

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAM-ÇİFT YÖNLÜ BİLİŞSEL RÖLE AĞLARI İÇİN ENERJİ HASATLAMALI
YENİ BİR SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin Onur BAKTIROĞLU

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAM-ÇİFT YÖNLÜ BİLİŞSEL RÖLE AĞLARI İÇİN ENERJİ HASATLAMALI
YENİ BİR SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hüseyin Onur BAKTIROĞLU
(504161311)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504161311 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hüseyin Onur BAKTIROĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TAM-ÇİFT YÖNLÜ BİLİŞSEL RÖLE AĞLARI İÇİN ENERJİ HASATLAMALI YENİ BİR SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. İbrahim ALTUNBAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 29 Nisan 2019
Savunma Tarihi : 13 Haziran 2019





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışması sürecinde sonsuz enerjisiyle bana sunduğu yeni yaklaşımlar ve verdiği desteklerden ötürü değerli hocam Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ'ne teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenimimde bana kolaylık sağlayan ZETA SAVUNMA A.Ş.'ye ve yüksek lisans eğitim hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Nisan 2019

Hüseyin Onur BAKTIROĞLU
(Elektronik ve Haberleşme Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Konu ile İlgili Literatürde Yapılmış Çalışmalar	1
1.2 Tezin Konuya Katkıları	4
2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI VE İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM.....	7
2.1 Bilişsel Radyo Ağları.....	7
2.2 Spektrum Paylaşımı.....	9
2.3 Spektrum Erişim Teknikleri.....	10
2.3.1 Araya yerleştirme	10
2.3.2 Altına serme	11
2.3.3 Üstüne serme	12
2.4 İşbirlikli İletişim Protokolleri.....	13
2.4.1 Kuvvetlendir ve aktar	15
2.4.2 Çöz ve aktar	17
3. ENERJİ HASATLAMA	19
3.1 Zaman Anahtarmalı Aktarım	20
3.2 Güç Bölmeli Aktarım	22
3.3 Anten Anahtarlamalı Aktarım.....	23
4. TAM-ÇİFT YÖNLÜ BİLİŞSEL RÖLE AĞLARI	29
4.1 Tam-Çift Yönlü Aktarım	29
4.2 Tam-Çift Yönlü Bilişsel AF Röle Ağı.....	31
5. TAM-ÇİFT YÖNLÜ BİLİŞSEL DF RÖLE AĞI İÇİN YENİ BİR SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ	39
5.1 Sistem Modeli ve Protokol Tanımı	39
5.2 Servis Kesilme Analizi	43
5.3 Başarım Değerlendirmeleri ve Karşılaştırmalar.....	50
6. TAM-ÇİFT YÖNLÜ BİLİŞSEL RÖLE AĞLARI İÇİN ENERJİ HASATLAMALI SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ.....	59
6.1 Tam-Çift Yönlü Bilişsel AF Röle Ağı İçin Enerji Hasatlama	59
6.1.1 Enerji hasatlamalı protokol tanımı	59
6.1.2 Servis kesilme analizi	64
6.2 Tam-Çift Yönlü Bilişsel DF Röle Ağı İçin Enerji Hasatlamalı Yeni Bir Spektrum Paylaşım Protokolü	67
6.2.1 Enerji hasatlamalı protokol tanımı	68

6.2.2 Servis kesilme analizi.....	73
6.3 Başarım Değerlendirmeleri ve Karşılaştırmalar	81
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	97
KAYNAKLAR.....	101
EKLER	105
ÖZGEÇMİŞ.....	109



KISALTMALAR

AF	: Amplify and Forward (Kuvvetlendir ve Aktar)
ANC	: Analog Network Coding (Analog Ağ Kodlama)
AR	: Adaptive Relaying (Uyarlamalı Aktarma)
ASR	: Antenna Switching Relaying (Anten Anahtarlama Aktarım)
AWGN	: Additive White Gaussian Noise (Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü)
BC	: Broadcast (Yayın)
CSI	: Channel State Information (Kanal Durum Bilgisi)
DF	: Decode and Forward (Çöz ve Aktar)
EH	: Energy Harvesting (Enerji Hasatlama)
FD	: Full-Duplex (Tam-Çift Yönlü)
FDMA	: Frequency Division Multiple Access (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
GSC	: General Selection Combiner (Genel Seçmeli Birleştirici)
HD	: Half-Duplex (Yarı-Çift Yönlü)
ISM	: Industrial Scientific Medical (Endüstriyel Bilimsel Tıbbi)
MAC	: Multiple Access (Çoklu Erişim)
MIMO	: Multiple Input Multiple Output (Çok Giriş Çok Çıkış)
MRC	: Maximum Ratio Combining (En Büyük Oranlı Birleştirme)
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama)
PLNC	: Physical Layer Network Coding (Fiziksel Katman Ağ Kodlama)
PSR	: Power Splitting Relaying (Güç Bölmeli Aktarım)
RFCC	: Radio Frequency Combining Circuit (Radyo Frekans Birleştirme Devresi)
RLI	: Residual Loop Interference (Artık Döngü Girişimi)
SINR	: Signal to Noise+Interference Ratio (İşaret-Gürültü+Girişim Oranı)
SWIPT	: Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (Eş Zamanlı Telsiz Bilgi ve Güç Transferi)
TDMA	: Time Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)
TSR	: Time Switching Relaying (Zaman Anahtarlama Aktarım)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 6.1 : TSR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel AF röle ağı için iletim çizelgesi.	60
Çizelge 6.2 : PSR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel AF röle ağı için iletim çizelgesi.	61
Çizelge 6.3 : ASR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel AF röle ağı için iletim çizelgesi.	62
Çizelge 6.4 : TSR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel DF röle ağı için iletim çizelgesi.	68
Çizelge 6.5 : PSR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel DF röle ağı için iletim çizelgesi.	69
Çizelge 6.6 : ASR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel DF röle ağı için iletim çizelgesi.	70



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bilişsel radyo ağ modeli.....	7
Şekil 2.2 : Bilişsel radyolar için spektrum yönetim işlevleri.....	8
Şekil 2.3 : Araya yerleştirme spektrum erişim yöntemi.....	10
Şekil 2.4 : Altına serme spektrum erişim yöntemi.....	11
Şekil 2.5 : Üstüne serme spektrum erişim yöntemi.....	12
Şekil 2.6 : İşbirlikli iletişim sistem modeli.....	15
Şekil 2.7 : AF protokolü iletim modeli.....	16
Şekil 2.8 : DF protokolü iletim modeli.....	18
Şekil 3.1 : Enerji hasatlama protokolleri: (a) TSR; (b) PSR; (c) ASR.....	19
Şekil 3.2 : (a) TSR protokolü iletim blok yapısı; (b) TSR protokolü için röle alıcı yapısı.....	21
Şekil 3.3 : (a) PSR protokolü iletim blok yapısı; (b) PSR protokolü için röle alıcı yapısı.....	22
Şekil 3.4 : ASR protokolü için röle alıcı yapısı.....	24
Şekil 4.1 : Tam-çift yönlü iletişim modeli.....	29
Şekil 4.2 : İki yönlü işbirlikli iletişim modeli.....	30
Şekil 4.3 : Tam-çift yönlü işbirlikli iletişim modeli.....	31
Şekil 4.4 : Tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağ yapısı.....	32
Şekil 5.1 : Tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağ yapısı.....	40
Şekil 5.2 : Birincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.	51
Şekil 5.3 : İkincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.	51
Şekil 5.4 : Önerilen spektrum paylaşım protokolünde birincil kullanıcılara ait servis kesilme başarımının α 'ya bağlı değişimi.....	53
Şekil 5.5 : Birincil sistem servis kesilme olasılıklarının σ_L^2 [dB]'ye göre değişimi ..	54
Şekil 5.6 : İkincil sistem servis kesilme olasılıklarının σ_L^2 [dB]'ye göre değişimi.	54
Şekil 5.7 : Birincil sistem servis kesilme olasılıklarının farklı R_{pt} değerleri için ρ [dB]'ya göre değişimi.....	56
Şekil 5.8 : İkincil sistem servis kesilme olasılıklarının farklı R_{st} değerleri için ρ [dB]'ya göre değişimi.....	56
Şekil 5.9 : İkincil sistem servis kesilme olasılıklarının d_{CD} 'ye göre değişimi.	57
Şekil 6.1 : $\mu_{s,1} = 1$ ve $d_{AC} = d_{BC} = 1$ için EH'lı ve EH'sız birincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.	82
Şekil 6.2 : $\mu_{s,1} = 1$ ve $d_{CD} = 0.05$ için EH'lı ve EH'sız ikincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.	82
Şekil 6.3 : $\mu_{s,1} = 1/3$ ve $d_{AC} = d_{BC} = 1$ için EH'lı ve EH'sız birincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.	84
Şekil 6.4 : $\mu_{s,1} = 1/3$ ve $d_{CD} = 0.05$ için EH'lı ve EH'sız ikincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.	84
Şekil 6.5 : $\mu_{s,1} = 1/3$ ve $d_{AC} = d_{BC} = 2$ için EH'lı ve EH'sız birincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.	85

Şekil 6.6 : $\mu_{s,1} = 1/3$ ve $d_{CD} = 0.25$ için EH'lı ve EH'sız ikincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.	85
Şekil 6.7 : EH'lı ve EH'sız birincil sistem servis kesilme olasılıklarının σ_L^2 [dB]'ye göre değişimi.	87
Şekil 6.8 : EH'lı ve EH'sız birincil sistem servis kesilme olasılıklarının R_{pt} 'ye göre değişimi.	87
Şekil 6.9 : EH'lı birincil sistem verimlerinin ρ [dB]'ya göre değişimi.	89
Şekil 6.10 : EH'lı ikincil sistem verimlerinin ρ [dB]'ya göre değişimi.	89
Şekil 6.11 : PSR kullanılması durumunda EH'lı birincil sistem verimlerinin β 'ya göre değişimi.	91
Şekil 6.12 : Farklı enerji hasatlama protokolleri için EH'lı birincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.	92
Şekil 6.13 : Farklı enerji hasatlama protokolleri için EH'lı ikincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.	92
Şekil 6.14 : Farklı enerji hasatlama protokolleri için EH'lı birincil sistem verimlerinin ρ [dB]'ya göre değişimi.	93
Şekil 6.15 : Farklı enerji hasatlama protokolleri için EH'lı ikincil sistem verimlerinin ρ [dB]'ya göre değişimi.	93

TAM-ÇİFT YÖNLÜ BİLİŞSEL RÖLE AĞLARI İÇİN ENERJİ HASATLAMALI YENİ BİR SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ

ÖZET

Telsiz iletişim sistemlerinin sürekli ve hızlı olarak gelişmesiyle band genişliğine olan gereksinim artmaktadır. Spektrumdan yararlanma verimini daha da arttırmak amacıyla bilişsel radyo ile işbirlikli iletişim teknolojileri birleştirilmiş ve bilişsel röle ağları kavramı ortaya çıkmıştır. Bilişsel röle, ikincil kullanıcıların bir ögesi olup ikincil verici veya ayrı bir edilgen röle olabilir. Üstüne serme yaklaşımında ikincil verici işlevi gören bilişsel röle, spektrumu etkin bir şekilde tarayarak birincil kullanıcıların iletimine yardım etmekte ve aynı zamanda ikincil işaretini hedeflediği ikincil alıcıya göndermektedir. Bilişsel röle yarı-çift yönlü (HD) veya tam-çift yönlü (FD) olarak çalışabilmektedir. HD aktarım işleminde, röle iki dik kanal üzerinden işaretini almakta ve iletmektedir. Diğer taraftan FD aktarım işleminde ise, röle aynı zaman diliminde ve aynı frekansta, hem verici uçtan gelen işareti almakta hem de alıcı uca işaret göndermektedir. FD aktarım ile spektral verimlilik iki katına çıkmaktadır. Fakat rölenin aynı zaman diliminde hem işaret göndermesi hem de almasından dolayı röle üzerinde artık döngü girişimi (RLI) oluşmaktadır.

Bu tez kapsamında ilk olarak tam-çift yönlü bilişsel kuvvetlendir ve aktar (AF) röle ağı referans sistemi incelenmiştir. Referans sistemde kullanılan spektrum paylaşım protokolü tanıtılmış ve birincil ve ikincil kullanıcılara ait servis kesilme olasılıkları elde edilmiştir. Tezin sonraki bölümünde, tam-çift yönlü bilişsel çöz ve aktar (DF) röle ağı için yeni bir spektrum paylaşım protokolü önerilmiştir. Sistem modeli, her bir kullanıcının her bir evrede ileteceği işaretler tanımlanmış ve işaret-gürültü+girişim oranı (SINR) ifadeleri elde edilmiştir. Ulaşılabilir anlık hız ifadeleri çıkarılarak iki yönlü birincil sistem servis kesilme olasılığı ile ikincil sistem servis kesilme olasılığı kuramsal olarak elde edilmiş ve elde edilen bilgisayar benzetim sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Önerilen sistem ile referans sistemin servis kesilme başarımları artık döngü girişimi, iletim işaret-gürültü oranı, birincil ve ikincil hedeflenen hızları ve güç paylaşırma çarpanına bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda yeni önerilen sistemin birincil ve ikincil servis kesilme başarımlarının referans sisteme göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Yeni önerilen sistemde, birinci evrede ikincil alıcıda alınan birincil işaretlerin ardışık girişim giderme kullanılarak çözülmesi ve ikinci evrede çözülen birincil işaretlerin ikincil alıcıda kullanılarak girişimin yok edilmesiyle ikincil sistem servis kesilme başarımının iyileştiği görülmüştür. Bunun yanında, bilişsel röle görevi yapan ikincil vericinin ikincil alıcıya her iki evrede de farklı paketler göndererek iletim yapması ile ikincil sistem iletiminde süreklilik sağlanmıştır. Ek olarak, yeni önerilen sistemde bilişsel röle ikinci evrede tüm kullanıcılara ileteceği birleşik işareti oluştururken güç paylaşırma çarpanı kullanmaktadır. Güç paylaşırma çarpanının uygun bir şekilde seçilmesi ile birincil sistem servis kesilme başarımı, spektrum paylaşımı olmayan duruma göre artarken aynı zamanda ikincil sistemin sürekli spektrum paylaşımı sağlanmıştır.

Sınırlı enerji kaynaklarına sahip telsiz iletişim sistemlerindeki uç birimleri, ağ iletişimini sürdürmek için sürekli olarak batarya şarjına veya değişime gereksinim duymaktadır. Sistemlerdeki uç birimlerinin harici enerji kaynağı olmadan çalışması için çevredeki radyo frekanslı (RF) işaretlerden enerji hasatlama fikri öne çıkmıştır. RF işaretin hem bilgi hem de enerji taşınması sayesinde uç birimlerinde uygun enerji hasatlama alıcı yapısı kullanılarak hem bilgi işlenebilmekte hem de enerji hasatlanabilmektedir. İşbirlikli iletişim sistemlerinde Eş Zamanlı Telsiz Bilgi ve Güç Transferi (SWIPT)'nin uygulanabilmesi için rölede alınan işaret enerji hasatlama ve bilgi işleme için iki parçaya ayrılır. İşaretin alıcıda hangi boyutta ikiye ayrıldığına bağlı olarak çeşitli enerji hasatlama protokolleri önerilmiştir. Kullanılan temel protokoller Zaman Anahtarlama Aktarım (TSR), Güç Bölmeli Aktarım (PSR) ve Anten Anahtarlama Aktarım (ASR) olarak sayılabilir. Tez kapsamında yapılan diğer bir çalışmada, yeni önerilen tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağında ve referans sistemde bilişsel rölenin enerji hasatlama alıcı mimarisine sahip olduğu durum incelenmiştir. Sistemlerdeki bilişsel röle ilk evrede hasatladığı enerjiyi kullanarak ikinci evrede iletim yapmaktadır. Her iki sistem için de TSR, PSR veya ASR enerji hasatlama protokollerinin kullanılması durumunda birincil ve ikincil sistem servis kesilme olasılığı ve verim ifadelerinin kuramsal çıkarımı yapılmış ve bilgisayar benzetim sonuçlarıyla doğrulanmıştır. İlk olarak PSR enerji hasatlama protokolü kullanılan enerji hasatlamalı (EH) sistemler ile EH'sız sistemlerin servis kesilme başarımları karşılaştırılmıştır. Beklenildiği üzere, EH'sız sistemler EH'lı sistemlere göre daha iyi birincil ve ikincil sistem servis kesilme başarımları göstermiştir. Ek olarak, EH'lı yeni önerilen sistemin, EH'lı referans sisteme göre daha iyi birincil ve ikincil sistem servis kesilme başarımları ve ikincil sistem verimine sahip olduğu gösterilmiştir. Diğer taraftan EH'lı sistemlerde farklı enerji hasatlama protokollerinin kullanıldığı durumlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda ASR enerji hasatlama protokolünün kullanıldığı durumlar için en iyi birincil ve ikincil sistem servis kesilme başarımları ve verimi sağlandığı görülmüştür. Ayrıca, PSR kullanıldığında TSR'a göre daha iyi birincil ve ikincil sistem verimi elde edilirken, TSR kullanıldığında ise daha iyi birincil ve ikincil sistem servis kesilme başarımları elde edilmektedir.

AN ENERGY-HARVESTING SPECTRUM SHARING PROTOCOL FOR COGNITIVE FULL-DUPLEX RELAYING NETWORKS

SUMMARY

With continuous and rapid development of wireless communication systems and increasing demand for wireless services, more and more spectrum resources will be needed. Recent works have indicated that actual licensed spectrum is largely underutilized. As a solution, cognitive radio (CR) allows secondary users to share the spectrum leased by primary users by applying underlay or overlay spectrum sharing paradigms which increase the spectral efficiency without degrading the performances of the spectrum owners. On the other hand, cooperative communication is the well-known technique to improve link quality, achieve transmit diversity and extend the coverage area. Transmitting a copy of source signal via relay node is a way of combat fading, shadowing and path loss. In order to improve spectral efficiency, cognitive relay networks, as a combination of cooperative communications and cognitive radio, have developed recently. Cognitive radio as a member of the secondary system can operate as secondary transmitter or passive relay. Cognitive relay, which operates as secondary transmitter in overlay paradigm, monitors the spectrum effectively and assists the primary user's transmission by utilizing some fraction of its power. At the same time, it transmits its own data with the remaining power. Although, the spectrum overlay access method requires high degree of cooperation between primary users and cognitive relay. Also, cognitive relay requires the knowledge of primary user message signal. Cognitive relay can operate in half-duplex (HD) or full-duplex (FD) mode. In HD relaying mode, relay transmits and receives information on two orthogonal channels. Therefore, HD relaying reduces spectral efficiency due to the two orthogonal channels employed. On the other hand, in FD relaying mode, relay transmits and receives signal forwarded from the source, over the same frequency band at the same time. FD relaying doubles the spectral efficiency. However, due to transmitting and receiving at the same time interval, residual loop interference (RLI) occurs at FD relay. RLI is the self interference between relay's transmitting and receiving ends.

