \exp\left(-\frac{x}{P\Omega_g}\right)$$

$$f_{\gamma_K}(x) = \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)^M \frac{x^{M-1}}{(M-1)!} \exp\left(-\frac{x}{P_{er}\Omega_f}\right)$$

$$f_{\gamma_L}(x) = \left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z}\right)^M \frac{x^{M-1}}{(M-1)!} \exp\left(-\frac{x}{P_{es1}\Omega_z}\right)$$

$$f_{\gamma_S}(x) = \left(\frac{1}{P_{es2}\Omega_t}\right)^M \frac{x^{M-1}}{(M-1)!} \exp\left(-\frac{x}{P_{es2}\Omega_t}\right)$$

Burada, $\Omega_h = \mathbb{E}(|h_i|^2)$, $\Omega_g = \mathbb{E}(|g_i|^2)$, $\Omega_f = \mathbb{E}(|f_j|^2)$, $\Omega_z = \mathbb{E}(|z_j|^2)$, $\Omega_t = \mathbb{E}(|t_j|^2)$ dir.

$X = \frac{\gamma_x}{\gamma_L}$, (C.1), ifadesinin PDF'ini hesaplayabilmek için [83] yardımıyla (C.7) ile ifade edilir. f_{γ_x} ve f_{γ_L} ifadeleri (C.6)'da yerine yazıldığında (C.7) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
 f_X(\gamma) &= \int_0^\infty (1+x) f_{\gamma_x}[(1+x)\gamma] f_{\gamma_L}(x) dx \\
 &= \int_0^\infty f_{\gamma_x}[(1+x)\gamma] f_{\gamma_L}(x) dx + \int_0^\infty x f_{\gamma_x}[(1+x)\gamma] f_{\gamma_L}(x) dx \quad (C.6) \\
 &= \frac{1}{P\Omega_{hk}} \left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)^M \frac{1}{(M-1)!} \exp\left(\frac{-\gamma}{P\Omega_{hk}}\right) \int_0^\infty x^{M-1} \exp\left(-\frac{(x)\gamma}{P\Omega_{hk}} - \frac{x}{P_{es1}\Omega_z}\right) dx \\
 &+ \frac{1}{P\Omega_{hk}} \left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)^M \frac{1}{(M-1)!} \exp\left(\frac{-\gamma}{P\Omega_{hk}}\right) \int_0^\infty x^M \exp\left(-\frac{(x)\gamma}{P\Omega_{hk}} - \frac{x}{P_{es1}\Omega_z}\right) dx \quad (C.7)
 \end{aligned}$$

(C.7)'deki integral ifadesi [82, Eq. (3.351.3)] yardımıyla çözüldüğünde PDF gösterilimi (C.8) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 f_X(\gamma) &= \left[\frac{1}{P\Omega_{hk}} \left(\frac{P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z)} \right)^M + \frac{M(P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z)^M}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z)^{M+1}} \right] \\
 &\times \exp\left(\frac{-\gamma}{P\Omega_{hk}}\right) \quad (C.8)
 \end{aligned}$$

[51] ve [83] yardımıyla f_X , (C.8), ifadesinin CDF'i (C.9) ile gösterilir.

$$F_X(\gamma) = 1 - \left(\frac{P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z)} \right)^M \exp\left(\frac{-\gamma}{P\Omega_{hk}}\right) \quad (C.9)$$

Benzer şekilde U , (C.2), ifadesinin PDF'i, $f_U = \frac{f_{\gamma_y}}{f_{\gamma_E}}$, (C.10) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 f_U(\gamma) &= \left[\frac{1}{P\Omega_{gk}} \left(\frac{P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t)} \right)^M + \frac{M(P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t)^M}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t)^{M+1}} \right] \exp\left(\frac{-\gamma}{P\Omega_{gk}}\right) \quad (C.10)
 \end{aligned}$$

[51] ve [83] yardımıyla f_U , (C.10), ifadesinin CDF'i (C.11) ile ifade edilir.

$$F_U(\gamma) = 1 - \left(\frac{P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t)} \right)^M \exp\left(\frac{-\gamma}{P\Omega_{gk}}\right) \quad (C.11)$$

$Y = \frac{\gamma_y}{\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_D}$, (C.1), ifadesinin PDF'ini hesaplayabilmek için payda ifadesi dört adet gamma dağılımına sahip rastgele değişkene sahiptir. İlk olarak birinci ve ikinci ifadeleri toplayıp daha sonra üçüncü ve dördüncü ifadeler toplanması gerekmektedir. Toplama işlemi (C.12) ile gösterildiği gibi konvolüsyon işlemine karşılık gelmektedir [51].