In this dissertation, first, the reference system, namely, cognitive full-duplex amplify and forward (AF) relaying network is introduced. The spectrum sharing scheme used in this reference system is described. Analytical expressions for the outage probabilities of primary and secondary systems is obtained in closed form. In the next part of the thesis, a novel spectrum sharing protocol for the cognitive full-duplex decode and forward (DF) relaying network is proposed. An FD cognitive relay network with two primary and two secondary users is considered. Cognitive relay acts as a secondary transmitter, operates in FD relaying mode and applies DF cooperation protocol. Primary user pair communicates bidirectionally and the secondary transmitter unidirectionally communicates with its receiver. The system model, signals that intended to send in each phase by each user are defined and SINR expressions are obtained. The outage performances of primary and secondary users are analytically derived and the obtained closed form outage probability expressions are validated by

computer simulation results. Comparisons with the two-way non-cooperative direct transmission case and the reference system show the advantages of the proposed protocol. In the new protocol, the successive interference cancellation is applied at the secondary receiver in the first phase to decode also the primary signals. In the second phase, interference incurred from primary signals is eliminated at the secondary receiver by using the decoded primary signals in the first phase. This process improves the secondary outage performance. On the other hand, forwarding different packets from the secondary transmitter to the secondary receiver in each phase provides continuous transmission of the secondary system. In addition, in the second phase, the network-coded signal is superimposed with a new secondary signal using the power allocation factor α . By using the power allocation factor, cognitive relay assigns a certain fraction of its power to the primary signals and the remaining power for the secondary signal intended for the secondary receiver. Through a careful choice of α , a better (or at least an equal) outage performance can be achieved for the primary system than the non-cooperative case, while the secondary user is sharing the spectrum. Moreover, both full-duplex relaying protocols converge an outage floor, because at larger transmit signal to noise ratio values RLI dominates the received signals at cognitive relay.

Energy-constrained communication systems have a limited operational lifetime, and to maintain the network connectivity, periodical battery replacement or recharging should be performed. As a solution to this, background radio-frequency (RF) signals radiated by ambient transmitters can be utilized for energy harvesting. RF signals, can carry both energy and information. Therefore, energy harvesting and information decoding can be done simultaneously by using a suitable energy harvesting receiver at the relay. Received signals are divided into two separate parts at relay's energy harvesting receiver to implement simultaneous wireless information and power Transfer (SWIPT). Various energy harvesting protocols have been proposed depending on how the received signal is separated at relay's receiver. Commonly used energy harvesting protocols are time switching relaying protocol (TSR), power splitting relaying protocol (PSR) and antenna switching protocol (ASR). In TSR protocol, relay harvests energy from source signal for a fraction of block time and the remaining block time is used for information processing. The choice of time fraction, namely, time switching factor, determines how much time that relay node harvests energy and affects achievable throughput at destination. In PSR protocol, the first half of the block time is used for source to relay information transmission and the remaining half is used for relay to destination information transmission. During the first half of block time, a specified fraction of the received signal power is used for energy harvesting and the remaining signal power is used for information processing at relay. The choice of power fraction, namely, power splitting factor, affects the achievable throughput at the destination. In ASR protocol more than one antennas are used at relay. Depending on the application, some of the antennas are assigned for energy harvesting and the remaining antennas for information processing. Various antenna assignment schemes available for ASR. General selection combiner (GSC)-based assignment schemes are one of the low-complexity solutions to implement. Although, PS-based optimal scheme and binary knapsack optimal schemes are characterized by high complexity and requires an optimization problem to solve at each transmission frame. By using GSC-based assignment scheme, relay node assigns its N antennas into the two radio frequency combining circuits (RFCC) based on the strength of associated channel paths. To clarify, L antennas with strongest channel paths are connected to the RFCC I and the rest $N - L$ antennas to RFCC II.

In the last part of the thesis, both the novel FD cognitive DF relay network and the reference cognitive full-duplex AF relaying network with energy harvesting receiver at cognitive relay are studied. With energy harvesting receiver, in the second phase, cognitive relay transmits its signal using the harvested energy in the first phase. In other words, cognitive relays can operate without external energy source in second phase. TSR, PSR and ASR energy harvesting protocols are investigated for both the novel FD cognitive DF relay network and the reference system. The energy harvesting system model, signals intended to send in each phase by each user are defined and SINR expressions are obtained. The outage and throughput performances of primary and secondary users are analytically evaluated and the obtained closed form outage probability expressions are validated by computer simulation results. The simulation results gathered from energy harvesting and non-energy harvesting cases for both systems are compared. The results reveal that, the non-energy harvesting systems give better primary outage performance compared to the systems with energy harvesting, as expected. Moreover, equal secondary system outage performance is achieved for both energy harvesting and non-energy harvesting cases of the considered reference system. It's due to the fact that, reference system's cognitive relay send its secondary signal only in the first phase. On the other hand, when the distance between cognitive relay and secondary receiver increases, the non-energy harvesting case gives better secondary outage performance than the energy harvesting case for the proposed system. In addition, the energy harvesting case of both systems are compared for the TSR, PSR and ASR energy harvesting protocols. The simulation results show that, the energy harvesting case of the proposed system achieves a better primary system outage performance with respect to transmit SNR than the energy harvesting case of the reference system regardless of which energy harvesting protocol is used. In the low transmit SNR region, the energy harvesting case of the reference system has smaller outage probability for secondary users compared with the energy harvesting case of the proposed system. However, its vice versa for middle and high transmit SNR regions. Also, better secondary system throughput is obtained with respect to transmit SNR for the energy harvesting case of the proposed system compared to energy harvesting case of the reference system. That is because, unlike in the reference system, the secondary transmitter forwards packets to the secondary receiver in each phase for the proposed system. Finally, simulation results show that, the ASR energy harvesting protocol gives the best primary and secondary outage performances and throughputs for both systems. Furthermore, for both systems, the TSR protocol outperforms the PSR protocol in terms of primary and secondary outage probability. On the other hand, the PSR protocol outperforms the TSR protocol in terms of primary and secondary throughput.



1. GİRİŞ

1.1 Konu ile İlgili Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Son yıllarda telsiz iletişim sistemlerinde band genişliğine olan gereksinimin artmasıyla spektrumu daha verimli kullanmak için bilişsel radyolar üzerine yapılan çalışmalar yaygınlaşmıştır [1]. Literatürde, birincil kullanıcıların başarımını koruma veya iyileştirme koşulu altında gerçek zamanlı olarak kullanılabilecek mevcut bandların (spektrum boşlukları) birçok ikincil kullanıcı arasında tahsisini ve paylaşımını koordine etme işlemi spektrum paylaşımı olarak tanımlanmıştır [2,3]. Spektrum paylaşımında spektruma erişim için üç farklı yaklaşım üzerinde durulmuştur [4]. Araya serme yönteminde ikincil kullanıcılar sadece spektrum boşluklarında yararlanırken, altına serme yönteminde ikincil kullanıcılar, birincil kullanıcılarda oluşturdukları girişim düzeyi belli bir eşiğin altında ise birincil kullanıcılar ile aynı anda iletim yapabilmektedir. Üstüne serme yönteminde ise ikincil kullanıcı verici gücünün bir kısmını birincil kullanıcının iletimine yardım etmek için kullanılır ve bunun karşılığında birincil kullanıcılar ile aynı anda iletim yapma olanağı sağlanır.

Spektrumdan yararlanma verimini daha da arttırmak amacıyla bilişsel radyo ile işbirlikli iletişim teknolojileri birleştirilmiş ve bilişsel röle ağları önerilmiştir [5-7]. Bilişsel röle, ikincil kullanıcının bir ögesi olup ikincil verici veya ayrı bir edilgen röle olabilir. Üstüne serme yaklaşımında bilişsel röle yani ikincil verici spektrumu etkin bir şekilde tarayarak birincil kullanıcıların iletimine yardım etmekte ve aynı zamanda ikincil işaretini hedeflediği ikincil alıcıya göndermektedir [8]. Bilişsel röle yarı-çift yönlü (half-duplex, HD) veya tam-çift yönlü (full-duplex, FD) olarak çalışabilir. Yarı-çift yönlü aktarım işleminde, röle iki dik kanal üzerinden işaretini almakta ve iletmektedir. Tam-çift yönlü aktarım işleminde ise, röle aynı zaman diliminde ve aynı frekansta, hem verici uçtan gelen işareti almakta hem de alıcı uca işaret göndermektedir [9]. Tam-çift yönlü aktarım ile spektral verimlilik iki katına çıkmaktadır fakat rölenin aynı zaman diliminde hem işaret göndermesi hem de almasından dolayı röle üzerinde artık döngü girişi oluşmakta ve sistemin başarımı

düşmektedir. [10]'da yapılan çalışmada fiziksel katman ağ kodlama (PLNC) tabanlı iki yönlü HD aktarmalı işbirlikli iletişim sistemi ile tek yönlü FD aktarmalı işbirlikli sistemlerinin servis kesilme başarımları ve verim ifadeleri kuramsal olarak elde edilmiş ve yapılan benzetimlerle karşılaştırılmıştır. Artık döngü girişiminin giderilmesi, antenler arası izolasyonun arttırılmasına yönelik yapılan çalışmalar ve yeni işaret işleme algoritmalarının geliştirilmesi FD aktarıma yönelik ilgiyi arttırmaktadır [11-13].

Literatürde bilişsel röle ağları ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. [14]'de üç evreli iki yönlü bilişsel DF röle ağı için spektrum paylaşım protokolü önerilmiştir. Önerilen sistemde, ilk iki evrede birincil kullanıcılar işaretlerini bilişsel röleye iletmekte ve üçüncü evre olan yayın evresinde bilişsel röle güç paylaşırma çarpanı kullanarak işaretini tüm kullanıcılara iletmektedir. [8]'de iki evreli iki yönlü bilişsel röle ağı için spektrum paylaşım protokolü önerilmiştir. Birincil sistemin servis kesilme başarımları kısıtları altında ikincil kullanıcıların servis kesilme olasılıkları minimize edilmeye çalışılmıştır. İkincil bilişsel röle için optimal güç paylaşım yapısı analiz edilmiş, bunun yanında rölede çöz ve aktar, kuvvetlendir ve aktar ve uyarlamalı aktarma protokollerinin kullanıldığı durumlar için servis kesilme analizi yapılmıştır. [15]'de analog ağ kodlama (ANC) kullanılan iki evreli spektrum paylaşım protokolü önerilmiştir. Önerilen sistemde, iletimin ikinci evresinde güç paylaşırma çarpanı kullanılmakta ve bilişsel röle, ANC işareti ile kendi ikincil işaretini birleştirilerek tüm kullanıcılara göndermektedir. [16]'da önerilen iki evreli spektrum paylaşım protokolünde, ikincil vericinin birincil vericiye kritik bir yakınlıkta konumlandığı sürece güç paylaşırma çarpanının belli bir eşik değeri olduğu ve güç paylaşırma çarpanının bu eşik değerinin üstünde seçilmesiyle ikincil sistemin birincil sistemin servis kesilme başarımlarını etkilemeden veya iyileştirerek çalışabildiği ortaya konmuştur. Burada [8] ve [14-16]'daki yapılan çalışmalarda bilişsel röle ve diğer kullanıcılar HD olarak çalışmaktadır. [17]'de ise bilişsel rölenin ilk evrede FD olarak çalıştığı, iki yönlü FD bilişsel AF röle ağı için spektrum paylaşım protokolü önerilmiştir. Birincil ve ikincil sistemlerin servis kesilme olasılıkları kuramsal olarak elde edilmiş ve artık döngü girişimine göre değişimi bilişsel rölenin HD olarak çalıştığı [15]'deki durum ve doğrudan iletim durumu ile karşılaştırılarak incelenmiştir.

Sınırlı enerji kaynaklarına sahip telsiz iletişim sistemlerindeki uç birimleri, ağ iletişimini sürdürmek için batarya şarjına veya değişime ihtiyaç duymaktadır. Bu

doğrultuda çevredeki RF işaretlerden enerji hasatlama fikri öne çıkmıştır. RF işaretlerinin hem bilgi hem de enerji taşımasından dolayı eş zamanlı telsiz bilgi ve güç transferi (SWIPT) alanında çalışmalar yoğunlaşmıştır. Eş zamanlı bilgi ve güç transferi yeteneğine sahip telsiz iletişim sistemlerinin temel başarımları limitleri [18] ve [19]'da analiz edilmiştir. SWIPT alanında öncü çalışmalar olan [18] ve [19]'da ideal alıcının, alınan aynı işaretten bağımsız olarak hem bilgi çözme hem de enerji hasatlama yaptığı kabul edilmiştir. Fakat bu varsayım, alınan işaretin kayıpsız olarak hem bilgi işleme hem de enerji hasatlama için kullanıldığı anlamına gelmektedir ve pratik açıdan uygulanabilir değildir. Bu problemin çözümü için [20]'de telsiz bilgi ve güç iletim ağlarında hız-enerji ödünleşimi üzerine çalışma yapılmıştır. [21]'de, [18-20]'deki noktadan noktaya tek antenli iletimin aksine çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) sistemler üzerine çalışma yapılmıştır. Bir alıcısı enerji hasatlayan, diğer alıcısı ortak vericiden gönderilen bilgiyi çözen üç düğümlü MIMO yayın sistemi için başarımları sınırları çıkarılmıştır. SWIPT alanında yapılan [18-21]'deki çalışmalarda sadece noktadan noktaya iletişim sistemleri göz önüne alınmıştır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar daha çok rölenin enerji hasatlama alıcı yapısına sahip olduğu işbirlikli iletişim sistemleri üzerinedir. [22]'de yazarlar, kaynak, röle ve hedef'ten oluşan işbirlikli iletişim sisteminde rölenin enerji hasatlama alıcısına sahip olduğu ve AF aktarma protokolü kullandığı durumu incelemişlerdir. Sırasıyla zaman anahtarlama aktarım (TSR) ve güç bölmeli aktarım (PSR) enerji hasatlama protokolleri için röledeki alıcı mimarileri açıklanmış ve verim ifadeleri elde edilmiştir. Ayrıca, analizler hem gecikme-sınırlı (delay-limited) ve hem de gecikme-toleranslı (delay-tolerant) iletim yapıları için yapılmıştır. Aynı yazarlar [23]'de enerji hasatlamalı DF röle ağında TSR ve PSR enerji hasatlama protokollerinin kullanıldığı durumlar için verim ve ergodik kapasite ifadelerini kuramsal olarak elde etmiştir. [24]'de TSR ve PSR'ın ortak olarak kullanıldığı uyarlamalı aktarım (AR) enerji hasatlama protokolü önerilmiştir. [25]'de işbirlikli iletişim sisteminde rölede birden fazla antenin kullanıldığı ve her bir antenin enerji hasatlama veya bilgi işleme yaptığı anten anahtarlama aktarım (ASR) enerji hasatlama protokolü önerilmiştir. Rölede N adet anten olduğu durumda PS tabanlı optimum anten atama yapısı, ikili knapsack optimum anten atama yapısı ve genel seçmeli birleştirici (GSC) tabanlı anten atama yapıları hakkında bilgi verilmiştir. Farklı N değerleri için anten atama yapılarına ait servis kesilme başarımları verici gücüne bağlı olarak karşılaştırılmıştır.

1.2 Tezin Konuya Katkıları

Bu tezde tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağı için yeni bir spektrum paylaşım protokolü önerilmiştir. Yeni önerilen bilişsel röle ağı ile [17]'deki tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağının birincil ve ikincil sistem servis kesilme olasılıkları, artık döngü girişimine, iletim işaret-gürültü oranına, birincil ve ikincil hedeflenen hızlara, güç paylaşırma çarpanına bağılı olarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda yeni önerilen sistemin birincil ve ikincil servis kesilme olasılıklarının [17]'deki sisteme göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Yeni önerilen sistemde, birinci evrede birincil işaretlerin ikincil alıcıda ardışık girişim giderme kullanılarak çözülmesi ve ikinci evrede, ilk evrede çözülen bu birincil işaretlerin kullanılmasıyla ikincil alıcıdaki girişimin yok edilmesinin ikincil sistem servis kesilme başarımını iyileştirdiği görülmüştür. Bunun yanında, her iki evrede de ikincil vericinin ikincil alıcıya farklı paketler göndererek iletim yapması ile ikincil sistem iletiminde süreklilik sağlanmıştır. Diğer taraftan yeni önerilen sistemde ikinci evrede ikincil verici, tüm kullanıcılara ileteceği birleşik işareti oluştururken güç paylaşırma çarpanı kullanmaktadır. Güç paylaşırma çarpanının uygun bir şekilde seçilmesi ile birincil sistem servis kesilme başarımı, spektrum paylaşımı olmayan duruma göre artarken aynı zamanda ikincil sistemin sürekli spektrum paylaşımı sağlanmıştır.

Önerilen tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağı ile [17]'deki sistemde, bilişsel rölenin enerji hasatlama alıcı yapısına sahip olduğu durumlar incelenmiştir. Bilişsel rölelerde TSR, PSR veya ASR enerji hasatlama protokolleri kullanılması durumunda sistemlerin birincil ve ikincil sistem servis kesilme olasılıkları ve verim ifadeleri elde edilmiştir. EH'lı sistemler ile EH'sız sistemlerin servis kesilme başarımları ve verimleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca EH'lı sistemlerde farklı enerji hasatlama protokollerinin uygulandığı durumlar için de sistemlere ait servis kesilme başarımları ve verimleri karşılaştırılmıştır. Başarım açısından enerji hasatlama protokollerinde ASR öne çıkarken, sistem olarak EH'lı tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağı öne çıkmıştır.

Çalışmanın buradan sonraki içeriği şu şekildedir: İkinci bölümde bilişsel radyo, bilişsel radyoda spektrum paylaşımı, spektrum erişim teknikleri ve işbirlikli iletişim ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Üçüncü bölümde enerji hasatlama ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir. Çevredeki RF işaretleri kullanarak eş zamanlı telsiz bilgi ve güç

aktarımından bahsedilmiştir. TSR, PSR ve ASR enerji hasatlama protokolleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu protokoller için röledeki alıcı mimarisi ve iletim blok yapısı açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, tam-çift yönlü iletim açıklanarak iki yönlü işbirlikli iletişim modeli üzerinde örneklendirilmiştir. [17]'deki tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağının sistem modeli tanıtılmış, protokol tanımı yapılmıştır. Uçtan uca SINR ifadeleri ve ulaşılabilir anlık hız eşitlikleri elde edilmiştir. Birincil ve ikincil sistem servis kesilme analizi ayrıntılı olarak yapılmıştır. Beşinci bölümde, yeni önerilen tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağının sistem modeli tanıtılmış ve protokol tanımı yapılmıştır. Her bir kullanıcının her bir evrede ileteceği işaretler tanımlanmış ve işaret-gürültü+girişim oranları elde edilmiştir. Ulaşılabilir anlık hız ifadeleri çıkarılarak iki yönlü birincil sistem servis kesilme olasılığı ile ikincil sistem servis kesilme olasılığı elde edilmiş ve elde edilen benzetim sonuçları [17]'deki sistem ile karşılaştırılmıştır. Altıncı bölümde, yeni önerilen tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağında ve [17]'deki sistemde bilişsel rölenin enerji hasatlama alıcı mimarisine sahip olduğu durum incelenmiştir. Her iki sistem için TSR, PSR veya ASR enerji hasatlama protokollerinin kullanılması durumunda birincil ve ikincil sistem servis kesilme olasılığı ve verim ifadelerinin kuramsal çıkarımı yapılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları ile farklı enerji hasatlama protokolleri için EH'lı sistemler ve ayrıca EH'lı ve EH'sız sistemler karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise, tez kapsamında elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında önerilerde bulunulmuştur.