$$f_{\gamma_R + \gamma_J}(\gamma) = \int_0^\gamma f_{\gamma_R}(x) f_{\gamma_J}(\gamma - x) dx \quad (C.12)$$

f_{γ_R} ve f_{γ_J} ifadeleri (C.12)'de yerine yazıldığında (C.13) ifadesi elde edilir.

$$f_{\gamma_R+\gamma_J}(\gamma) = \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^{N-1} \frac{1}{(N-2)!} \frac{1}{(N-2)!} \exp\left(\frac{-\gamma}{P\Omega_g}\right) \\ \times \int_0^\gamma x^{N-2} (\gamma-x)^{N-2} \exp\left(\frac{-x}{P\Omega_h} + \frac{x}{P\Omega_g}\right) dx \quad (\text{C.13})$$

(C.13)'teki integral ifadesi [82, Eq. (3.383.2¹¹)] yardımıyla çözüldüğünde (C.14) ifadesi elde edilir.

$$f_{\gamma_R+\gamma_J}(\gamma) = \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^{N-1} \left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^{N-1} \frac{(N-1)}{(N-2)!} \\ \times \left(\sqrt{\Pi} \left(\frac{\gamma}{\left(\frac{1}{P\Omega_g} - \frac{1}{P\Omega_h}\right)}\right)^{N-\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{\left(\frac{1}{P\Omega_g} - \frac{1}{P\Omega_h}\right)\gamma}{2}\right)\right) \\ \times I_{N-\frac{1}{2}}\left(\frac{\left(\frac{1}{P\Omega_g} - \frac{1}{P\Omega_h}\right)\gamma}{2}\right) \quad (\text{C.14})$$

(C.14) ifadesinin karmaşık formda olmasından dolayı iki gamma dağılımına sahip rasgele değişkenin toplamında [51] ifadesinde kullanılan kapalı-form (closed-form) ifadesi kullanılmaktadır. Bu durum (C.15) ile ifade edilir. Burada $L = N - 1$ ile gösterilmiştir.

$$f_{\gamma_R+\gamma_J}(\gamma) = \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^L \left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^L \frac{\gamma^{2L-1}}{(L-1)!(L-1)!} \exp\left(\frac{-\gamma}{P\Omega_g}\right) \quad (\text{C.15})$$

Benzer şekilde, $f_{\gamma_K+\gamma_L}$ ifadesi (C.16) ile ifade edilir.

$$f_{\gamma_K+\gamma_L}(\gamma) = \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)^M \left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z}\right)^M \frac{\gamma^{2M-1}}{(M-1)!(M-1)!} \exp\left(\frac{-\gamma}{P_{es1}\Omega_z}\right) \quad (\text{C.16})$$

Son toplamda, $f_{\gamma_T} = f_{\gamma_R+\gamma_J} + f_{\gamma_K+\gamma_L}$, ifadesi kapalı-formda (C.17) ile ifade edilir.

$$f_{\gamma_T}(\gamma) = \left(\frac{1}{P\Omega_h}\right)^L \left(\frac{1}{P\Omega_g}\right)^L \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)^M \left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z}\right)^M \\ \times \frac{\gamma^{2M+2L-1}}{(L-1)!(L-1)!(M-1)!(M-1)!} \exp\left(\frac{-\gamma}{P_{es1}\Omega_z}\right) \quad (\text{C.17})$$

f_{γ_y} ve f_{γ_T} ifadeleri (C.18)'te yerine yazıldığında f_{γ_Y} , (C.19) ile ifade edilir.

$$f_Y(\gamma) = \int_0^\infty (4+x) f_{\gamma_y}[(4+x)\gamma] f_{\gamma_T}(x) dx \quad (\text{C.18})$$

$$f_Y(\gamma) = \left[\left[4 \frac{1}{P\Omega_{gk}} \left(\frac{\left((P\Omega_{gk})^{2M+2L} / (P_{es1}\Omega_z)^M \right)}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es1}\Omega_z)^{2M+2L}} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + (2M+2L) \left(\frac{\left((P\Omega_{gk})^{2M+2L} / (P_{es1}\Omega_z)^M \right)}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es1}\Omega_z)^{2M+2L+1}} \right) \right] \right] \\ \times \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^L \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^L \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \exp\left(-\frac{4\gamma}{P\Omega_{gk}}\right) \quad (\text{C.19})$$

[51] ve [83] yardımıyla f_Y ifadesinin CDF'i (C.20) ile ifade edilir.

$$F_Y(\gamma) = 1 - \left(\frac{\left((P\Omega_{gk})^{2M+2L} / (P_{es1}\Omega_z)^M \right)}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es1}\Omega_z)^{2M+2L}} \right) \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^L \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^L \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \\ \times \exp\left(-\frac{4\gamma}{P\Omega_{gk}}\right) \quad (\text{C.20})$$

Benzer şekilde, V ifadesi için (C.2), $f_V = \frac{f_{\gamma_y}}{f_{\gamma_R} + f_{\gamma_J} + f_{\gamma_K} + f_{\gamma_S}}$, (C.21) ile ifade edilir.

$$f_V(\gamma) = \left[\left[4 \frac{1}{P\Omega_{hk}} \left(\frac{\left((P\Omega_{hk})^{2M+2L} / (P_{es2}\Omega_t)^M \right)}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es2}\Omega_t)^{2M+2L}} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + (2M+2L) \left(\frac{\left((P\Omega_{hk})^{2M+2L} / (P_{es2}\Omega_t)^M \right)}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es2}\Omega_t)^{2M+2L+1}} \right) \right] \right] \\ \times \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^L \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^L \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \exp\left(-\frac{4\gamma}{P\Omega_{hk}}\right) \quad (\text{C.21})$$

[51] ve [83] yardımıyla f_V , (C.21), ifadesinin CDF'i (C.22) ile ifade edilir.

$$F_V(\gamma) = 1 - \left(\frac{\left((P\Omega_{hk})^{2M+2L} / (P_{es2}\Omega_t)^M \right)}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es2}\Omega_t)^{2M+2L}} \right) \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^L \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^L \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \\ \times \exp\left(-\frac{4\gamma}{P\Omega_{hk}}\right) \quad (\text{C.22})$$

$F_X(\gamma)$, (C.9) ve $F_Y(\gamma)$, (C.20) ifadeleri (C.4)'te yerine yazıldığında $\gamma_{X_k}^{\text{ust}}$ ifadesinin CDF

ifadesi (C.23) ile hesaplanır.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = \left[1 - \left(\frac{P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z)} \right)^M \left(\frac{((P\Omega_{gk})^{2M+2L} / (P_{es1}\Omega_z)^M)}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es1}\Omega_z)^{2M+2L}} \right) \right. \\ \left. \times \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^L \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^L \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \exp \left(-\gamma \left(\frac{4}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_{hk}} \right) \right) \right] \quad (\text{C.23})$$

$F_U(\gamma)$, (C.11) ve $F_V(\gamma)$, (C.22) ifadeleri (C.5)'te yerine yazıldığında $\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}$ ifadesinin CDF'i (C.24) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = \left[1 - \left(\frac{P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_z}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t)} \right)^M \left(\frac{((P\Omega_{hk})^{2M+2L} / (P_{es2}\Omega_t)^M)}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es2}\Omega_t)^{2M+2L}} \right) \right. \\ \left. \times \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^L \left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^L \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \exp \left(-\gamma \left(\frac{4}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \right] \quad (\text{C.24})$$

C.2. Dış Kaynaklı Etkileşimler Etkisinde FEKS Metodunda $F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}$ ve $F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}$ İfadelerinin Hesaplaması

γ_{X_k} ve γ_{Y_k} ifadelerinin üst-sınır değerleri (C.25) ve (C.26) ile gösterilir.

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{\text{ust}} = \min \left(\frac{\gamma_x}{\gamma_D}, \frac{\gamma_y}{(\gamma_C + \gamma_D)} \right) = \min (A, B) \quad (\text{C.25})$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} = \min \left(\frac{\gamma_y}{\gamma_E}, \frac{\gamma_x}{(\gamma_C + \gamma_E)} \right) = \min (W, Z) \quad (\text{C.26})$$

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - P_r(\gamma_A > \gamma, \gamma_B > \gamma) \quad (\text{C.27})$$

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) \approx 1 - (1 - F_{\gamma_A}(\gamma))(1 - F_{\gamma_B}(\gamma)) \quad (\text{C.28})$$

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) \approx 1 - (1 - F_{\gamma_W}(\gamma))(1 - F_{\gamma_Z}(\gamma)) \quad (\text{C.29})$$

(C.7) ifadesi yardımıyla F_A ifadesi, (C.28) eşitliği kullanılarak (C.30) ile ifade edilir.

$$F_A(\gamma) = 1 - \left(\frac{P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z)} \right)^M \exp \left(\frac{-\gamma}{P\Omega_{hk}} \right) \quad (\text{C.30})$$