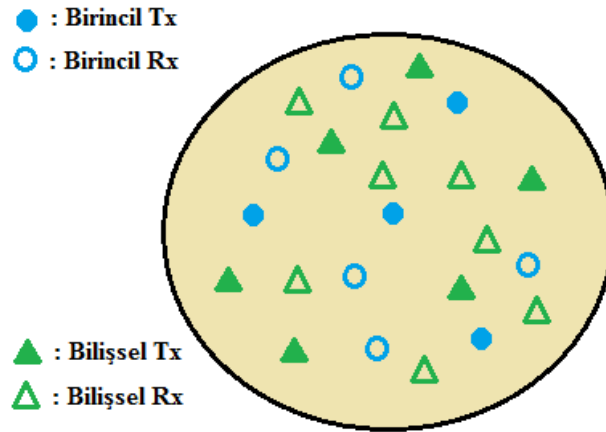


2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI VE İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM

2.1 Bilişsel Radyo Ağları

Telsiz iletişim teknolojilerinin hızlı ve sürekli olarak gelişmesiyle spektrumdaki band genişliğine olan gereksinim de artmaktadır. Mevcut spektrum yapısında birçok frekans bandı ülkelerin düzenleyici kuruluşları tarafından çeşitli servisler için lisanslanmıştır. Belirlenen az miktardaki lisanssız bandlar ise yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Örneğin lisanssız ISM bandları, Wi-Fi aygıtları tarafından kullanılmakta ve Wi-Fi aygıtlarının giderek artmasıyla bu frekans bandları hızlı bir şekilde dolmaktadır. Bunun yanında yapılan bazı çalışmalar lisanslı bandların zaman, frekans, ve coğrafik açıdan verimli bir şekilde kullanılmadığını göstermiştir [5]. İleride yaşanabilecek spektrum kıtlığını önlemek ve lisanslı spektrumdan daha fazla yararlanarak spektral verimliliği arttırmak için lisansız kullanıcıların dinamik olarak spektrumu sezmesini ve spektruma erişmesini sağlayan akıllı ve uyarlamalı telsiz aygıtlar yani bilişsel radyolar (cognitive radio) geliştirilmiştir. Bilişsel radyolar çalıştığı iletim ortamını sezerek en iyi iletim kanalını seçer ve iletim parametrelerini uyarlamalı olarak bu seçime göre ayarlar. Bilişsel radyo alıcı-verici yapısının yenilikçi karakteristiği, geniş frekans bandında eş zamanlı olarak sezme işlemini gerçekleştirebilen RF ön bloğudur.

Şekil 2.1’te örnek bir bilişsel radyo ağ modeli gösterilmiştir. Bilişsel radyo ağları

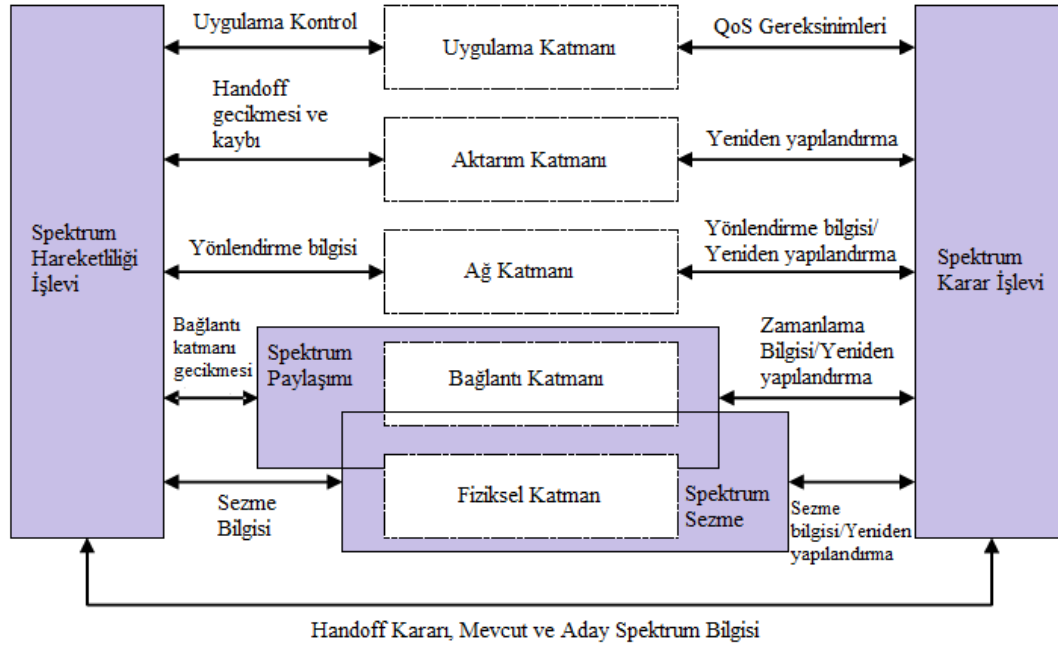


Şekil 2.1 : Bilişsel radyo ağ modeli.

birincil ağ (primary network) ve ikincil ağ (secondary network) olmak üzere iki farklı gruptan oluşmaktadır. Birincil ağı oluşturan birincil kullanıcılar (primary users-PU) spektrumun asıl sahibi olan lisanslı kullanıcılardır ve spektrumda öncelikli haklara sahiplerdir. İkincil ağı oluşturan ikincil kullanıcılar (secondary users-SU) diğer bir deyişle bilişsel radyolar ise lisanslı spektruma belirli koşullar altında erişebilen lisanssız kullanıcılardır. İkincil kullanıcılar birincil kullanıcıların başarımını iyileştirmeleri veya en azından kötü etkilememeleri koşulu ile lisanslı spektruma erişebilirler. Bunun yanında ikincil kullanıcılar kendi ilettikleri işaret için servis kalitesi (Qos) sağlamalıdır.

Bilişsel radyolar için spektrum yönetim süreci dört ana işlevle gerçekleşmektedir (Şekil 2.2). Bu işlevler sırasıyla spektrum sezme (spectrum sensing), spektrum kararı (spectrum decision), spektrum paylaşımı (spectrum sharing) ve spektrum hareketliliği (spectrum mobility) şeklindedir.

Bilişsel radyo, spektrumun lisanslı kullanıcılar tarafından kullanılmayan uygun kısımlarını kullanabilmektedir. Spektrum sezme işlevi ile ilk olarak bilişsel radyo mevcut lisanslı spektrumunu tarar ve spektrum boşluklarını belirler. Böylece birincil kullanıcının spektrumdaki etkinliği saptanmış olur.



Şekil 2.2 : Bilişsel radyolar için spektrum yönetim işlevleri.

Spektrum karar işlevi ile sezilerek saptanan spektrum boşluklarından ikincil kullanıcı servis kalitesi gereksinimlerini en iyi şekilde sağlayana karar verilir.

Spektrum paylaşım işlevi ile ağdaki birden fazla bilişsel radyonun aynı spektrum boşluğuna erişimi belirlenen spektrum paylaşım protokolü ile koordine edilir. Böylece bilişsel radyoların spektruma erişiminde çakışma önlenir.

İkincil kullanıcılar lisanslı spektrumda misafir olarak kabul edilir. Bilişsel radyo tarafından kullanılan belli bir spektrum bandı lisanslı kullanıcı tarafından kullanılmak istendiğinde, bilişsel radyo spektrumda kullandığı mevcut bandı lisanlı kullanıcıya bırakarak spektrumun uygun başka bir bandında iletimine devam eder.

2.2 Spektrum Paylaşımı

Telsiz iletişim kanallarının doğası gereği bilişsel kullanıcılar iletim yapacakları zaman iyi bir şekilde koordine olmalıdır. Bu durumdan ötürü spektrum paylaşım işlevi, MAC katmanı protokollerinin birçok işlevselliğini içerir. Bilişsel ağlar için spektrum paylaşımı, paylaşım mimarisine (architecture assumption), paylaşım davranışına (spectrum allocation behavior) ve spektrum erişim tekniğine (spectrum access technique) göre üç farklı yönden sınıflandırılabilir.

Spektrum paylaşımı, paylaşım mimarisine göre merkezi spektrum paylaşımı ve dağıtılmış spektrum paylaşımı olarak ikiye ayrılır. Merkezi spektrum paylaşımında spektrumun bandlarının bilişsel radyolara tahsis edilmesi ve spektruma erişim işlemleri merkezi birim tarafından kontrol edilir. Ayrıca, sezilen spektrum bandlarının her bir bilişsel radyoya en optimum şekilde tahsis edilme işlemini kolaylaştırmak için ağdaki her bir bilişsel radyo spektrum sezme ölçümlerini merkezi birime gönderebilir. Merkezi birim de bu ölçümlerden yararlanarak spektrum tahsis haritası oluşturabilir. Dağıtılmış spektrum paylaşımı altyapı kurulumunun tercih edilmediği durumlar için önerilmektedir. Merkezi birim olmadığı için bilişsel ağdaki her bir bilişsel radyo yerel olarak spektrum tahsisi ve erişiminden sorumludur.

Spektrum paylaşımı, paylaşım davranışına göre işbirlikli spektrum paylaşımı ve işbirlikli olmayan spektrum paylaşımı olmak üzere ikiye ayrılır. İşbirlikli spektrum paylaşımında her bir bilişsel radyonun iletim yaparken diğer bilişsel radyoları ne kadar etkilediği dikkate alınır. Diğer bir ifade ile her bir kullanıcıda ölçülen girişim değerleri

diğer kullanıcılar ile paylaşılır. Spektrum tahsis algoritmaları bu girişim değerlerinden yararlanılarak oluşturulur. Böylece spektrumdan daha verimli şekilde yararlanır. İşbirlikli olmayan spektrum paylaşımında ise sadece tek bir bilişsel radyoda ölçülen girişim değeri kullanılır ve bu spektrumun daha verimsiz bir şekilde kullanılmasına neden olur. Diğer yandan her bilişsel radyo ölçtüğü girişim değerlerini başka bir bilişsel radyo ile paylaşmayacağı için bilişsel radyolar arası veya bilişsel radyo ile merkezi birim arasında sıklıkla iletişim sağlanması gerekmez.

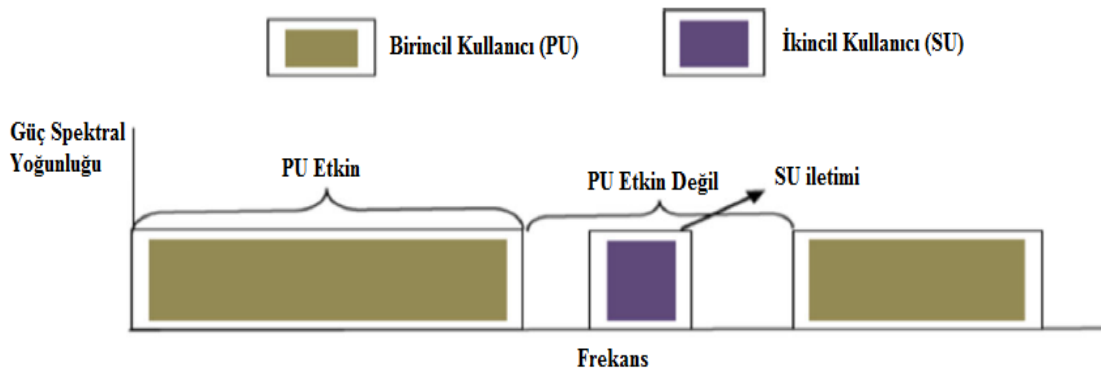
Bir sonraki bölümde spektrum erişim tekniklerine göre spektrum paylaşımı incelenecektir.

2.3 Spektrum Erişim Teknikleri

Bilişsel ağlarda gerçek zamanlı olarak birincil kullanıcıları etkilemeden, birden fazla ikincil kullanıcının mevcut spektruma erişmesi önemli bir konudur. İkincil kullanıcılar mevcut spektruma erişmek için üç farklı yöntem kullanabilmektedir: araya yerleştirme (interweave), altına serme (underlay) ve üstüne serme (overlay).

2.3.1 Araya yerleştirme

Araya yerleştirme yönteminde ikincil kullanıcılar, fırsatçı bir yaklaşımla spektrumda yoğunluğun çok az olduğu veya hiç bir birincil kullanıcı iletiminin olmadığı spektrum boşluklarından yararlanarak kendi işaretlerini iletirler (Şekil 2.3). Böylece ikincil kullanıcıların iletimi birincil kullanıcıların alıcılarında herhangi bir girişim oluşturmaz. Bu yöntemdeki en önemli zorluk birincil kullanıcıların spektrumdaki etkinliğinin ikincil kullanıcılar tarafından sezilmesi ve öngörülmesidir. Eğer birincil



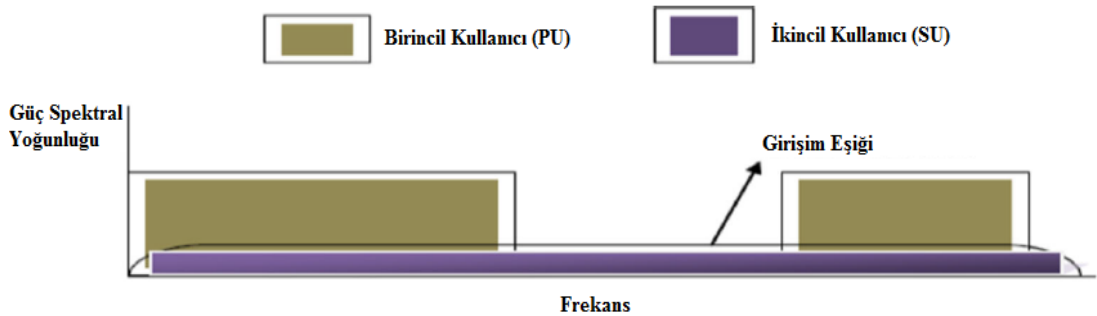
Şekil 2.3 : Araya yerleştirme spektrum erişim yöntemi.

kullanıcı spektrumu çok dinamik bir şekilde kullanıyorsa bu işlem daha da zorlaşmaktadır çünkü ikincil kullanıcıların verici donanımlarının çok hızlı ve çevik bir şekilde frekans bandları arasında anahtarlama yapması gerekir. Ayrıca bu işlem ikincil verici ve ikincil alıcı arasındaki mesafe arttığında da zorlaşmaktadır. Bunun nedeni ise ikincil verici ve ikincil alıcının birincil kullanıcının spektrumdaki etkinliğini farklı şekilde algılaması ve ikincil kullanıcıların sezdikleri spektrum boşluklarının arasındaki ilişkinin (korelasyonun) azalmasıdır. Bu durum ikincil sistemin spektrumdan yararlanma verimini düşürmektedir. Araya yerleştirme, TDMA, FDMA veya OFDM tabanlı telsiz iletişim sistemlerinde kullanılabilir [4].

2.3.2 Altına serme

Altına serme tekniğinde ikincil kullanıcılar, birincil kullanıcıların alıcılarında oluşan girişim düzeyinin belli bir eşiğin altında olması koşuluyla birincil kullanıcılarla eş zamanlı olarak iletim yapabilmektedir (Şekil 2.4). Bu eşik girişim sıcaklık (interference temperature) eşiği olarak tanımlanır ve birincil kullanıcıların iletişim başarımını etkilemeyen maksimum tolere edilebilir girişim düzeyidir. Bu eşiği geçmemek için ikincil verici donanımları, araya yerleştirme yöntemindeki gibi hızlı bir şekilde frekans bandları veya zaman dilimleri arasında geçiş yapmaktan ziyade, düşük SNR bölgesinde çalışabilmelidir. Bu durum genel olarak altına serme erişim tekniğini kullanan bilişsel radyoların düşük veri hızları veya yakın mesafe iletişim uygulamalarına daha uygun olduğunu göstermektedir.

Pratikte altına serme erişim yöntemini kullanan bilişsel radyolar, birincil kullanıcıları etkilememek için işaretlerini yayılı spektrum veya ultra-genişband işaret formatında iletmektedir. Yayılı spektrum tekniği ile ikincil vericilerden iletilecek işaretler daha yüksek bir veri hızına sahip yayma işareti sözde gürültü (pseudo noise-PN) kodu ile



Şekil 2.4 : Altına serme spektrum erişim yöntemi.

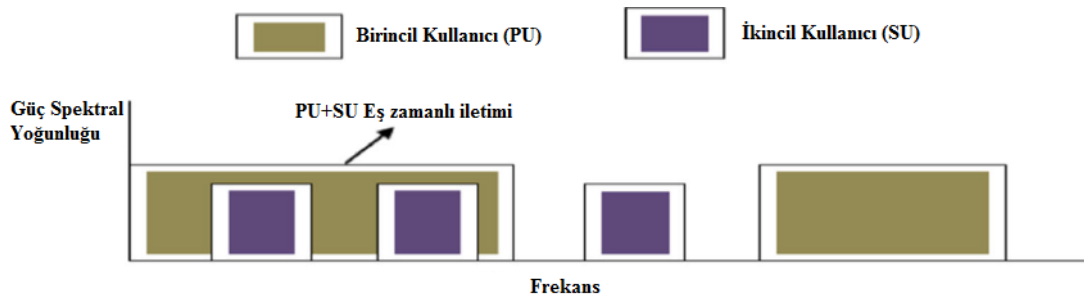
çarpılmakta ve band genişliği işaret frekans spektrumunda yayılmaktadır. Böylece ikincil kullanıcı işaretinin olasılık dağılım işlevi (cumulative distribution function-CDF) birincil kullanıcının gürültü CDF'sinin altında olur. İkincil işaretin güç spektral yoğunluğu gürültü tabanının (noise floor) altında olduğu sürece birincil kullanıcıların iletimi etkilenmez. İkincil alıcılarda spektrumda yayılmış olan ikincil işaret aynı PN kodu ile çarpılarak elde edilir.

Özetle bu yöntemde spektrum boşluklarının sezilmesi ve saptanmasından daha çok girişimden kaçınmak için girişim sıcaklık eşiğinin doğru saptanması önemlidir.

2.3.3 Üstüne serme

Üstüne serme spektrum erişim yönteminde ikincil verici, iletim gücünün büyük bir kısmını birincil işaretin iletimine yardımcı olmak için kullanır ve birincil alıcıda alınan işaretin işaret-gürültü+girişim oranında (SINR) iyileşme sağlar. Buna karşılık da gücünün diğer kalan kısmıyla kendi işaretini eş zamanlı olarak ikincil alıcıya gönderir (Şekil 2.5). Böylece, ikincil ve birincil kullanıcının aynı anda iletim yapmasıyla birincil alıcıda oluşan girişimden kaynaklanan SINR kaybı işbirlikli iletim ile giderilir. Diğer bir ifade ile girişim sıcaklık eşiği, altına serme yöntemine göre daha da arttırılmış olur. Bunun yanında birincil alıcıda uzaysal çeşitlilik de sağlanır. Burada ikincil vericide nasıl bir güç paylaşımı uygulandığı birincil alıcıdaki SINR değerini önemli ölçüde etkiler.

İşbirlikli iletim ile birincil işaretin iletimine yardımcı olan ikincil verici, birincil verici tarafından iletilen veri dizisine ve bu veri dizisinin nasıl kodlandığı bilgisine sahip olmalıdır. Ayrıca, ardışık girişim giderme (successive interference cancellation) veya kirli kağıt kodlaması (dirty paper coding) gibi ileri önkodlama teknikleri uygulanarak ikincil alıcıda, bilinen birincil işaretten kaynaklanan girişim giderilebilir.



Şekil 2.5 : Üstüne serme spektrum erişim yöntemi.

Bu yöntemin en önemli artısı, birincil alıcıların daha yüksek bir girişim sıcaklık eşiğine sahip olmasını sağlamasıdır. Bunun yanında birincil iletme yardımcı olmak için ikincil verici tarafından gönderilecek uygun işaret modelinin üretilmesi işlemi ikincil alıcı-verici tasarımlarını karmaşıktırmaktadır. Ayrıca ikincil vericinin başarılı bir şekilde birincil işaretleri saptayabilmesi için kanal durum bilgisine sahip olması gerekir. İkincil vericinin gücünün ne kadarını işbirliği için harcayacağını, ne kadarını kendi işaretinin iletimi için harcayacağını ayarlamak için güç kontrol mekanizması göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu tez kapsamında üstüne serme spektrum paylaşım yöntemi göz önüne alınacaktır.

2.4 İşbirlikli İletişim Protokolleri

Telsiz iletişim sistemlerinde vericiden gönderilen işaret, yansıma, kırılma, kırınım ve saçılma gibi etmenlerden dolayı alıcıda birden fazla yoldan alınabilir. Bu durum alıcıda çok-yollu sönümlemeye neden olur. Yani alıcıda işaretin farklı kopyaları farklı fazlarda alınır. Farklı fazlarda alınan bu işaretlerden bazıları birleştirilince kuvvetli bir işaret oluştururken bazıları ise birbirini sönümler. Çok-yollu sönümlemenin etkisini azaltmak ve iletim gücünü veya band genişliğini arttırmadan başarıyı arttırmak için çeşitleme teknikleri sıklıkla kullanılır. Çeşitleme ile işaret birbirinden bağımsız yollardan alıcıya gönderilebilir. Böylece birbirinden bağımsız yollardan gönderilen aynı işaretler farklı miktarda sönümleme etkisine maruz kalır. Bunun anlamı, alıcıda alınan işaretlerin tamamının derin sönümlemeye uğrama olasılığının azalması demektir.

Genel olarak çeşitleme yöntemi uygulanmış bir iletişim sisteminde başarı, alıcıda işaret örneklerinin nasıl birleştirildiğine bağlıdır. Çünkü birleştirme yöntemi alıcıda toplam alınan işaret-gürültü oranını etkilemektedir. Uygulama karmaşıklığı ve kanal durum bilgisi (Channel state information-CSI) düzeyine göre dört farklı birleştirme tekniği vardır. Bunlar, anahtarlama birleştirme (switched combining), seçmeli birleştirme (selection combining), eşit kazançlı birleştirme (equal-gain combining) ve en büyük oranlı (maksimum ratio combining-MRC) birleştirmedir.

Alıcı ve vericide birden fazla anten kullanan yapılar çok girişli çok çıkışlı (Multiple input multiple output-MIMO) sistemler olarak adlandırılır. MIMO sistemlerinin kullanılmasındaki amaç uzaysal çeşitleme sağlayarak çok-yollu sönümleme etkisini

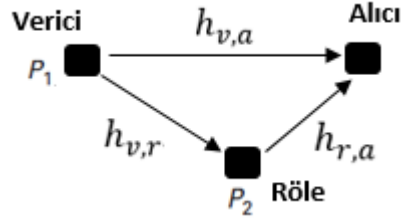
azaltmak ve alıcıda daha güçlü işaret alabilmektir. MIMO sistemler ile verici çeşitlemesi baz istasyonları için uygulanabilir bir senaryo olmasına karşın gezgin uç birimler için pratik bir çözüm değildir. Bunun nedeni, gezgin uç birimlerinde birden fazla anten taşımanın boyut, güç ve kullanılacak donanım açısından getirdiği kısıtlamalardır. Ayrıca, MIMO sistemlerde verici işaretlerinin ilişkisiz biçimde gönderilmesi için verici antenler arasında minimum yarım dalga boyu mesafe olmalıdır.

MIMO sistemlerin getirdiği kısıtlamaları aşmak için işbirlikli iletişim önerilmiştir. İşbirlikli iletişim ile vericide birden fazla anten kullanmak yerine alıcı ve verici arasındaki diğer bir veya birden fazla komşu düğümün anteninin kullanılmasıyla alıcıya işaretin birden fazla kopyası gönderilmektedir. Böylece anten sayısını arttırmak için diğer kullanıcılardan yardım alınmış olur. Diğer bir deyişle, diğer düğümlerin antenlerinin paylaşılmasıyla sanal çok antenli verici oluşturulmuş olur ve verici çeşitliliği sağlanır. Alıcı ve verici arasında işbirliği ile iletme yardım eden bu düğümler röle (relay) olarak adlandırılır. Röle vericiden aldığı işareti belli bir aktarma protokolü kullanarak işler ve alıcıya gönderir.

İşbirlikli iletişim ilk olarak 1970'lerde ortaya atılmıştır. [26]'da van der Meulen üç terminalli röle kanalı oluşturmuş ve röle kanal sığasının alt ve üst sınırlarının çıkarımlarını yapmıştır. Daha sonra [27]'de işbirlikli röle kanalının sığası bulunmuş ve iki işbirlikli röle prokolü çöz ve aktar (decode and forward-DF) ve sıkıştır ve aktar (compress and forward-CF) önerilmiştir. [28]'de Laneman 2000'li yılların başlarında yaptığı çalışmasında işbirlikli çeşitleme kavramını ilk olarak ortaya koymuş ve seçimli (selective) ve artımlı (incremental) aktarım gibi çeşitli işbirlikli iletişim protokolleri önermiştir. Laneman'ın yaptığı öncü çalışma ve telsiz iletişim sistemlerinin hızla gelişmesi işbirlikli iletişim alanında yapılan çalışmaları hızla arttırmıştır. İşbirlikli iletişim hakkında son on yılda çok sayıda makale yayınlanmış ve LTE-A (Long Term Evolution) Release 10'da gelecek nesil ticari telsiz iletişim sistemleri için anahtar teknoloji olarak kabul edilmiştir.

İşbirlikli iletişim modeli Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu ağ modelinde işaret vericiden alıcıya gönderilirken sadece tek bir rölenin iletme yardım ettiği kabul edilmiştir.

Sistemin çalışması iki dik evrede gerçekleşmektedir. Birinci evrede verici



Şekil 2.6 : İşbirlikli iletişim sistem modeli.

işaretini alıcıya iletirken aynı anda vericinin ilettiği işaret röle tarafından da alınır. İkinci evrede röle vericinin iletimine yardım ederek işareti belirli bir aktarma protokolü kullanarak işler ve alıcıya gönderir. Böylece iki farklı yoldan işaret alınmış olur ve uzaysal çeşitleme sağlanır. Burada verici ve röle işaretlerini sırasıyla P_1 ve P_2 güçleri ile yollamaktadır. Fakat kolaylık açısından $P_1 = P_2 = P$ kabul edilecektir. İlk evre sonunda sırasıyla alıcıda ve rölede alınan işaretler,

$$y_{v,a} = \sqrt{P}h_{v,a}x + n_{v,a} \quad (2.1)$$

$$y_{v,r} = \sqrt{P}h_{v,r}x + n_{v,r} \quad (2.2)$$

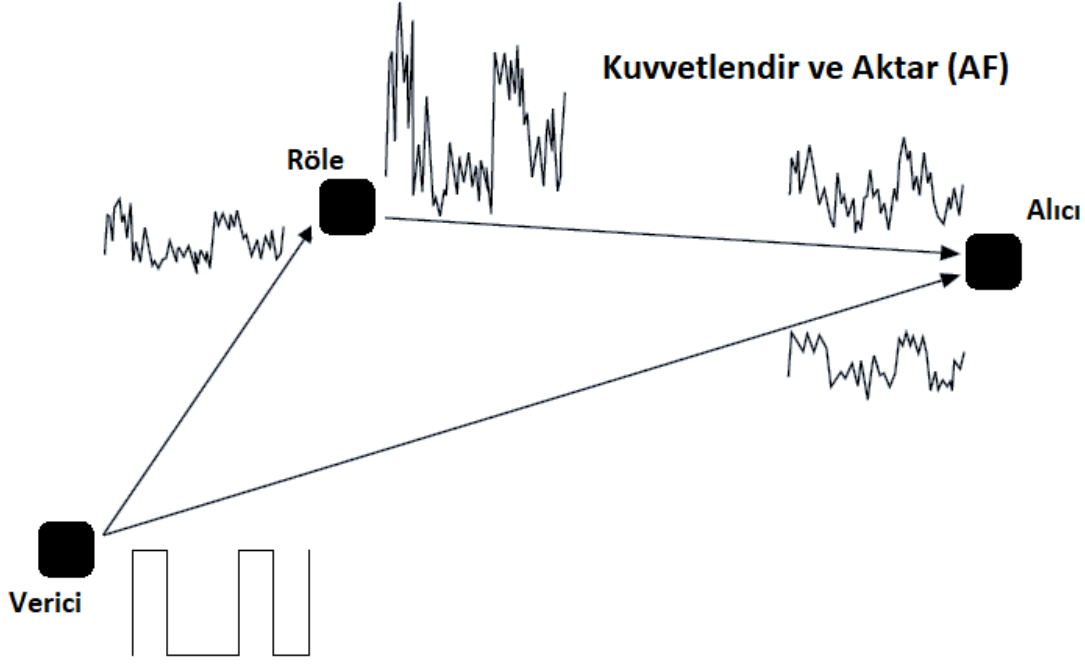
şeklinde elde edilir. Burada x verici tarafından gönderilen bilgi işaretini, $n_{v,a}$ ve $n_{v,r}$ ise alıcı ve röledeki AWGN gürültü örneğini göstermektedir. $h_{v,a}$, verici ile alıcı arasındaki kanal katsayısını, $h_{v,r}$ ise verici ile röle arasındaki kanal katsayısını göstermektedir. $h_{v,a}$ ve $h_{v,r}$ kanal katsayıları sıfır ortalamalı karmaşık Gauss rastlantı değişkenleri olup sırasıyla $\sigma_{v,a}^2$ ve $\sigma_{v,r}^2$ varyanslıdır. $n_{v,a}$ ve $n_{v,r}$ gürültü örnekleri ise sıfır ortalamalı ve σ^2 varyanslı karmaşık Gauss rastlantı değişkenleri olarak modellenmiştir. İkinci evrede alıcının röleden aldığı işaret,

$$y_{r,a} = h_{r,a}f(y_{v,r}) + n_{r,a} \quad (2.3)$$

şeklinde dir. Burada $f(.)$ işlevi, rölenin işareti hangi aktarma protokolünü kullanarak işlediğine bağlıdır. İşbirlikli iletişimde temel olarak iki aktarma protokolü kullanılmaktadır. Bunlar kuvvetlendir ve aktar ve çöz ve aktar protokolleridir.

2.4.1 Kuvvetlendir ve aktar

Temel olarak AF aktarma protokolünde vericiden alınan işaret, bir kuvvetlendirme katsayısı ile çarpılarak alıcıya gönderilir (Şekil 2.7). Bu protokolün avantajı basitliği



Şekil 2.7 : AF protokolü iletim modeli.

ve düşük maliyetidir. Dezavantajı ise rölede gürültünün de işaretle beraber kuvvetlendirilmesidir. Ayrıca rölede işaret çözülmeden vericiye gönderildiği için DF aktarma protokolüne göre daha hızlıdır.

Şekil 2.6'daki işbirlikli iletişim modeli için birinci evre sonunda alıcıda ve rölede alınan işaretler $y_{v,a}$ ve $y_{v,r}$ 'nin sırasıyla (2.1) ve (2.2)'deki gibi elde edildiği kabul edilsin. İkinci evrede, rölede alınan $y_{v,r}$ işareti, alınan ortalama güce göre normalleştirilmiş bir β kuvvetlendirme katsayısı ile kuvvetlendirilerek alıcıya gönderilir. Burada β kuvvetlendirme katsayısı,

$$\beta = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{v,r}|^2 + \sigma^2}} \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir. Rölenin kuvvetlendirme işlemi sonucunda göndereceği işaret $x_r = \beta y_{v,r}$ şeklinde oluşturulur. Böylece ikinci evre sonunda röle tarafından gönderilen işaret alıcıda,

$$y_{r,a} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{v,r}|^2 + \sigma^2}} h_{r,a} y_{v,r} + n_{r,a} \quad (2.5)$$

olarak elde edilir. (2.2)'deki $y_{v,r}$ eşitliği (2.5)'te yerine konursa,

$$y_{r,a} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{v,r}|^2 + \sigma^2}} \sqrt{P}h_{r,a}h_{v,r}x + n'_{r,a} \quad (2.6)$$

elde edilir. Burada $h_{r,a}$ röle ile alıcı arasındaki kanal katsayısıdır ve düz Rayleigh sönümlenmeli kanal olarak modellenmiştir. $n_{r,a}$ ise alıcıdaki toplamsal beyaz Gauss gürültü örneğidir. Burada,

$$n'_{r,a} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{v,r}|^2 + \sigma^2}} h_{r,a}n_{v,r} + n_{r,a} \quad (2.7)$$

olarak ifade edilir. Alıcıda hem röleden hem de vericiden gönderilen işaretler MRC birleştirme yöntemi kullanılarak birleştirilir.

2.4.2 Çöz ve aktar

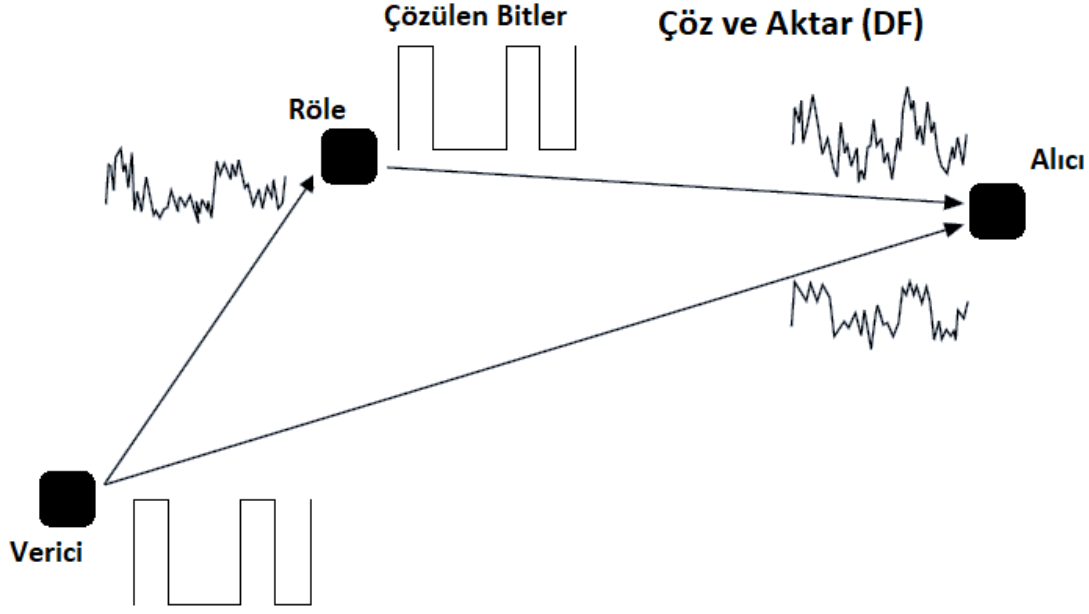
DF aktarma protokolünde vericiden gönderilen işaret röle tarafından çözülür. Ardından çözülen işaretin temiz bir kopyası alıcıya gönderilir (Şekil 2.8). Röle’de alınan işaret çözüldüğü için gürültü ve girişim gibi bozucu etkiler giderilmektedir. Şekil 2.6’daki işbirlikli iletişim modeli için birinci evre sonunda alıcıda ve rölede alınan işaretler $y_{v,a}$ ve $y_{v,r}$ ’nin sırasıyla (2.1) ve (2.2)’deki gibi elde edildiği kabul edilsin. İkinci evrede rölede en büyük olabilirlikli karar kuralı kullanılarak $\hat{x}$ işaretine,

$$\hat{x} = \underset{x}{\operatorname{argmin}} |y_{v,r} - \sqrt{P}h_{v,r}x|^2 \quad (2.8)$$

eşitliği ile karar verilir. Daha sonra $\hat{x}$ işareti tekrar oluşturularak alıcıya gönderilir. Verici ile alıcı arasındaki karşılıklı bilgi miktarı verici-röle kanalı ile birleştirilmiş röle-alıcı ve verici-alıcı kanalları arasından zayıf olan ile sınırlanmıştır. Çöz ve aktar iletim modeli için maksimum ortalama karşılıklı bilgi miktarı sönümleme kanal katsayıları cinsinden $\eta = P/\sigma^2$ olmak üzere,

$$I_{DF} = \frac{1}{2} \min \left\{ \log \left(1 + \eta |h_{v,r}|^2 \right), \log \left(1 + \eta |h_{v,a}|^2 + \eta |h_{r,a}|^2 \right) \right\} \quad (2.9)$$

şeklinde elde edilir. (2.9) eşitliğinde ilk terim, rölenin güvenilir bir şekilde bilgi işaretini çözebileceği maksimum hızı gösterirken, ikinci terim ise alıcının iki farklı yoldan gelen bilgi işaretini güvenilir bir şekilde çözebileceği maksimum hızı göstermektedir.



Şekil 2.8 : DF protokolü iletim modeli.

DF aktarım modeli için servis kesilme durumu $I_{DF} < R$, R spektral verimlilik olmak üzere,

$$\min \left\{ |h_{v,r}|^2, |h_{v,a}|^2 + |h_{r,a}|^2 \right\} < \frac{2^{2R} - 1}{\eta} \quad (2.10)$$

eşitsizliğiyle belirlenir. Tüm kanalların düz Rayleigh sönmülemeli olduğu durum için servis kesilme olasılığı,

$$\begin{aligned} \Pr[I_{DF} < R] &= \Pr \left\{ |h_{v,r}|^2 < \frac{2^{2R} - 1}{\eta} \right\} + \Pr \left\{ |h_{v,r}|^2 \geq \frac{2^{2R} - 1}{\eta} \right\} \\ &\quad \Pr \left\{ |h_{v,a}|^2 + |h_{r,a}|^2 < \frac{2^{2R} - 1}{\eta} \right\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

olarak hesaplanır. (2.11) eşitliğinde her iki taraf $\frac{\eta}{2^{2R}-1}$ ile çarpılıp $\eta \rightarrow \infty$ için limit alındığında yüksek SNR'da servis kesilme olasılığı,

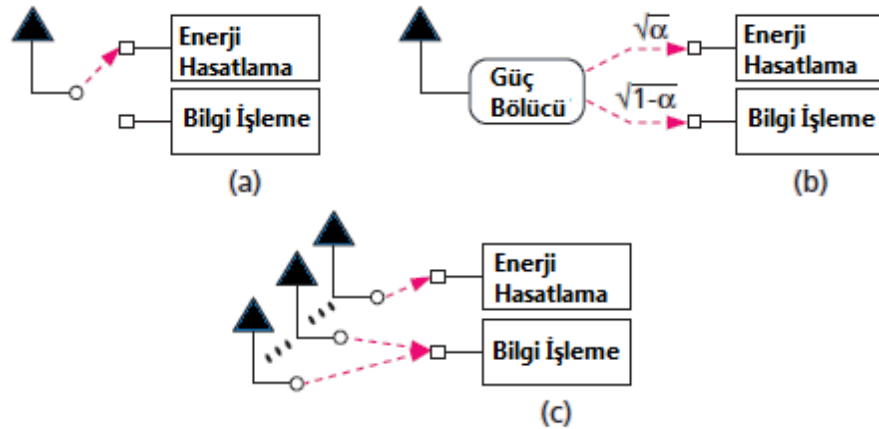
$$\Pr[I_{DF} < R] \cong \frac{1}{\sigma_{v,r}^2} \frac{2^{2R} - 1}{\eta} \quad (2.12)$$

olarak elde edilir. (2.12) eşitliğindeki $\frac{1}{\eta}$ davranışı yüksek SNR'da kod çöz ve aktar modelinin çeşitleme kazancı olmadığını göstermektedir [28]. Bunun nedeni rölenin işareti doğru çözme gerekliliğidir ki bu durum kod çöz ve aktar modelinin başarımını verici ile röle arasındaki kanalın başarımıyla sınırlamaktadır.