Benzer şekilde F_B , $B = \frac{\gamma_y}{\gamma_K + \gamma_L + 2}$, (C.25) ifadesinde paydada iki gamma dağılımına sahip rastgele değişken olduğundan bu ifadelerin toplamı (C.31)'de gösterildiği gibi onların konvolüsyonuna eşittir [51].

$$f_{\gamma_K + \gamma_L}(\gamma) = \int_0^\gamma f_{\gamma_K}(x) f_{\gamma_L}(\gamma - x) dx \quad (\text{C.31})$$

f_{γ_K} ve f_{γ_L} ifadeleri (C.31) ifadesinde yerine yazıldığında (C.32) elde edilir.

$$\begin{aligned}
f_{\gamma_K+\gamma_L}(\gamma) &= \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)^M \left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z}\right)^M \frac{1}{(M-1)!} \frac{1}{(M-1)!} \\
&\times \int_0^\gamma x^{M-1} \exp\left(\frac{-x}{P_{er}\Omega_f}\right) (\gamma-x)^{M-1} \exp\left(\frac{-(\gamma-x)}{P_{es1}\Omega_z}\right) dx \\
&= \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)^M \left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z}\right)^M \frac{1}{(M-1)!} \frac{1}{(M-1)!} \exp\left(\frac{-\gamma}{P_{es1}\Omega_z}\right) \\
&\times \int_0^\gamma x^{M-1} (\gamma-x)^{M-1} \exp\left(\frac{-x}{P_{er}\Omega_f} + \frac{x}{P_{es1}\Omega_z}\right) dx \quad (C.32)
\end{aligned}$$

(C.32) ifadesi [82, Eq. (3.383.2)] yardımıyla (C.33)'teki gibi çözüür.

$$\begin{aligned}
f_{\gamma_K+\gamma_L}(\gamma) &= \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)^M \left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z}\right)^M \frac{1}{(M-1)!} \\
&\times \left(\sqrt{\Pi}\right) \left(\frac{\gamma}{\left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z} - \frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)}\right)^{M-\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{\left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z} - \frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)\gamma}{2}\right) \\
&\times I_{M-\frac{1}{2}}\left(\frac{\left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z} - \frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)\gamma}{2}\right) \quad (C.33)
\end{aligned}$$

(C.33) ifadesinin karmaşık formundan dolayı [51]'de iki gamma dağılımına sahip ifadenin konvolüsyonunda kullanılan ifade kullanılmıştır. Toplam ifadesi (C.34) ile gösterilir.

$$f_{\gamma_K+\gamma_L}(\gamma) = \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)^M \left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z}\right)^M \frac{\gamma^{2M-1}}{(M-1)!(M-1)!} \exp\left(\frac{-\gamma}{P_{es1}\Omega_z}\right) \quad (C.34)$$

$B = \frac{\gamma_y}{\gamma_K+\gamma_L+2}$ ifadesinin, CDF'ini hesaplayabilmek için f_y ve $f_{\gamma_K+\gamma_L}$ ifadeleri [83] yardımıyla (C.35)'te yerine yazıldığında (C.36) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned}
f_B(\gamma) &= \int_0^\infty (2+x) f_{\gamma_y}[(2+x)\gamma] f_{\gamma_K+\gamma_L}(x) dx \\
&= \int_0^\infty 2f_{\gamma_y}[(2+x)\gamma] f_{\gamma_K+\gamma_L}(x) dx + \int_0^\infty x f_{\gamma_y}[(2+x)\gamma] f_{\gamma_K+\gamma_L}(x) dx \quad (C.35) \\
f_B(\gamma) &= \left[2 \frac{1}{P\Omega_{gk}} \left(\frac{((P\Omega_{gk})^2/P_{es1}\Omega_z)^M}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es1}\Omega_z)^{2M}} \right) + (2M) \left(\frac{((P\Omega_{gk})^2/P_{es1}\Omega_z)^M}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es1}\Omega_z)^{2M+1}} \right) \right] \\
&\times \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)^M \exp\left(-\frac{2\gamma}{P\Omega_{gk}}\right) \quad (C.36)
\end{aligned}$$

[51] ve [83] yardımıyla f_B , (C.36), ifadesinin CDF'i (C.37) ile ifade edilir.

$$F_B(\gamma) = 1 - \left(\frac{((P\Omega_{gk})^2/P_{es1}\Omega_z)^M}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es1}\Omega_z)^{2M}} \right) \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f}\right)^M \exp\left(-\frac{2\gamma}{P\Omega_{gk}}\right) \quad (C.37)$$

(C.30) ve (C.37) ifadeleri (C.28)'de yerine yazıldığında $F_{X_k}^{\text{ust}}$ ifadesi (C.38) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{X_k}}(\gamma) = 1 - \left(\frac{P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es1}\Omega_z)} \right)^M \left(\frac{((P\Omega_{gk})^2/P_{es1}\Omega_z)^M}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es1}\Omega_z)^{2M}} \right) \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \\ \times \exp \left(-\gamma \left(\frac{1}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right) \right) \quad (\text{C.38})$$

Benzer şekilde, $\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}$ ifadesinin PDF'i (C.39) ile hesaplanır.

$$f_Z(\gamma) = \left[2 \frac{1}{P\Omega_{hk}} \left(\frac{((P\Omega_{hk})^2/P_{es2}\Omega_t)^M}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es2}\Omega_t)^{2M}} \right) + (2M) \left(\frac{((P\Omega_{hk})^2/P_{es2}\Omega_t)^M}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es2}\Omega_t)^{2M+1}} \right) \right] \\ \times \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \exp \left(-\frac{2\gamma}{P\Omega_{hk}} \right) \quad (\text{C.39})$$

(C.39) ifadesinin CDF'i [51] ve [83] yardımıyla (C.40) ile hesaplanır.

$$F_Z(\gamma) = 1 - \left(\frac{((P\Omega_{hk})^2/P_{es2}\Omega_t)^M}{(\gamma + P\Omega_{hk}/P_{es2}\Omega_t)^{2M}} \right) \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \exp \left(-\frac{2\gamma}{P\Omega_{hk}} \right) \quad (\text{C.40})$$

(C.11) ve (C.40) ifadeleri (C.29)'da yerine yazıldığında $\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}$ ifadesinin CDF'i (C.41) ile hesaplanır.

$$F_{\gamma_{Y_k}}(\gamma) = 1 - \left(\frac{P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t)} \right)^M \left(\frac{((P\Omega_{hk})^2/P_{es2}\Omega_t)^M}{(\gamma + P\Omega_{gk}/P_{es2}\Omega_t)^{2M}} \right) \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \\ \times \exp \left(-\gamma \left(\frac{1}{P\Omega_{gk}} + \frac{2}{P\Omega_{hk}} \right) \right) \quad (\text{C.41})$$

C.3. TK İfadesinin $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ İfadesine Dönüştürülmesi

Logaritmik ifadelerin özelliklerinden faydalanılarak ve [78] yardımıyla FEKS metodundaki toplam kapasite ifadesi (C.42)'de ifade edildiği gibi $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ ifadesine dönüştürülür.

$$TK_{\text{FEKS}} = \left[\frac{1}{2N} \log_2(1 + \gamma_{X_k}) + \frac{1}{2N} \log_2(1 + \gamma_{Y_k}) \right] \leq R \\ = \frac{1}{2N} [\log_2(1 + \gamma_{X_k})(1 + \gamma_{Y_k})] \leq R \\ = R \approx \frac{1}{2N} [\log_2(1 + 2\sqrt{\gamma_{X_k}\gamma_{Y_k}} + \gamma_{X_k}\gamma_{Y_k})] \\ = \frac{1}{2N} [\log_2(1 + \sqrt{\gamma_{X_k}\gamma_{Y_k}})^2] \leq R$$

$$\begin{aligned}
&= \left[\log_2 \left(1 + \frac{2\gamma_{X_k}\gamma_{Y_k}}{\gamma_{X_k} + \gamma_{Y_k}} \right) \right] \leq NR \\
&= \left[\log_2 \left(1 + \frac{2}{\frac{1}{\gamma_{X_k}} + \frac{1}{\gamma_{Y_k}}} \right) \right] \leq NR \\
&= \left[\left(\frac{2}{\frac{1}{\gamma_{X_k}} + \frac{1}{\gamma_{Y_k}}} \right) \right] \leq \underbrace{2^{NR} - 1}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}} \\
&= \left[\frac{1}{\underbrace{\left(\frac{1}{\gamma_{X_k}} + \frac{1}{\gamma_{Y_k}} \right)}_{\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})}} \right] \leq \underbrace{\frac{2^{NR} - 1}{2}}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}}
\end{aligned} \tag{C.42}$$