3. ENERJİ HASATLAMA

Geleneksel telsiz iletişim sistemlerinde uç birimleri, sahip oldukları sınırlı enerji kaynaklarından dolayı belirli çalışma sürelerine sahiptir. Bundan dolayı ağ iletişimini sürdürmek amacıyla gezgin uç birimleri periyodik olarak batarya şarjına veya değişimine gereksinim duyar. Fakat bu işlem ağda çok sayıda uç birim bulunmasından dolayı maliyetli ve çevresel-fiziksel koşullardan dolayı elverişsiz olmaktadır. Diğer yandan telsiz iletişim sistemlerinin gelişmesiyle telsiz aygıtların başarımı artmakta ve bu durum beraberinde daha yüksek bir batarya kapasitesi gerektirmektedir. Düşük maliyetle telsiz iletişim sistemlerinin çalışma sürelerini arttırmak için ilk olarak rüzgar, güneş ışığı ve titreşim gibi çevresel kaynaklardan enerji hasatlama fikri ortaya atılmıştır. Fakat doğal kaynaklardan hasatlanan enerji rastlantısaldır ve büyük ölçüde hava koşulları gibi kontrol edilemeyen etmenlere bağlıdır. Bu durum güvenilir iletişimi zorlaştırmaktadır. Bu probleme yeni bir çözüm olarak uç birimlerin ortamdaki RF elektromanyetik dalgalardan enerji hasatlaması fikri önerilmiştir. RF işaretlerin aynı anda hem bilgi hem de enerji taşıması (simultaneous wireless information and power transfer-SWIPT) sayesinde, uç birimlerinde alınan işaretlerden hem bilgi işlenebilmekte hem de enerji hasatlanabilmektedir. Hasatlanan enerji ile telsiz ağlardaki uç birimleri dış enerji kaynağına gereksinim duymadan çalışabilmektedir.

Doğrudan iletim mümkün olmayan işbirlikli iletişim ağlarında röle, enerji



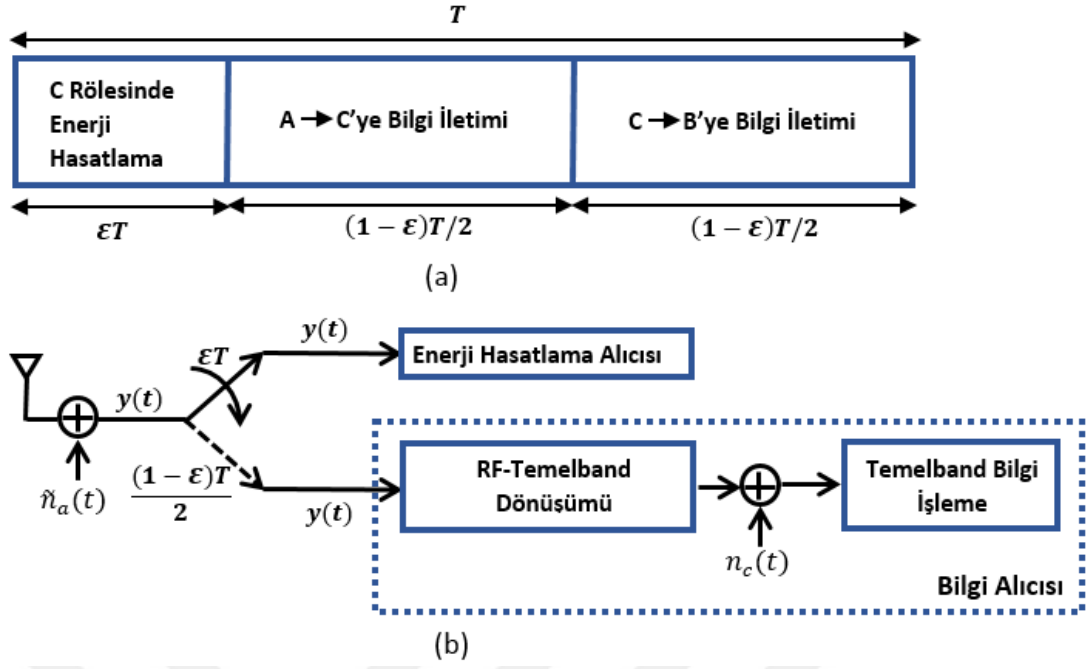
Şekil 3.1 : Enerji hasatlama protokolleri: (a) TSR; (b) PSR; (c) ASR.

kaynağından bağımsız çalışabilmesi durumunda sahip olduğu alıcı yapısına bağlı olarak belirli protokole göre enerji hasatlamakta ve bilgi işlemektedir. Pratikte rölede alınan işaretin tamamından aynı anda hem enerji hasatlama hem de bilgi işleme mümkün değildir dolayısıyla SWIPT'in uygulanabilmesi için rölede alınan işaret enerji hasatlama ve bilgi işleme için iki parçaya ayrılır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi enerji hasatlama protokolleri, işaretin alıcıda hangi boyutta ikiye ayrıldığına bağlı olarak temelde üçe ayrılabilir. Bunlar sırasıyla zaman anahtarlama aktarım (time switching relaying-TSR), güç bölmeli aktarım (power splitting relaying-PSR) ve anten anahtarlama aktarım (antenna switching relaying-ASR)'dir. Ayrıca, işaretin alıcıda ne kadarlık kısmının enerji hasatlama ve ne kadarlık kısmının bilgi işleme için ayrıldığına bağlı olarak hasatlanan güç ve uçdan uca sistem başarımı arasında daima bir ödünleşim vardır.

3.1 Zaman Anahtarlama Aktarım

TSR protokolünde, röledeki alıcı bilgi işleme ve enerji hasatlama arasında zamanda anahtarlama yapmaktadır. Diğer bir deyişle herhangi bir zaman diliminde alınan işaret ile enerji hasatlama veya bilgi işleme yapılabilir. TSR protokolünün en önemli dezavantajı belirli zaman dilimlerinin sadece enerji hasatlamaya tahsis edilmesi ve bu durumun bilgi iletiminde süreksizliğe neden olmasıdır. Ayrıca bu yöntem, alıcıda karmaşık olmayan donanımlar kullanılarak gerçekleştirilebilir fakat hassas zaman eşzamanlaması sağlanmalıdır [29]. Eğer zaman eşzamanlaması iyi bir şekilde sağlanamaz ise enerji hasatlama için kullanılması amaçlanan işaret bilgi işleme için, bilgi işleme için amaçlanan işaret ise enerji hasatlama için kullanılabilir. Bu durum önemli bilgi kaybına neden olabilir.

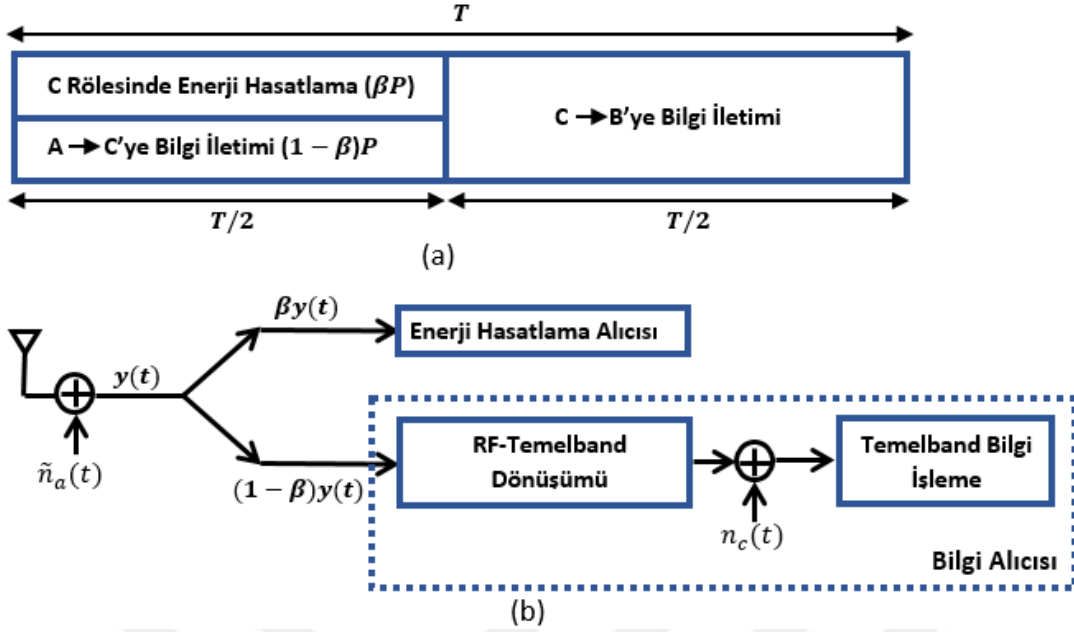
Şekil 3.2(a)'da TSR protokolü için iletim blok yapısı gösterilmiştir. Burada blok iletim süresi T , röle işbirliği ile A kullanıcısından B'ye gönderilen belli uzunluktaki bilgi bloğunun iletim süresini göstermektedir. ε ise $0 < \varepsilon < 1$ olmak üzere rölenin T blok süresinin ne kadarlık kısmında enerji hasatlayacağını belirten zaman bölme çarpanıdır. Diğer bir ifadeyle C rölesi εT süresi kadar enerji hasatlamakta geriye kalan $(1 - \varepsilon)T$ sürede, $(1 - \varepsilon)T/2$ 'lık kısmı A'dan C'ye ve diğer $(1 - \varepsilon)T/2$ 'lık kısmı ise C'den B'ye olmak üzere bilgi iletimi yapılmaktadır. Burada εT süresince hasatlanan toplam enerji, rölenin C'den B'ye bilgi işaretini $(1 - \varepsilon)T/2$ 'lık sürede belirli bir



Şekil 3.2 : (a) TSR protokolü iletim blok yapısı; (b) TSR protokolü için röle alıcı yapısı.

işbirlikli iletişim protokolü kullanarak aktarımında kullanılmaktadır. Ayrıca, ε çarpanının seçildiği değer, sistem servis kesilme başarımını, sistem verimini ve C’de hasatlanan enerjiyi doğrudan etkilemektedir. ε çarpanı arttırıldığında C’de hasatlanan enerji artarken sistem verimi düşmektedir. ε çarpanı azaltıldığında ise tam tersi durum geçerlidir. TSR protokolü kullanan her iletişim sistemi için sistem veriminin maksimum olduğu bir optimum ε değeri vardır. Örneğin, [22]’de kaynak, röle ve hedeften oluşan bir işbirlikli iletişim sisteminde rölenin AF aktarma protokolü kullanması durumunda $\sigma_a^2 = 0.01$ için optimum ε değeri 0.28 olarak bulunmuştur. Burada σ_a^2 alıcı antende oluşan AWGN örneğinin ortalama gücüdür.

Şekil 3.2(b)’de TSR protokolü için röledeki alıcı yapısı gösterilmiştir. Alınan $y(t)$ RF işareti ilk olarak εT süresi boyunca enerji hasatlama alıcı birimine iletilmektedir. Ardından zaman anahtarlama ile $(1 - \varepsilon)T/2$ süresi boyunca bilgi işleme alıcı birimi $y(t)$ işaretini almaktadır. Burada $y(t)$ işareti, alıcı anteninden dolayı bozucu dar bantlı $\tilde{n}_a(t)$ AWGN gürültüsünden etkilenmektedir. Enerji hasatlama alıcısı $y(t)$ RF işaretini doğrultarak (rectify) doğru akım ile bataryayı şarj etmektedir. Enerji hasatlama alıcısı hakkında daha ayrıntılı bilgi için [30]’a bakılabilir. Bilgi işleme alıcısında ilk olarak RF işaretinin temelbanda dönüştürülmesi için alt çevrim (down-convert) işlemi gerçekleştirilir. Alt çevrim işlemi sonucunda bozucu $n_c(t)$ gürültüsü



Şekil 3.3 : (a) PSR protokolü iletim blok yapısı; (b) PSR protokolü için röle alıcı yapısı.

oluşur. Daha sonra $n_c(t)$ gürültüsü eklenen temelband işareti örneklenir ve belirli işbirlikli iletişim protokolüne bağlı olarak işlenir.

3.2 Güç Bölmeli Aktarım

PSR protokolünde rölede alınan işaret, alıcıdaki güç bölme devresi ile farklı güç seviyesinde iki işarete bölünür. Farklı güçteki bu işaretlerden biri enerji hasatlama için kullanılırken diğeri bilgi işleme için kullanılır. PSR'daki alıcı yapısı uygun güç bölme devre gereksiniminden dolayı TSR'a göre donanım açısından daha karmaşıktır. Ayrıca, TSR protokolünün aksine PSR protokolünde aynı zaman diliminde hem enerji hasatlama hem de bilgi işleme yapılmaktadır. Bundan dolayı düşük gecikme ile çalışması gereken iletişim sistemleri için TSR yerine PSR protokolünü kullanmak daha uygundur.

Şekil 3.3(a)'da PSR protokolü için iletim blok yapısı gösterilmiştir. Burada blok iletişim süresi T , alınan işaretin gücü P ile belirtilmiştir. T 'nin ilk $T/2$ 'lik kısmı aynı anda hem A kaynağından C rölesine bilgi iletimi hem de enerji hasatlama için kullanılırken diğeri $T/2$ 'lik kısım C rölesinden B hedef kullanıcıya bilgi iletimi için kullanılmaktadır. β ise $0 < \beta < 1$ olmak üzere rölede alınan işaretin gücü P 'nin ne kadarlık kısmının enerji hasatlama için kullanılacağını gösteren güç bölme çarpanıdır.

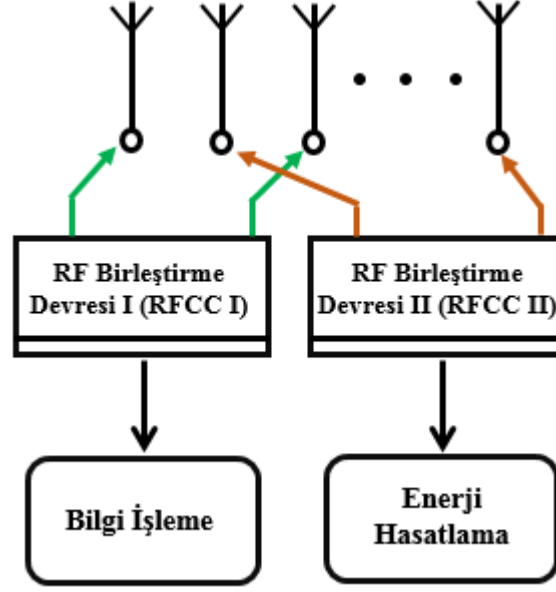
Diğer bir ifadeyle ilk $T/2$ 'lik sürede βP güçlü işaret enerji hasatlama için, $(1 - \beta)P$ güçlü işaret ise bilgi işleme için kullanılmaktadır. İlk $T/2$ 'lik sürede hasatlanan toplam enerji, C'de belli bir işbirlikli iletişim protokolü kullanılarak işlenmiş olan bilgi işaretinin ikinci $T/2$ 'lik sürede B'ye iletilmesi için kullanılmaktadır. Ayrıca, β güç bölme çarpanının seçildiği değer, sistem servis kesilme başarımını ve C'de hasatlanan enerjiyi doğrudan etkilemektedir. PSR protokolü kullanan iletişim sistemi için sistem veriminin maksimum olduğu bir optimum β değeri mevcuttur. Örneğin, [22]'de kaynak, röle ve hedeften oluşan bir işbirlikli iletişim sisteminde rölenin AF aktarma protokolü kullanması durumunda $\sigma_a^2 = 0.01$ için optimum β değeri 0.63 olarak bulunmuştur. Burada σ_a^2 alıcı antende oluşan AWGN örneğinin ortalama gücüdür.

Şekil 3.3(b)'de PSR protokolü için röledeki alıcı yapısı gösterilmiştir. P gücündeki alınan $y(t)$ işaretinin gücünün β ile orantılı olan kısmı enerji hasatlama alıcısına gönderilirken $(1 - \beta)$ ile orantılı olan kısmı bilgi işleme alıcısına gönderilir. Burada $y(t)$ işareti, alıcı antenden dolayı bozucu dar bantlı $\tilde{n}_a(t)$ AWGN gürültü etkisini içermektedir. Bilgi işleme alıcısında alt çevrim işlemi ile $y(t)$ işareti temelbanda indirilir. Alt çevrim işleminden dolayı bozucu $n_c(t)$ gürültüsü oluşur. $n_c(t)$ gürültüsü eklenen temelband işaret örneklenir ve belirli işbirlikli iletişim protokolüne bağlı olarak işlenir.

3.3 Anten Anahtarlama Aktarım

ASR protokolünde, rölede çoklu anten konfigürasyonundan yararlanılır. Anten domeninde SWIPT'i sağlamak için her bir anten elemanında bilgi işleme/enerji hasatlama işlemleri arasında dinamik olarak anahtarlama yapılmaktadır.

Tek antenli kaynak A, çok antenli C rölesi ve tek antenli B hedef kullanıcılarından oluşan bir işbirlikli iletişim sisteminde A'dan B'ye iletişimin sadece C rölesi üzerinden iki evrede gerçekleştiği kabul edilsin. A kullanıcısının P_S gücü ile her bir kanal kullanımı için R bit iletim yaptığı ve C rölesinin $I = \{1, 2, \dots, N\}$ anten grubunu oluşturan N adet antene sahip olduğu varsayılın. Burada C rölesi anten anahtarlama alıcı yapısına sahiptir ve $U \subseteq I$ olmak üzere U anten grubu bilgi işleme için, geriye kalan antenlerin oluşturduğu U^C anten grubu ise enerji hasatlama için kullanılmaktadır. Spesifik olarak her bir antenin çıkışı Şekil 3.4'de görüldüğü gibi iki farklı RF birleştirici devresinden (RF Combining Circuit-RFCC) birine bağlanır.



Şekil 3.4 : ASR protokolü için röle alıcı yapısı.

RFCC I, bilgi iletimi için kullanılan kanalların birleştirilmesi (Ör: MRC) için kullanılırken, RFCC II, RF'den DC'ye çevrim için kullanılan kanalların birleştirilmesi için kullanılmaktadır. Ayrıca C rölesinin dış enerji kaynağına sahip olmadığı ve RF enerji hasatlama yeteneği sayesinde hasatladığı enerjiyi ikinci evrede bilgi işaretini hedefe iletmek için kullandığı kabul edilsin. Bu durumda ilk evre sonunda RFCC I çıkışındaki birleştirilmiş SNR,

$$\gamma_{C_I} = P_S \sum_{i \in U} |h_{A,i}|^2 \quad (3.1)$$

olarak bulunmaktadır. Burada $h_{A,i}$ A kaynağı ile C rölesindeki i . anten arasındaki kanalın sönmüleme katsayısını göstermektedir ve i . anten'in i . kuvvetli kanal olduğu $|h_{A,1}|^2 \geq |h_{A,2}|^2 \geq |h_{A,i}|^2 \geq \dots \geq |h_{A,N}|^2$ kabul edilmiştir. Burada RFCC I çıkışındaki birleştirilmiş işaret belirli bir işbirlikli iletişim protokolü kullanılarak işlenir. RFCC II çıkışındaki birleştirilmiş güç,

$$\gamma_{C_E} = P_S \sum_{i \in U^c} |h_{A,i}|^2 \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir. C rölesinin işlenen işareti hedefe iletmek için kullanacağı, ilk evrede toplam hasatlanan güç ise,

$$P_R = \eta \gamma_{C_E} \quad (3.3)$$

olarak ifade edilir. (3.3)'deki η enerji dönüşüm verimini göstermektedir. İkinci evrede, rölenin P_R gücü ve N adet anten kullanarak MISO (Multiple input single output) hüzmleme (beamforming) tekniği ile iletim yaptığı kabul edildiğinde B hedef düğümünde alınan işaret ve elde edilen SNR sırasıyla,

$$y_B = \|\mathbf{h}_{C,B}\| x_c + n_b \quad (3.4)$$

$$\gamma_B = P_R \|\mathbf{h}_{C,B}\|^2 \quad (3.5)$$

şeklindedir. Burada $\mathbf{h}_{C,B} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, C ile B arasındaki linke ait kanal sönümleme katsayıları vektörünü göstermektedir. n_b ise sıfır ortalamalı birim varyanslı AWGN gürültü terimidir.