C.4. Dış Kaynaklı Etkileşimler Altında AAi Modeli İçin $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ İfadesinin CDF Hesaplaması

$$\begin{aligned}
F_{\text{AAI}}(\gamma) &= \left(\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}}) \leq \underbrace{\frac{2^{\frac{R}{N}} - 1}{2}}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}} \right) \\
&= 1 - P_r(\gamma_{X_k}^{\text{ust}} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}) \\
&= 1 - P_r \left(\min \left(\frac{\gamma_{x_k}}{\gamma_D}, \frac{\gamma_{y_k}}{\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_D} \right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}, \right. \\
&\quad \left. \left(\frac{\gamma_{y_k}}{\gamma_E}, \frac{\gamma_{x_k}}{\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C + \gamma_E} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \right) \right) \\
&= 1 - P_r \left(\min \left(\frac{\gamma_{x_k}}{\gamma_L + 1}, \frac{\gamma_{y_k}}{\gamma_R + \gamma_J + \gamma_K + \gamma_L + 4} \right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}, \right. \\
&\quad \left. \left(\frac{\gamma_{y_k}}{\gamma_S + 1}, \frac{\gamma_{x_k}}{\gamma_R + \gamma_J + \gamma_K + \gamma_S + 4} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \right) \right) \\
&= 1 - \mathbb{E}_{\gamma_R, \gamma_J, \gamma_K, \gamma_S, \gamma_L} \left[P_r(\gamma_{x_k} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} (\gamma_R + \gamma_J + \gamma_K + \gamma_S + 4), \right. \\
&\quad \left. \gamma_{y_k} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} (\gamma_R + \gamma_J + \gamma_K + \gamma_L + 4)) | \gamma_R, \gamma_J, \gamma_K, \gamma_S, \gamma_L \right] \\
&= 1 - \mathbb{E}_{\gamma_R, \gamma_J, \gamma_K, \gamma_S, \gamma_L} \left[e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}(\gamma_R + \gamma_J + \gamma_K + \gamma_S + 4)}{P\Omega_{hk}}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}(\gamma_R + \gamma_J + \gamma_K + \gamma_L + 4)}{P\Omega_{gk}} \right] \\
&= 1 - \left[e^{-\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left(\frac{4}{P\Omega_{hk}} + \frac{4}{P\Omega_{gk}} \right)} \int_0^\infty e^{-\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left(\frac{\gamma_R}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_R}{P\Omega_{gk}} \right)} f_{\gamma_R}(\gamma_R) d\gamma_R \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\int_0^\infty e^{-\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left(\frac{\gamma_J}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_L}{P\Omega_{gk}} \right)} f_{\gamma_J}(\gamma_J) d\gamma_J \right] \left[\int_0^\infty e^{-\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left(\frac{\gamma_K}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_K}{P\Omega_{gk}} \right)} f_{\gamma_K}(\gamma_K) d\gamma_K \right] \\
& \times \left[\int_0^\infty e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}(\gamma_S)}{P\Omega_{hk}}} f_{\gamma_S}(\gamma_S) d\gamma_S \right] \left[\int_0^\infty e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}(\gamma_L)}{P\Omega_{gk}}} f_{\gamma_L}(\gamma_L) d\gamma_L \right] \\
& = 1 - \left[e^{-\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}} \left(\frac{4}{P\Omega_{hk}} + \frac{4}{P\Omega_{gk}} \right)} \left(\frac{1}{P\Omega_h} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_h} \right)^{1-N} \right] \\
& \times \left[\left(\frac{1}{P\Omega_g} \right)^{N-1} \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P\Omega_g} \right)^{1-N} \right] \\
& \times \left[\left(\frac{1}{Per\Omega_f} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{Per\Omega_f} \right)^{-M} \right] \\
& \times \left[\left(\frac{1}{Pes2\Omega_t} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{Pes2\Omega_t} \right)^{-M} \right] \\
& \times \left[\left(\frac{1}{Pes1\Omega_z} \right)^M \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{TK}}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{Pes1\Omega_z} \right)^{-M} \right] \tag{C.43}
\end{aligned}$$

C.5. FEKS Metodu İçin $\min(\gamma_{X_k}, \gamma_{Y_k})$ İfadesinin CDF Hesaplaması