Anten anahtarlama alıcı yapısına sahip enerji hasatlamalı sistemlerde hangi antenin enerji hasatlayacağı hangi antenin bilgi işleme için kullanılacağı ile ilgili literatürde çeşitli anten atama yapıları önerilmiştir. Bunlar sırasıyla PS tabanlı optimum yapı (Power splitting-based optimal scheme), ikili knapsack optimum yapı (Binary knapsack optimal scheme) ve GSC tabanlı atama yapısı (Generalized selection combiner-based assignment scheme)'dır [25].

PS tabanlı optimal yapıda C rölesindeki her bir anten güç bölmeli enerji hasatlama yöntemine göre çalışmaktadır. Diğer bir ifade ile $0 < \beta_i < 1$ olmak üzere i . antende hasatlanan toplam enerjinin $(1 - \beta_i) \times \%100$ 'lük kısmı RFCC I (bilgi işleme) tarafından kullanılırken $\beta_i \times \%100$ 'lük kısım RFCC II (enerji hasatlama) tarafından kullanılır. Bu yapının gerçekleşmesi için her bir anten çıkışının aynı anda hem RFCC I hem de RFCC II'ye bağlı olması gerekir. Bu durum pratikte yüksek karmaşıklıkla alıcı yapısına neden olmaktadır ve her bir iletim çerçevesinde (iki iletim evresi) β_i 'nin belirlenmesi için optimizasyon işlemi gereklidir.

İkili “knapsack” optimal yapısında ise C rölesindeki her bir anten ya enerji hasatlama ya da bilgi işleme yapmaktadır. Bu durumda B hedef düğümünde işaretin doğru çözülebilmesini sağlamak için $a_i \in \{0,1\}$ olmak üzere,

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} a_i |h_{A,i}|^2 &\geq U_1 \\ \sum_{i \in I} (1 - a_i) |h_{A,i}|^2 &\geq U_2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

kısıtları sağlanmalıdır. Burada $U_1 = \frac{2^{2R-1}}{P_s}$ ve $U_2 = \frac{2^{2R-1}}{\eta P_s \|h_{C,B}\|^2}$ dir. I , C rölesindeki anten grubunu belirtmektedir ve i , 1’den N ’e kadar değerler almaktadır. (3.6) daha da basitleştirildiğinde,

$$U_1 \leq \sum_{i \in I} a_i |h_{A,i}|^2 \leq U_3 \quad (3.7)$$

elde edilir. Burada $U_3 = \sum_{i \in I} |h_{A,i}|^2 - U_2$ ’dir. (3.7)’deki ifade yeniden formüle edildiğinde,

$$\begin{aligned} & maks \sum_{i \in I} a_i w_i \\ & \sum_{i \in I} a_i w_i \leq U_3 \end{aligned} \quad (3.8)$$

şeklini alır. Burada $w_i = |h_{A,i}|^2$ olmak üzere her bir iletim çerçevesi için a_i ’nin optimum değerinin bulunması gerekmektedir. (3.8)’deki optimizasyon problemi knapsack ismiyle formülleştirilmiş olup dinamik programlama ile çözülmektedir [31].

Hem PS tabanlı hem de ikili knapsack optimal yapıları optimizasyon problemlerinden dolayı yüksek karmaşıklık içermektedir. Bundan dolayı genelleştirilmiş seçmeli birleştirme (GSC) ilkesini kullanan düşük karmaşıklığa sahip anten anahtarlama mekanizmaları önerilmiştir [25]. Daha belirgin olarak ifade edilirse, röledeki N tane antenden her biri kaynak düğümü ile aralarındaki kanalların gücüne bağlı olarak iki RFCC devresine bağlanmaktadır. GSC tabanlı atama yapısı iki farklı ilkede uygulanabilir. Bunlar sırasıyla GSC-bilgi (GSC Information-GSCI) ve GSC-enerji (GSC Energy-GSCE)’dir.

GSCI yapısında RFCC I devresi önceliklendirilmekte yani kuvvetli kanallar bilgi işleme için kullanılmaktadır. Kaynak düğümü ile aralarında en güçlü kanallara sahip röledeki L tane antenin çıkışı RFCC I’e bağlanırken geriye kalan $(N - L)$ anten RFCC II’ye bağlanmaktadır. GSCI yapısı yüksek enerji dönüşüm verimine η sahip uygulamalar için daha uygundur. Ayrıca bu yapı için ilk evredeki çeşitleme kazancı uçtan uca başarımı etkileyen en önemli ölçüttür.

GSCE yapısında ise RFCC II devresi önceliklendirilmekte yani kuvvetli kanallar enerji hasatlama için kullanılmaktadır. Kaynak düğümü ile aralarında en güçlü kanallara sahip röledeki L tane antenin çıkışı RFCC II’e bağlanırken geriye kalan $(N -$

L) anten RFCC I'ye bağlanmaktadır. GSCE yapısı düşük enerji dönüşüm verimine η sahip uygulamalar için daha uygundur. Ayrıca bu yapı için ikinci evrede kullanılmak üzere L antenden hasatlanan enerji uçtan uca başarımı etkileyen en önemli ölçüttür.

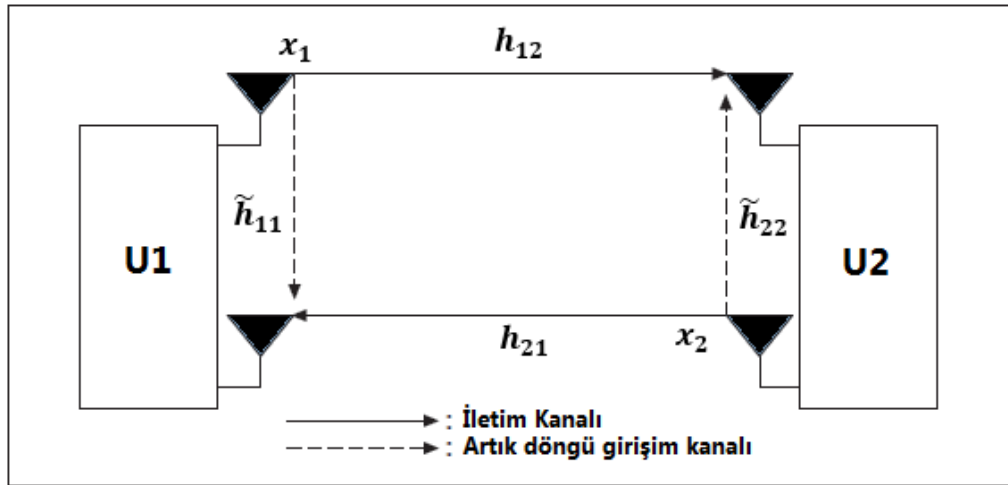




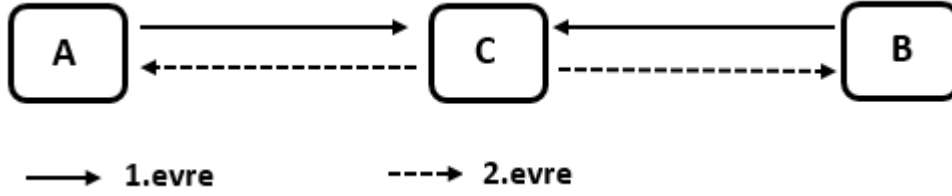
4. TAM-ÇİFT YÖNLÜ BİLİŞSEL RÖLE AĞLARI

4.1 Tam-Çift Yönlü Aktarım

Literatürde yapılan çalışmalarda işbirlikli iletişim tekniğini kullanan telsiz iletişim sistemlerinde rölenin genel olarak yarı-çift yönlü (half-duplex) olarak çalıştığı kabul edilmiş ve buna göre başarımlar incelenmiştir. Fakat röle yarı-çift yönlü olarak iletişim yaptığı için işaret gönderme ve alma işlemi frekans veya zaman domeninde birbirine dik kanallar ile gerçekleşmektedir. Bu durum toplam ergodik kanal kapasitesinin ancak yarısının kullanılmasına neden olmaktadır. Yarı-çift yönlü sistemlerin spektral verimlilik açısından oluşturduğu bu problemi aşmak için tam-çift yönlü (full-duplex) olarak çalışan röleli sistemler önerilmiştir. Şekil 4.1'deki tam-çift yönlü aktarım modunda röle aynı zaman aralığında ve aynı frekansta hem verici uçtan gelen işareti almakta hem de alıcı uca işaret göndermektedir [9]. Tam-çift yönlü iletişim yapan radyolarda alınan ve gönderilen işaretlerin birbirine karışmaması amacıyla alma gönderme işlemi farklı antenler ile sağlanmaktadır. Kuramsal olarak tam-çift yönlü aktarım ile spektral verimlilik yarı-çift yönlü iletişime göre iki kat artabilmektedir fakat röledeki RF verici ve alıcı birimlerinin aynı anda çalışmasından dolayı röle üzerinde artık döngü girişimi (residual loop interference-RLI) oluşmaktadır. Diğer bir deyişle röle kendi alıcısında, vericiden gelen işaret ve AWGN'ye ek olarak artık döngü girişim



Şekil 4.1 : Tam-çift yönlü iletişim modeli.



Şekil 4.2 : İki yönlü işbirlikli iletişim modeli.

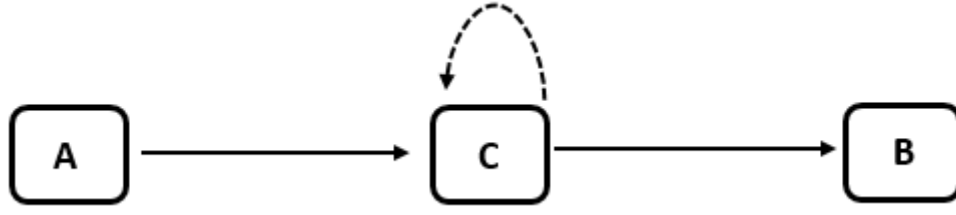
işareti de almakta ve bu girişimden dolayı başarım kötüleşmektedir. Şekil 4.1'deki sistemde U1'den U2'ye olan kanal sönümleme katsayısı h_{12} ve U2'den U1'e olan kanal sönümleme katsayısı h_{21} ile gösterilmiştir. Ayrıca U1 ve U2'nin tam-çift yönlü çalışmasından dolayı oluşan artık döngü girişim kanal katsayıları sırasıyla $\tilde{h}_{11}$ ve $\tilde{h}_{22}$ olarak belirtilmiştir. Birim güçle iletim yapan U1 ve U2 kullanıcılarının x_1 ve x_2 işaretlerini gönderdikleri varsayılmıştır. U1 ve U2 kullanıcılarında işaretler sırasıyla,

$$y_1 = h_{21}x_2 + \tilde{h}_{11}x_1 + n_1 \quad (4.1)$$

$$y_2 = h_{12}x_1 + \tilde{h}_{22}x_2 + n_2 \quad (4.2)$$

şeklinde elde edilir. Artık döngü girişim kanalı, varyansı rölenin iletim gücü ile orantılı olan Rayleigh veya Rician rastlantı değişkenleri ile modellenebilmektedir. Artık döngü girişiminin etkisini azaltmak için yeni girişim giderme teknikleri, yeni telsiz alıcı-verici tasarımları, alıcı-verici anten izolasyonu gibi konularda çalışmalar yapılmaktadır. Fakat çalışmalardan elde edilen değerler şu an için döngü girişiminin tamamen ihmal edilecek seviyede olmadığını göstermektedir. [11]-[13]. Dolayısıyla pratikte döngü girişim etkisi tamamen giderilemediği için tam-çift yönlü sistemler içeren çalışmalarda bu etki göz önünde bulundurulmaktadır.

Şekil 4.2'de rölenin yarı-çift yönlü olarak çalıştığı iki yönlü bir işbirlikli iletişim sistemi görülmektedir. Burada verici düğümü A, alıcı düğümü B ve röle C olarak belirtilmiştir. Sistemde iki uç birimi 2 zaman aralığında karşılıklı iletişim sağlamaktadır. Birinci zaman aralığı çoklu erişim (MAC) evresi olarak adlandırılır ve iki uç birim röleye işaretini gönderir. İkinci zaman aralığı ise yayın (BC) evresi olarak adlandırılır ve röle elde edilen toplamsal işareti çalıştığı işbirliği protokolüne göre işler ve iki kullanıcıya yollar. Bu sistem, literatürde ilk başlarda eğer röle AF protokolünü kullanıyorsa analog ağ kodlama (ANC), DF protokolünü kullanıyor ise fiziksel katman ağ kodlama (PLNC) tekniği olarak sınıflandırılmıştır fakat sonra bu sınıflandırma terk



Şekil 4.3 : Tam-çift yönlü işbirlikli iletişim modeli.

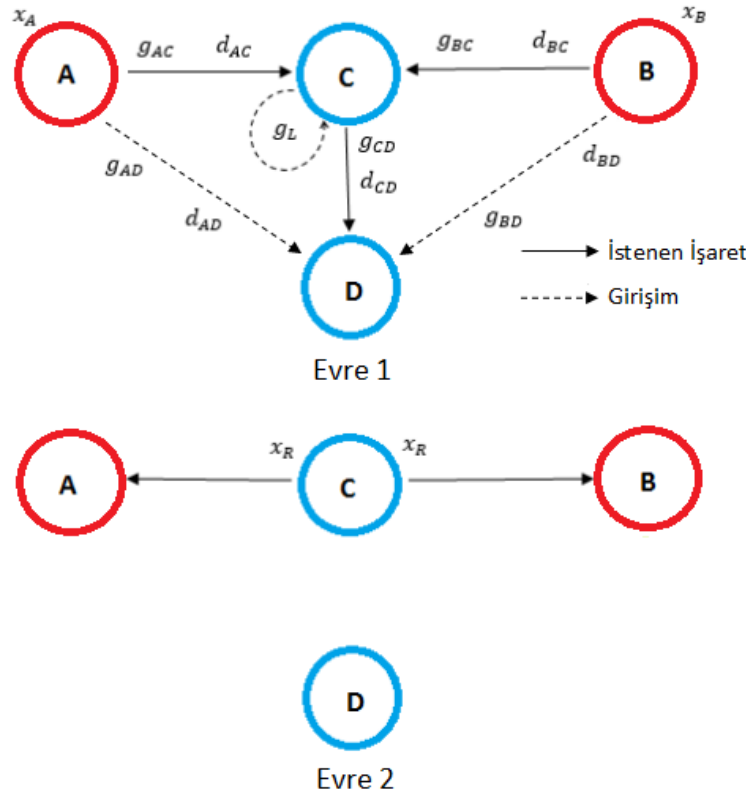
edilerek rölenin AF veya DF aktarım protokolü kullanmasından bağımsız olarak PLNC tekniği olarak isimlendirilmiştir. Şekil 4.3’de ise rölenin tam-çift yönlü olarak çalıştığı işbirlikli iletişim sistemi gösterilmiştir. Bu sistemde verici uçtan alıcı uca iletim tek evrede gerçekleşir. Böylece tam-çift yönlü sistemde yarı-çift yönlü sisteme göre iletim zamanı yarıya düştüğünden aynı zaman aralığında daha fazla bilgi iletimi sağlanmaktadır ve bu sayede iletişim daha hızlı gerçekleşmektedir.

4.2 Tam-Çift Yönlü Bilişsel AF Röle Ağı

Spektral verimliliği ve link hizmet kalitesini daha da arttırmak amacıyla bilişsel radyo ve işbirlikli iletişim tekniklerinin birleşimi olan bilişsel röle ağları önerilmiş ve geliştirilmiştir. Bilişsel röle, ikincil ağın bir ögesi olup ikincil verici veya ayrı bir edilgen röle olabilir. Bilişsel röle spektrumu etkin bir şekilde sezerek tespit ettiği birincil kullanıcıların iletimine yardım etmekte buna karşılık aynı anda kendi işaretini ikincil alıcıya iletmektedir.

Bu bölümde, literatürde yapılmış referans bir çalışma olan tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağı için spektrum paylaşım protokolü tanıtılacaktır [17]. Ele alınan sistem modeli Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Sistem iki birincil kullanıcı düğümü A ve B, iki ikincil kullanıcı düğümü C ve D den oluşmaktadır. İkincil verici C, bilişsel röle işlevi görmektedir ve tam-çift yönlü olarak çalışmaktadır. A ve B arasındaki kanal zayıf olduğundan doğrudan iletim olanaklı değildir ve iki yönlü iletim C bilişsel rölesi üzerinden sağlanmaktadır. C’nin verici ve alıcı antenlerinin birbirlerinden yalıtıldıkları kabul edilmiş fakat pratik kısıtlamalardan dolayı artık döngü girişiminin bütünüyle ortadan kaldırılamadığı varsayılmıştır. Herhangi iki düğüm arasındaki uzaklık d_{ij} ile gösterilmiştir. Burada, $i \in \{A, B, C\}$, $j \in \{C, D\}$ ve $i \neq j$ dir. Tüm kanallar istatistiksel bağımsız düz Rayleigh sönmülemeli, duruğumsu (quasistatic) ve tersinir (resiprok) varsayılmıştır. Burada duruğumsu kanal, kanal katsayılarının bir paket süresince sabit kaldığı ve paketten pakete istatistiksel bağımsız değiştiği kanaldır. Tersinir kanal ise

kanal sönümleme katsayılarının iki zıt yönde iletim için aynı olduğu kanaldır. İki farklı düğüm arasındaki kanal sönümleme katsayısı g_{ij} karmaşık Gauss dağılımlıdır: $g_{ij} \sim \mathcal{CN}(0, d_{ij}^{-\nu})$. Burada, $\nu > 0$ yol kaybı üstelidir. C düğümünde artık döngü girişim kanal katsayısı g_L ile gösterilmiş olup g_L sıfır ortalamalı, σ_L^2 varyanslı, istatistiksel bağımsız, karmaşık Gauss dağılımlıdır. Dolayısıyla g_L artık döngü girişim kanal kazancının ortalama gücü, $E[|g_L|^2] = \sigma_L^2$ 'dir ve C ikincil vericisinin artık döngü girişim kanalının istatistiksel karakteristiğini bildiği varsayılmıştır. A, B, C ve D düğümlerindeki AWGN bileşenleri sıfır ortalamalı, σ^2 varyanslı, istatistiksel bağımsız, aynı dağılımlı olarak modellenmiş, sırasıyla, n_A , n_B , n_C ve n_D ile gösterilmiştir. İletilen tüm işaretler için $E[|x_k|^2] = 1$, $k \in \{A, B, C\}$ varsayılmıştır. A ve B birincil kullanıcılarının ve C ikincil kullanıcılarının iletim güçleri sırasıyla P_S ve P_R 'dir. İki iletim evresinde birincil kullanıcılar A, B ile bilişsel röle C'nin harcadıkları toplam güç eşit ve $P_T/2$ 'dir. Ayrıca A ve B birincil kullanıcılarının eşit ve $P_S = P_T/4$ güç harcadıkları varsayılmıştır. Benzer şekilde C bilişsel rölesinin her bir evrede harcadığı güç eşit ve $P_R = P_T/4$ 'dür. Ortalama iletim SNR ise $\rho = P_T/\sigma^2$ şeklinde tanımlanmıştır.