$$\begin{aligned}
F_{\text{FEKS}}(\gamma) &= \left(\min(\gamma_{X_k}^{\text{ust}}, \gamma_{Y_k}^{\text{ust}}) \leq \underbrace{\frac{2^{NR} - 1}{2}}_{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}} \right) \\
&= 1 - P_r(\gamma_{x_k}^{\text{ust}} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}, \gamma_{y_k}^{\text{ust}} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}) \\
&= 1 - P_r\left(\min\left(\frac{\gamma_{x_k}}{\gamma_D}, \frac{\gamma_{y_k}}{\gamma_C + \gamma_D}\right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}, \left(\frac{\gamma_{y_k}}{\gamma_E}, \frac{\gamma_{x_k}}{\gamma_C + \gamma_E}\right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}\right) \\
&= 1 - P_r\left(\min\left(\frac{\gamma_{x_k}}{\gamma_L + 1}, \frac{\gamma_{y_k}}{\gamma_K + \gamma_L + 2}\right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}, \left(\frac{\gamma_{y_k}}{\gamma_S + 1}, \frac{\gamma_{x_k}}{\gamma_K + \gamma_S + 2}\right) \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}\right) \\
&= 1 - \mathbb{E}_{\gamma_K, \gamma_L, \gamma_S} \left[P_r\left(\gamma_{x_k} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}(\gamma_K + \gamma_L + 2), \gamma_{y_k} \geq \gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}(\gamma_K + \gamma_S + 2) \mid \gamma_K, \gamma_L, \gamma_S \right) \right] \\
&= 1 - \mathbb{E}_{\gamma_K, \gamma_L, \gamma_S} \left[e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}(\gamma_K + \gamma_L + 2)}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}(\gamma_K + \gamma_S + 2)}{P\Omega_{gk}}} \right] \\
&= 1 - \mathbb{E}_{\gamma_K} \left[e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}(\gamma_K + 2)}{P\Omega_{hk}} - \frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}(\gamma_K + 2)}{P\Omega_{gk}}} f_{\gamma_K}(\gamma_K) d\gamma_K \right] \mathbb{E}_{\gamma_L} \left[e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}(\gamma_L)}{P\Omega_{hk}}} f_{\gamma_L}(\gamma_L) d\gamma_L \right] \\
&\times \mathbb{E}_{\gamma_S} \left[e^{-\frac{\gamma_{\text{th}}^{\text{tk}}(\gamma_S)}{P\Omega_{gk}}} f_{\gamma_S}(\gamma_S) d\gamma_S \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 1 - \left[e^{-\gamma_{th}^{tk} \left(\frac{2}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right)} \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \frac{1}{(M-1)!} \int_0^\infty \gamma_K^{M-1} e^{-\gamma_K \left(\frac{\gamma_{th}^{tk}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{tk}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)} d\gamma_K \right] \\
&\times \left[\left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)^M \frac{1}{(M-1)!} \int_0^\infty \gamma_L^{M-1} e^{-\gamma_L \left(\frac{\gamma_{th}^{tk}}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)} d\gamma_L \right] \\
&\times \left[\left(\frac{1}{P_{es2}\Omega_t} \right)^M \frac{1}{(M-1)!} \int_0^\infty \gamma_S^{M-1} e^{-\gamma_S \left(\frac{\gamma_{th}^{tk}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{es2}\Omega_t} \right)} d\gamma_S \right] \\
&= 1 - \left[e^{-\gamma_{th}^{tk} \left(\frac{2}{P\Omega_{hk}} + \frac{2}{P\Omega_{gk}} \right)} \left(\frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^M \left(\frac{\gamma_{th}^{tk}}{P\Omega_{hk}} + \frac{\gamma_{th}^{tk}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{er}\Omega_f} \right)^{-M} \right] \\
&\times \left[\left(\frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)^M \left(\frac{\gamma_{th}^{tk}}{P\Omega_{hk}} + \frac{1}{P_{es1}\Omega_z} \right)^{-M} \right] \left[\left(\frac{1}{P_{es2}\Omega_t} \right)^M \left(\frac{\gamma_{th}^{tk}}{P\Omega_{gk}} + \frac{1}{P_{es2}\Omega_t} \right)^{-M} \right] \quad (C.44)
\end{aligned}$$

D. EK-4.

D.1. FOEKRS Metodunda $F_{\gamma_X^{ust}}$ ve $F_{\gamma_Y^{ust}}$ İfadelerinin Hesaplanması

(3.215) ve (3.216) ifadeleri (D.1) ve (D.2) ile tekrardan yazılırsa,

$$\gamma_{X_k} \leq \gamma_{X_k}^{ust} = \min \left(\frac{P|g_{k,j}|^2}{2}, P|h_{k,j}|^2 \right) = \min (X, Y) \quad (D.1)$$

$$\gamma_{Y_k} \leq \gamma_{Y_k}^{ust} = \min \left(\frac{P|h_{k,j}|^2}{2}, P|g_{k,j}|^2 \right) = \min (U, V) \quad (D.2)$$

$|h_{k,j}|^2$ ve $|g_{k,j}|^2$ ifadeleri Rayleigh dağılımına sahip olduğu için, $\frac{P|g_{k,j}|^2}{2}$ ve $P|h_{k,j}|^2$ ifadelerinin PDF'i (D.3) ve (D.4) ile hesaplanır [51].

$$f_X(x) = \frac{2}{P\Omega_{gk}} \exp \left(\frac{-2x}{P\Omega_{gk}} \right) \quad (D.3)$$

$$f_Y(x) = \frac{1}{P\Omega_{hk}} \exp \left(\frac{-x}{P\Omega_{hk}} \right) \quad (D.4)$$

Burada, $\Omega_{hk} = \mathbb{E}(|h_{k,j}|^2)$ ve $\Omega_{gk} = \mathbb{E}(|g_{k,j}|^2)$ ile ifade edilmiştir.