Şekil 4.4 : Tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağ yapısı.

İletim iki evrede gerçekleşmektedir. İletimin ilk evresinde C bilişsel rölesi birincil kullanıcıların iletimine yardım ederken aynı frekansta ve aynı zamanda kendi işaretini ikincil alıcı D'ye iletmektedir. Bundan dolayı C bilişsel rölesi üzerinde artık döngü girişimi oluşmaktadır. İkinci evrede ise C, AF aktarma protokolünü kullanarak birinci evrede alınan birincil işaretlerin süperpozisyonunu kuvvetlendirerek A ve B kullanıcılarına göndermektedir. Birinci evrede D kullanıcısında alınan işaret,

$$y_D = \sqrt{P_R}g_{CD}x_C + \sqrt{P_S}g_{AD}x_A + \sqrt{P_S}g_{BD}x_B + n_D \quad (4.3)$$

şeklindedir. Burada x_C D'de istenen ikincil işaret iken x_A ve x_B işaretleri birincil kullanıcıların oluşturduğu girişim işaretleridir. D'deki SINR ifadesi,

$$\Gamma_D = \frac{\frac{\rho}{4}|g_{CD}|^2}{\frac{\rho}{4}(|g_{AD}|^2 + |g_{BD}|^2) + 1} \quad (4.4)$$

şeklinde elde edilir. D ikincil kullanıcısı için ulaşılabilir anlık hız (achievable instantaneous rate),

$$R_{CD} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_D) \quad (4.5)$$

ifadesi ile bulunmaktadır. (4.5)'teki $\frac{1}{2}$ çarpanı, toplam iki evreden oluşan sistem iletimine kıyasla ikincil iletimin sadece ilk evrede olmasından dolayıdır. İlk evrede C kullanıcısı tam-çift yönlü olarak çalıştığı için A ve B'den gelen işaretlerin yanında artık döngü girişim işaretini de almaktadır. Birinci evrede C'de alınan işaret,

$$y_C = \sqrt{P_S}g_{AC}x_A + \sqrt{P_S}g_{BC}x_B + \sqrt{P_R}g_Lx_C + n_C \quad (4.6)$$

şeklindedir. İkinci evrede bilişsel röle AF aktarma protokolünü kullanarak iletim gücünün tamamı ile birincil kullanıcının iletimine yardım etmekte ve x_R işaretini birincil kullanıcılar A ve B'ye iletmektedir. C'den iletilen işaret,

$$x_R = \sqrt{P_R} \frac{y_C}{\gamma} \quad (4.7)$$

şeklindedir. (4.7)'de γ kuvvetlendirme katsayısı olup C'nin verici gücünün osilasyon'a girmesini önlemektedir. γ katsayısı $\gamma = \sqrt{\frac{P_T}{4}(|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2 + \sigma_L^2) + \sigma^2}$ olarak

seçilmelidir. Burada, $|g_L|^2$ yerine $E[|g_L|^2] = \sigma_L^2$ yani artık döngü girişim kanalının ortalama gücü kullanılmıştır. C bilişsel rölesinin iletimi sonucunda B’de alınan işaret,

$$\begin{aligned} y_B &= g_{BC}x_R + n_B \\ &= \frac{\sqrt{P_S P_R} g_{BC}^2}{\gamma} x_B + \frac{\sqrt{P_S P_R} g_{AC} g_{BC}}{\gamma} x_A \\ &\quad + \frac{P_R g_{BC} g_L}{\gamma} x_C + \frac{\sqrt{P_R} g_{BC}}{\gamma} n_C + n_B \end{aligned} \quad (4.6)$$

olarak elde edilir. (4.6)’da ikinci terim A’dan B’ye gönderilmiş istenen işarettir. İlk terim öz girişimdir ve B kullanıcısı x_B işaretini doğru bir şekilde bildiği için doğrudan B tarafından elimine edilir. Üçüncü terim C’nin tam-çift yönlü olarak çalışmasından dolayı oluşan artık döngü girişiminden kaynaklanmaktadır ve istenmeyen işarettir. Dördüncü ve beşinci terimler sırasıyla C ve B kullanıcılarının alıcılarındaki AWGN işaretleridir. B’deki SINR ifadesi,

$$\Gamma_B = \frac{\left(\frac{\rho}{4}\right)^2 |g_{AC}|^2 |g_{BC}|^2}{\left(\frac{\rho}{4}\right)^2 \sigma_L^2 |g_{BC}|^2 + \left(\frac{\rho}{4}\right) |g_{BC}|^2 + \frac{\gamma^2}{\sigma^2}} \quad (4.7)$$

şeklinde elde edilir. $\tilde{\rho} = \frac{\frac{\rho}{4}}{\frac{\rho}{4}\sigma_L^2 + 1}$ olarak seçilir ve γ katsayı ifadesi yerine konursa (4.7) ifadesi,

$$\Gamma_B = \frac{\left(\frac{\rho}{4}\right) \tilde{\rho} |g_{AC}|^2 |g_{BC}|^2}{\frac{\rho}{4} |g_{BC}|^2 + \tilde{\rho} (|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) + 1} \quad (4.8)$$

olarak yazılabilir. B’deki ulaşılabilir anlık hız,

$$R_B = \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_B) \quad (4.9)$$

ifadesi ile bulunur. (4.9)’daki $\frac{1}{2}$ çarpanı birincil iletimin iki evrede gerçekleşmesinden dolayıdır. Benzer şekilde B’den A’ya gönderilen işaret sonucu A’daki SINR ve ulaşılabilir anlık hız ifadeleri,

$$\Gamma_A = \frac{\left(\frac{\rho}{4}\right) \tilde{\rho} |g_{AC}|^2 |g_{BC}|^2}{\frac{\rho}{4} |g_{AC}|^2 + \tilde{\rho} (|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) + 1} \quad (4.10)$$

$$R_A = \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_A) \quad (4.11)$$

şeklinde yazılabilir. Burada (4.10) ve (4.8) aynı yolla elde edilmektedir.

Birincil kullanıcıların hedeflenen hızı R_{pt} ve ikincil kullanıcıların hedeflenen hızı R_{st} olmak üzere $R_k < R_{pt}$ ve $R_k < R_{st}$ durumu için kullanıcıların iletim yaptığı link servis kesilme durumunda olmaktadır. Burada R_k belli bir linkte ulaşılabilir anlık hızı göstermektedir.

$R_{CD} < R_{st}$ için ilk evrede C-D linki servis kesilme durumundadır ve C rölesi D'ye iletim yapamamaktadır. İkincil iletim sadece ilk evrede C-D linki arasında olduğundan eğer bu link servis kesilme durumunda ise ikincil sistem servis kesilme durumunda olmuş olur. İkincil servis kesilme olasılık hesabı için ilk olarak $X_1 \triangleq \frac{\rho}{4} |g_{CD}|^2$, $X_2 \triangleq \frac{\rho}{4} |g_{AD}|^2$ ve $X_3 \triangleq \frac{\rho}{4} |g_{BD}|^2$ şeklinde yeni rastlantı değişkenleri tanımlanıp (4.4)'de yerine konursa yeni SINR ifadesi,

$$\Gamma_D = \frac{X_1}{X_2 + X_3 + 1} \quad (4.12)$$

şeklinde elde edilir. Burada X_1, X_2 ve X_3 üstel dağılımlı ve sırasıyla $\lambda_1 = d_{CD}^v/(\rho/4)$, $\lambda_2 = d_{AD}^v/(\rho/4)$, $\lambda_3 = d_{BD}^v/(\rho/4)$ parametrelili rastlantı değişkenleridir. Hesaplamaları kolaylaştırmak amacıyla özellikle yüksek SNR bölgesinde geçerli olan

$$\Gamma_D \approx \frac{X_1}{X_2 + X_3} \quad (4.13)$$

yaklaşımı yapılır. İkincil sistemin servis kesilme olasılığı ise,

$$P_{out}^{SU} = P_r(R_{CD} < R_{st}) = P_r(\Gamma_D < 2^{2R_{st}} - 1) \quad (4.14)$$

ifadesine eşittir. (4.14)'te ikincil servis kesilme olasılığının Γ_D 'nin CDF'i yardımıyla bulunabileceği görülmektedir. Burada gerekli ara işlemler yapıldığında Γ_D 'nin CDF'i,

$$F_{\Gamma_D}(x) = 1 - \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_1 x + \lambda_2)(\lambda_1 x + \lambda_3)} \quad (4.15)$$

olarak elde edilmektedir. (4.15)'in elde edilmesindeki ara adımlar için Ek A'ya bakılabilir. (4.15) eşitliği kullanıldığında ikincil sistemin servis kesilme olasılığı,

$$\begin{aligned}
P_{out}^{SU} &= F_{\Gamma_D}(2^{2R_{st}} - 1) = \\
&= 1 - \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_1(2^{2R_{st}} - 1) + \lambda_2)(\lambda_1(2^{2R_{st}} - 1) + \lambda_3)} \\
&= 1 - \frac{d_{AD}^v d_{BD}^v}{(d_{CD}^v(2^{2R_{st}} - 1) + d_{AD}^v)(d_{CD}^v(2^{2R_{st}} - 1) + d_{BD}^v)} \quad (4.16)
\end{aligned}$$

şeklinde elde edilir.

A'dan B'ye tek yönlü birincil sistemin servis kesilme olasılık hesabı için ilk olarak $X_1 \triangleq \left(\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}\right) |g_{BC}|^2$ ve $X_2 \triangleq \tilde{\rho} |g_{AC}|^2$ şeklinde yeni rastlantı değişkenleri tanımlanıp (4.8)'de yerine konursa B'deki yeni SINR ifadesi,

$$\Gamma_B = \left(\frac{\frac{\rho}{4}}{\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}} \right) \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2 + 1} \quad (4.17)$$

şeklinde elde edilir. Burada X_1 ve X_2 üstel dağılımlı ve sırasıyla $\lambda_1 = d_{BC}^v / \left(\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}\right)$, $\lambda_2 = d_{AC}^v / \tilde{\rho}$ parametrelili rastlantı değişkenleridir. (4.17)'de $Y = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2 + 1}$ şeklinde yeni bir rastlantı değişkeni tanımlandığında birincil sistemin servis kesilme olasılığı,

$$P_r(R_B < R_{pt}) = P_r \left(Y < \left(\frac{\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}}{\frac{\rho}{4}} \right) (2^{2R_{pt}} - 1) \right) \quad (4.18)$$

ifadesine eşit olmaktadır. (4.18)'den birincil sistem servis kesilme olasılığının Y 'nin CDF'i yardımıyla bulunabileceği görülmektedir. Y 'nin CDF'i [15]'deki (27) yardımıyla,

$$F_Y(y) = 1 - 2y\sqrt{\lambda_1 \lambda_2} e^{-y(\lambda_1 + \lambda_2)} K_1(2y\sqrt{\lambda_1 \lambda_2}) \quad (4.19)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadede $K_1(x) = x \int_0^\infty \frac{\cos t}{(x^2 + t^2)^{3/2}} dt$ birinci derece ikinci türden değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur [32]. (4.19) eşitliği kullanılırsa A'dan B'ye birincil sistem servis kesilme olasılığı,

$$P_r(R_B < R_{pt}) = 1 - 2 \left(\frac{\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}}{\frac{\rho}{4}} \right) (2^{2R_{pt}} - 1) \times$$

$$\begin{aligned}
& \sqrt{\left(d_{BC}^v / \left(\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}\right)\right) (d_{AC}^v / \tilde{\rho})} \times e^{-\left(\frac{\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}}{\frac{\rho}{4}}\right) (2^{2R_{pt}} - 1) (d_{BC}^v / (\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}) + d_{AC}^v / \tilde{\rho})} \\
& \times K_1 \left(2 \left(\frac{\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}}{\frac{\rho}{4}} \right) (2^{2R_{pt}} - 1) \sqrt{\left(d_{BC}^v / \left(\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}\right)\right) (d_{AC}^v / \tilde{\rho})} \right)
\end{aligned} \tag{4.20}$$

olarak bulunur. Benzer şekilde (4.10) ve (4.11)'deki eşitlikler kullanılarak aynı adımlar uygulandığında B'den A'ya birincil sistem servis kesilme olasılığı,

$$\begin{aligned}
P_r(R_B < R_{pt}) &= 1 - 2 \left(\frac{\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}}{\frac{\rho}{4}} \right) (2^{2R_{pt}} - 1) \times \\
& \sqrt{\left(d_{AC}^v / \left(\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}\right)\right) (d_{BC}^v / \tilde{\rho})} \times e^{-\left(\frac{\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}}{\frac{\rho}{4}}\right) (2^{2R_{pt}} - 1) (d_{AC}^v / (\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}) + d_{BC}^v / \tilde{\rho})} \\
& \times K_1 \left(2 \left(\frac{\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}}{\frac{\rho}{4}} \right) (2^{2R_{pt}} - 1) \sqrt{\left(d_{AC}^v / \left(\frac{\rho}{4} + \tilde{\rho}\right)\right) (d_{BC}^v / \tilde{\rho})} \right)
\end{aligned} \tag{4.21}$$

şeklinde bulunur. İki yönlü birincil sistem servis kesilme olasılığı ise,

$$P_{out}^{PU} = 1 - P_r(R_A \geq R_{pt}) P_r(R_B \geq R_{pt}) \tag{4.22}$$

eşitliği ile bulunmaktadır. Burada $P_r(R_A \geq R_{pt}) = 1 - P_r(R_A < R_{pt})$ ve $P_r(R_B \geq R_{pt}) = 1 - P_r(R_B < R_{pt})$ 'dir.

Bu bölümde tanıtılan referans sistemin servis kesilme başarımları ileriki bölümlerde anlatılacak yeni önerilen sistemlerin servis kesilme başarımları ile karşılaştırılarak verilecektir.

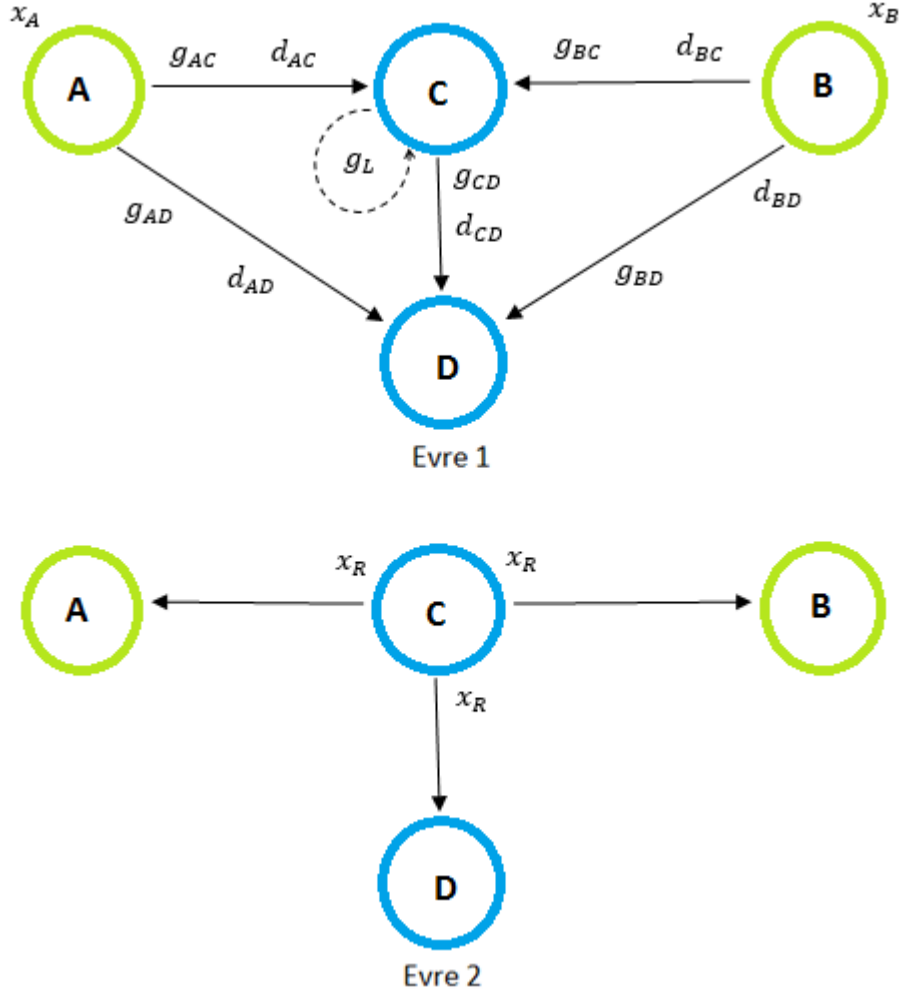


5. TAM-ÇİFT YÖNLÜ BİLİŞSEL DF RÖLE AĞI İÇİN YENİ BİR SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ

Bu bölümde tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağı için yeni bir spektrum paylaşım protokolü önerilecektir. Sistem modeli tanıtılacak ve her bir linke ait ulaşılabilir anlık hız ifadeleri (achievable instantaneous rate) bulunacaktır. Birincil ve ikincil kullanıcıların servis kesilme olasılık ifadelerinin kuramsal çıkarımı yapılarak benzetim sonuçları ile doğrulanacaktır. Ayrıca, birincil ve ikincil kullanıcılar için sistemin servis kesilme başarımı, Bölüm 4.2’de tanıtılan ve literatürdeki referans sistem olan tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağı ile farklı parametreler cinsinden karşılaştırılacaktır.