(D.3) ve (D.4) ifadelerinin 0'dan γ değerine integrali alındığında (D.5) ve (D.6) ifadeleri elde edilir.

$$F_X(\gamma) = 1 - \exp \left(-\frac{2\gamma}{P\Omega_{gk}} \right) \quad (D.5)$$

$$F_Y(\gamma) = 1 - \exp \left(-\frac{\gamma}{P\Omega_{hk}} \right) \quad (D.6)$$

X ve Y , (D.1), ifadeleri birbirinden bağımsız olduğu için $\gamma_{X_k}^{ust}$ ifadesi (D.7) ve (D.8) ile

ifade edilebilir.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - P_r(X > \gamma, Y > \gamma) \quad (\text{D.7})$$

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - (1 - F_X(\gamma))(1 - F_Y(\gamma)) \quad (\text{D.8})$$

(D.5) ve (D.6) ifadeleri (D.8)'de yerine yazıldığında $F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}$ ifadesi (D.9) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{X_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{hk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{gk}}}\right)\right) \quad (\text{D.9})$$

Benzer şekilde, $F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}$ ifadesi (D.10) ile ifade edilir.

$$F_{\gamma_{Y_k}^{\text{ust}}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\gamma\left(\frac{1}{P\Omega_{\text{gk}}} + \frac{2}{P\Omega_{\text{hk}}}\right)\right) \quad (\text{D.10})$$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Volkan Özduvan
Uyruğu	T.C.
Doğum tarihi, Yeri	01/01/1981, Nevşehir
Telefon	05358415755
E-mail	volkan@istanbul.edu.tr

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Doktora	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektrik-Elektronik Müh. A.B.D.	2015
Yüksek Lisans	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektrik-Elektronik Müh. A.B.D.	2008
Lisans	İ.Ü. Mühendislik Fakültesi/Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü	2005
Ön Lisans	İ.Ü. Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu/Endüstriyel Elektronik Programı	2002
Lise	Söke Teknik Lisesi/Elektronik Bölümü	1997

Makaleler/ Bildiriler

- Ozduran, V., Cioffi, J. M., Yarman, B. S., 2013, Opportunistic Source-Pair Selection (OSPS) Method for Multiuser Bi- directional Wireless Relaying Networks, *14th IEEE workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communication (SPAWC)*,16-19 June 2013 Darmstadt, Germany, vol., no., pp.565,569 doi: 10.1109/SPAWC.-2013.6612113.
- Ozduran, V., Soleimani-Nasab, E., Yarman, B. S., 2015, Opportunistic Source-Pair Selection for Multiuser Two- Way Wireless Relaying Networks, *IET Communications* dergisine gönderildi. Gönderim tarihi: 07.07.2015.
- Ozduran, V., Yarman, B. S., Cioffi, J. M., 2015, Opportunistic Source-Pair Selection (OSPS) Method with Imperfect Channel State Information in Multiuser Bi-directional Wireless Relaying Networks, *IEEE Transactions on Communications* dergisine gönderildi. Gönderim tarihi:03.08.2015.
- Ozduran, V., Yarman, B.S., 2014, Impact of the External Co-Channel Interferences over Multiuser Bi-directional Wireless Relaying Networks-Part I: System Description and Outage Analysis, *Wireless Personal Communication*, Vol. 78, Issue 2, pp 1277-1295, doi: 10.1007/s11277-014-1817-9.
- Ozduran, V., Yarman, B.S., 2015, Impact of the External Co-Channel Interferences over Multiuser Bi-directional Wireless Relaying Networks: Theoretical Approach, *IEEE Transactions on Communications* dergisine gönderildi. Gönderim tarihi:16.04.2015.
- Ozduran, V., Yarman, B.S., Cioffi, J. M., 2015, Opportunistic Joint Source-Pair and Relay Selection (OJSPRS) Method in Multiuser Bi-directional Wireless Relaying Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communication* dergisine gönderildi. Gönderim tarihi: 27.03.2015.