5.1 Sistem Modeli ve Protokol Tanımı

Ele alınan sistem modeli Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Sistem, iki yönde iletişim kurabilen iki birincil kullanıcı düğümü A ve B ile tek yönde iletişim kurabilen iki ikincil kullanıcı düğümü C ve D den oluşmaktadır. İkincil verici C, bilişsel röle işlevi görmektedir ve tam-çift yönlü olarak çalışmaktadır. A ve B arasındaki kanal zayıf olduğundan doğrudan iletim olanaklı değildir ve iki yönlü iletim C bilişsel rölesi üzerinden sağlanmaktadır. C’nin verici ve alıcı antenlerinin birbirlerinden yalıtıldıkları kabul edilmiş fakat pratik kısıtlamalardan dolayı artık döngü girişiminin (residual loop interference) bütünüyle ortadan kaldırılamadığı varsayılmıştır. C dışındaki düğümler yarı-çift yönlü olarak çalışmaktadır ve tek antene sahiptir. Herhangi iki düğüm arasındaki uzaklık d_{ij} ile gösterilmiştir. Burada, $i \in \{A, B, C\}$, $j \in \{C, D\}$ ve $i \neq j$ dir. Tüm kanallar istatistiksel bağımsız düz Rayleigh sönümlemeli, duruğumsu ve tersinir varsayılmıştır. Burada duruğumsu kanal, kanal katsayılarının bir paket süresince sabit kaldığı ve paketten pakete istatistiksel bağımsız değiştiği kanaldır. Tersinir kanal ise kanal sönümleme katsayılarının iki zıt yönde iletim için aynı olduğu kanaldır. İki farklı düğüm arasındaki kanal sönümleme katsayısı g_{ij} karmaşık Gauss dağılımlıdır: $g_{ij} \sim \mathcal{CN}(0, d_{ij}^{-\nu})$. Burada, $\nu > 0$ yol kaybı üstelidir. C düğümünde artık döngü girişim kanalı g_L ile gösterilmiş olup g_L sıfır ortalamalı, σ_L^2 varyanslı, istatistiksel bağımsız,



Şekil 5.1 : Tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağ yapısı.

karmaşık Gauss dağılımlıdır. Dolayısıyla g_L artık döngü girişim kanal kazancının ortalama gücü, $E[|g_L|^2] = \sigma_L^2$ 'dir ve C ikincil vericisinin artık döngü girişim kanalının istatistiksel karakteristiğini bildiği varsayılmıştır. A, B, C ve D düğümlerindeki AWGN bileşenleri sıfır ortalamalı, σ^2 varyanslı, istatistiksel bağımsız, aynı dağılımlı olarak modellenmiş, sırasıyla, n_A , n_B , n_C ve n_D ile gösterilmiştir. İletilen tüm işaretler için $E[|x_k|^2] = 1$, $k \in \{A, B, C\}$ varsayılmıştır. Birincil ve ikincil kullanıcıların iletim güçleri sırasıyla P_S ve P_R 'dir. İki iletim evresinde birincil kullanıcılar A, B ile bilişsel röle C'nin harcadıkları toplam güç eşit ve $P_T/2$ 'dir. Ayrıca A ve B birincil kullanıcılarının eşit ve $P_S = P_T/4$ güç harcadıkları varsayılmıştır. Benzer şekilde C bilişsel rölesinin her bir evrede harcadığı güç eşit ve $P_R = P_T/4$ 'dür. α , $0 < \alpha < 1$ olmak üzere ikinci evrede C bilişsel rölesinin kullandığı güç paylaşırma çarpanıdır. Ortalama iletim işaret-gürültü oranı (SNR) ise $\rho = P_T/\sigma^2$ şeklinde tanımlanmıştır.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi yeni önerilen spektrum paylaşım protokolü iki iletim evresinden oluşmaktadır. Birinci evrede veya diğer adıyla çoklu erişim (MAC) evresinde birincil kullanıcı A, x_A işaretini, birincil kullanıcı B ise x_B işaretini aynı anda C rölesine iletmektedir. Eş zamanlı olarak C rölesi, x_C ikincil işaretini D’ye iletmektedir. Tam-çift yönlü iletimden dolayı C rölesi üzerinde artık döngü girişimi oluşmaktadır. İlk evrede C bilişsel rölesinde alınan işaret,

$$y_C = \sqrt{P_S}g_{AC}x_A + \sqrt{P_S}g_{BC}x_B + \sqrt{P_R}g_Lx_C + n_C \quad (5.1)$$

şeklindedir. C bilişsel rölesi alınan x_A ve x_B işaretlerini çözmeye çalışmaktadır. (5.1)’de ilk iki terim C’de istenen birincil işaretlere ait terimler iken üçüncü terim artık döngü girişiminden kaynaklanan girişim terimidir. Burada $i \in \{A, B\}$ olmak üzere i . kullanıcı ile C rölesi arasındaki işaret-gürültü+girişim oranı (SINR),

$$\Gamma_{iC} = \frac{\frac{\rho}{4}|g_{iC}|^2}{\frac{\rho}{4}\sigma_L^2 + 1} \quad (5.2)$$

olup C rölesindeki çoklu erişim SINR,

$$\Gamma_C = \frac{\frac{\rho}{4}(|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2)}{\frac{\rho}{4}\sigma_L^2 + 1} \quad (5.3)$$

şeklindedir. İlk evrede D’de alınan işaret ise,

$$y_{D,1} = \sqrt{P_R}g_{CD}x_C + \sqrt{P_S}g_{AD}x_A + \sqrt{P_S}g_{BD}x_B + n_D \quad (5.4)$$

olarak elde edilir. (5.4)’te ilk terim D’de istenen ikincil işarete ait terim iken ikinci ve üçüncü terimler birincil işaretlerden kaynaklanan girişim terimleridir. İlk evrede D’de elde edilen SINR,

$$\Gamma_{D,1} = \frac{\frac{\rho}{4}|g_{CD}|^2}{\frac{\rho}{4}(|g_{AD}|^2 + |g_{BD}|^2) + 1} \quad (5.5)$$

şeklindedir. İkinci evrede, C rölesinden D kullanıcısına iletilen işarete birincil işaretlerin bulunmasından dolayı daha iyi ikincil sistem başarımı elde edebilmek için ilk evrede D kullanıcısında birincil işaretler ardışık girişim giderme (successive interference cancellation) yöntemi kullanılarak çözülmekte ve bu işaretler ikinci evrede kullanılarak girişim yok edilmektedir. C rölesinin ikincil kullanıcı D’ye birincil

kullanıcılar A ve B'den daha yakın olduğu kabul edilmiştir. Bundan dolayı D kullanıcısı kendisine daha uzak olan A ve B kullanıcılarından gelen işaretleri gürültü olarak kabul edip ilk olarak en büyük olabilirlikli (ML) karar kuralı ile kuvvetli olan $\tilde{x}_C = \arg \min_{x_C} |y_{D,1} - \sqrt{P_R} g_{CD} x_C|^2$ ikincil işaretini çözmektedir. Daha sonra kestirilen $\tilde{x}_C$ işareti, alınan $y_{D,1}$ işaretinden çıkartılarak $\tilde{y}_{D,1} = y_{D,1} - \sqrt{P_R} g_{CD} \tilde{x}_C$ işareti elde edilmektedir. D kullanıcısı bu işareten birleşik ML karar kuralı kullanarak,

$$(\tilde{x}_A, \tilde{x}_B) = \arg \min_{x_A, x_B} |\tilde{y}_{D,1} - \sqrt{P_S} g_{AD} x_A - \sqrt{P_S} g_{BD} x_B|^2 \quad (5.6)$$

birincil işaretlerini çözmektedir. Kestirilen birincil $(\tilde{x}_A, \tilde{x}_B)$ işaretleri ikinci evrede D kullanıcısında C'den iletilen birincil işaretlerin oluşturduğu girişimi gidermek için kullanılmaktadır.

İkinci evre veya diğer adıyla yayın (BC) evresinde, eğer birinci evrede birincil işaretler x_A ve x_B doğru çözülmüş ise, fiziksel katman ağ kodlanmış (PLNC) $x_A \oplus x_B$ işareti ile yeni ikincil x_C işaretinin güç paylaşırma çarpanı kullanılarak birleştirilmesiyle oluşturulan birleşik $x_R = \sqrt{P_R \alpha} (x_A \oplus x_B) + \sqrt{P_R (1 - \alpha)} x_C$ işareti, C bilişsel rölesi tarafından tüm kullanıcılara iletilir. Burada C bilişsel rölesi, iletim gücü P_R 'nin α ile orantılı olan kısmını ağ kodlanmış $x_A \oplus x_B$ işaretinin aktarılması için kullanırken, $(1 - \alpha)$ ile orantılı olan kısmını ikincil işaret x_C 'yi iletmek için kullanmaktadır. α katsayısının uygun bir şekilde seçilmesi ile birincil sistemdeki servis kesilme başarımı, spektrum paylaşımı olmayan duruma göre artarken, aynı zamanda ikincil sistemin sürekli spektrum paylaşımı sağlanmaktadır. $j \in \{A, B, D\}$ olmak üzere diğer kullanıcılarda alınan $y_{j,2}$ işaretleri,

$$y_{j,2} = \sqrt{P_R \alpha} g_{Cj} (x_A \oplus x_B) + \sqrt{P_R (1 - \alpha)} g_{Cj} x_C + n_j \quad (5.7)$$

şeklinde yazılabilmektedir. (5.7)'de ilk terim birincil kullanıcılar tarafından istenen terim iken ikinci terim ikincil kullanıcı tarafından istenen terimdir. $i \in \{A, B\}$ olmak üzere i .kullanıcıdaki SINR,

$$\Gamma_{Ci} = \frac{\frac{\rho}{4} \alpha |g_{ic}|^2}{(1 - \alpha) \frac{\rho}{4} |g_{ic}|^2 + 1} \quad (5.8)$$

olarak elde edilir. D'deki SINR ise,

$$\Gamma_{D,2} = \frac{\frac{\rho}{4}(1-\alpha)|g_{CD}|^2}{\frac{\rho}{4}\alpha|g_{CD}|^2 + 1} \quad (5.9)$$

şeklindedir. İlk evrede kestirilen $\tilde{x}_A$ ve $\tilde{x}_B$ birincil işaretleri kullanılarak ikinci evrede (5.7)'deki ilk terimden kaynaklanan C rölesinin D kullanıcısında oluşturduğu girişim yok edilir. Girişim işaretinin giderilmesi sonucunda D kullanıcısında,

$$y'_{D,2} = \sqrt{P_R(1-\alpha)} g_{CD} x_C + n_D \quad (5.10)$$

işareti elde edilirken D'deki yeni SINR ifadesi,

$$\Gamma'_{D,2} = \frac{\rho}{4}(1-\alpha)|g_{CD}|^2 \quad (5.11)$$

şeklindedir.

5.2 Servis Kesilme Analizi

Birincil ve ikincil kullanıcıların hedeflenen hızları sırasıyla R_{pt} ve R_{st} olmak üzere, $R_k < R_{pt}$ ve $R_k < R_{st}$ için kullanıcılar servis kesilme durumundadırlar. Burada, R_k belli bir linke ait ulaşılabilir anlık hızı göstermektedir. Bu bölümde, önerilen protokol için birincil ve ikincil kullanıcılara ait servis kesilme olasılıkları hesaplanacaktır.

$i \in \{A, B\}$ olmak üzere birinci evrede $A \rightarrow C$ veya $B \rightarrow C$ linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi,

$$R_{ic} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_{ic}) \quad (5.12)$$

şeklindedir. Burada (5.2)'deki Γ_{ic} eşitliği (5.12)'de yerine konulduğunda,

$$R_{ic} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\frac{\rho}{4}|g_{ic}|^2}{\frac{\rho}{4}\sigma_L^2 + 1} \right) \quad (5.13)$$

elde edilir. İkinci evrede $C \rightarrow A$ veya $C \rightarrow B$ linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi ise,

$$R_{ci} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_{ci}) \quad (5.14)$$

şeklinde ifade edilir. Burada (5.8)'deki Γ_{ci} eşitliği (5.14)'te yerine konulduğunda,

$$R_{Ci} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\frac{\rho}{4} \alpha |g_{ic}|^2}{(1 - \alpha) \frac{\rho}{4} |g_{ic}|^2 + 1} \right) \quad (5.15)$$

elde edilir. Birincil kullanıcılar için önerilen protokole ait anlık ulaşılabilir hız bölgesi, $R_{pt} < I_{AB}$, $R_{pt} < I_{BA}$ ve $2R_{pt} < I_{\Sigma}$ eşitsizliklerini sağlamalıdır. Burada karşılıklı bilgi (mutual information) eşitlikleri,

$$I_{AB} = \min\{R_{AC}, R_{CB}\} \quad (5.16)$$

$$I_{BA} = \min\{R_{BC}, R_{CA}\} \quad (5.17)$$

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_C) \quad (5.18)$$

şeklinde yazılabilir. Ulaşılabilir anlık hız ifadeleri (5.13) ve (5.15), i kullanıcısı için (5.16) ve (5.17)'de yerine konulduğunda ve (5.3), (5.18) 'de yerine konulduğunda,

$$I_{AB} = \min \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\frac{\rho}{4} |g_{AC}|^2}{\frac{\rho}{4} \sigma_L^2 + 1} \right), \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\frac{\rho}{4} \alpha |g_{BC}|^2}{(1 - \alpha) \frac{\rho}{4} |g_{BC}|^2 + 1} \right) \right\} \quad (5.19)$$

$$I_{BA} = \min \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\frac{\rho}{4} |g_{BC}|^2}{\frac{\rho}{4} \sigma_L^2 + 1} \right), \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\frac{\rho}{4} \alpha |g_{AC}|^2}{(1 - \alpha) \frac{\rho}{4} |g_{AC}|^2 + 1} \right) \right\} \quad (5.20)$$

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\frac{\rho}{4} (|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2)}{\frac{\rho}{4} \sigma_L^2 + 1} \right) \quad (5.21)$$

elde edilir. (5.19)-(5.21) eşitliklerinde $\frac{1}{2}$ çarpanları birincil iletimin iki işaretleşme aralığında gerçekleşmesinden dolayıdır. Ayrıca bu eşitliklerde $|g_{AC}|^2$ ve $|g_{BC}|^2$ istatistiksel bağımsız üstel dağılımlı ve sırasıyla $\lambda_{AC} = d_{AC}^v$ ve $\lambda_{BC} = d_{BC}^v$ parametrelili rastlantı değişkenleridir. Burada A'dan B'ye doğru iletim için karşılıklı bilgi miktarı I_{AB} , A $\rightarrow$ C ve C $\rightarrow$ B linklerinin ulaşılabilir anlık hızlarının minimumuna eşittir. Benzer şekilde B'den A'ya doğru iletim için karşılıklı bilgi miktarı I_{BA} , B $\rightarrow$ C ve C $\rightarrow$ A linklerinin ulaşılabilir anlık hızlarının minimumuna eşittir. I_{Σ} ise MAC kanalı için karşılıklı bilgi miktarını göstermektedir. Bu tanımlarla birlikte birincil kullanıcılar için iki yönlü servis kesilme olasılığı,

$$P_{out}^{PU} = P_r(I_{AB} < R_{pt} \cup I_{BA} < R_{pt} \cup I_{\Sigma} < 2R_{pt}) \quad (5.22)$$

ile bulunur. (5.22) yeniden düzenlendiğinde,

$$P_{out}^{PU} = P_r(\min(I_{AB}, I_{BA}) < R_{pt} \cup I_{\Sigma} < 2R_{pt}) \quad (5.23)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. (5.19) ve (5.20)'den yararlanılarak (5.23)'teki $\min(I_{AB}, I_{BA})$ ifadesi,

$$\min(I_{AB}, I_{BA}) = \frac{1}{2} \log_2(1 + \min(\delta, \varepsilon) \min(|g_{AC}|^2, |g_{BC}|^2)) \quad (5.24)$$

olarak bulunur. Burada, $\delta = \frac{\rho/4}{(\rho/4)\sigma_L^2 + 1}$ ve $\varepsilon = [1 - (1 - \alpha)2^{2R_{pt}}] \frac{\rho}{4}$ olmak üzere $\varepsilon < \delta$ durumu için birincil sistemin servis kesilme olasılığı güç paylaşırma çarpanı α 'ya bağlı olarak değişmektedir. $\varepsilon < \delta$ için α , eşitsizliğin bir tarafında yalnız bırakılarak $[1 - (1 - \alpha)2^{2R_{pt}}] \frac{\rho}{4} < \frac{\rho/4}{(\rho/4)\sigma_L^2 + 1}$ ilişkisinden,

$$\alpha < \frac{2^{2R_{pt}} - 1}{2^{2R_{pt}}} + \frac{1}{[(\rho/4)\sigma_L^2 + 1] \times 2^{2R_{pt}}} \quad (5.25)$$

koşulu elde edilir. (5.25), $\varepsilon < \delta$ eşitsizliğine denktir. α 'nın 0 ile 1 arasında bir değer aldığı bilindiğine göre ve (5.25)'de $\beta = \frac{2^{2R_{pt}} - 1}{2^{2R_{pt}}} + \frac{1}{[(\rho/4)\sigma_L^2 + 1] \times 2^{2R_{pt}}}$ olarak tanımlandığında (5.24),

$$\min(I_{AB}, I_{BA}) = \begin{cases} \frac{1}{2} \log_2(1 + \delta \times \min(|g_{AC}|^2, |g_{BC}|^2)) & , \beta < \alpha \leq 1 \\ \frac{1}{2} \log_2(1 + \varepsilon \times \min(|g_{AC}|^2, |g_{BC}|^2)) & , 0 < \alpha \leq \beta \end{cases} \quad (5.26)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. (5.26)'da görüldüğü gibi $0 < \alpha \leq \beta$ koşulu için, ε değeri yerine konulduğunda,

$$\min(I_{AB}, I_{BA}) = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + [1 - (1 - \alpha)2^{2R_{pt}}] \frac{\rho}{4} \times \min(|g_{AC}|^2, |g_{BC}|^2) \right) \quad (5.27)$$

elde edilir. (5.27), (5.23)'de yerine konulup $0 < \alpha \leq \beta$ koşulu için birincil sistemin servis kesilme olasılık ifadesi yeniden düzenlendiğinde,

$$P_{out}^{PU} = P_r \left(\min(|g_{AC}|^2, |g_{BC}|^2) < \frac{2^{2R_{pt}} - 1}{[1 - (1 - \alpha)2^{2R_{pt}}] \left(\frac{\rho}{4}\right)} \cup (|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) < \left((2^{4R_{pt}} - 1)\sigma_L^2 + 1 \right) \right) \quad (5.28)$$

elde edilir. $\Gamma = \frac{2^{2R_{pt}-1}}{[1-(1-\alpha)2^{2R_{pt}}]^{(\rho/4)}}$ ve $\theta = (2^{4R_{pt}} - 1)\sigma_L^2 + 1$ olarak tanımlanıp (5.28)

yeniden yazılırsa,

$$\begin{aligned}
P_{out}^{PU} &= P_r(\min(|g_{AC}|^2, |g_{BC}|^2) < \Gamma \cup (|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) < \theta) \\
&= 1 - P_r(|g_{AC}|^2 > \Gamma, |g_{BC}|^2 > \Gamma, |g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2 > \theta) \\
&= 1 + P_r(|g_{AC}|^2 > \Gamma, |g_{BC}|^2 > \Gamma, |g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2 < \theta) - \\
&\quad P_r(|g_{AC}|^2 > \Gamma, |g_{BC}|^2 > \Gamma)
\end{aligned} \tag{5.29}$$

şeklinde elde edilir. Burada, $|g_{AC}|^2$ ve $|g_{BC}|^2$ bağımsız üstel rastlantı değişkenlerine ait olasılık yoğunluk işlevleri sırasıyla $f_{x_{AC}}(x_{AC}) = d_{AC}^v e^{-d_{AC}^v x_{AC}}$ ve $f_{x_{BC}}(x_{BC}) = d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v x_{BC}}$ olmak üzere (5.29) daha açık yazıldığında,

$$\begin{aligned}
P_{out}^{PU} &= 1 + \int_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} \int_{\Gamma}^{\theta-x_{BC}} d_{AC}^v e^{-d_{AC}^v x_{AC}} dx_{AC} d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v x_{BC}} dx_{BC} \\
&\quad - \int_{\Gamma}^{\infty} d_{AC}^v e^{-d_{AC}^v x_{AC}} dx_{AC} \int_{\Gamma}^{\infty} d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v x_{BC}} dx_{BC}
\end{aligned} \tag{5.30}$$

elde edilir. Eğer $d_{AC} = d_{BC}$ ise gerekli ara işlemler yapıldığında birincil sistemin servis kesilme olasılığı,

$$P_{out}^{PU} = 1 - e^{-d_{BC}^v \theta} - e^{-d_{AC}^v \theta} (\theta - 2\Gamma) d_{BC}^v \tag{5.31}$$

olarak elde edilirken, $d_{AC} \neq d_{BC}$ ise,

$$P_{out}^{PU} = 1 + \frac{d_{AC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v} e^{-d_{BC}^v \theta} e^{\Gamma(d_{BC}^v - d_{AC}^v)} + \frac{d_{BC}^v}{d_{AC}^v - d_{BC}^v} e^{-d_{AC}^v \theta} e^{\Gamma(d_{AC}^v - d_{BC}^v)} \tag{5.32}$$

şeklinde elde edilir. Burada (5.30)'dan (5.31) ve (5.32)'ye geçişteki ara işlemler için Ek B'ye bakılabilir. Ayrıca (5.31) ve (5.32)'de $P_{out}^{PU} \leq 1$ olması gerekliliğinden yararlanılarak α için alt sınır bulunabilir. Örneğin $d_{AC} = d_{BC}$ için (5.31) kullanılarak

$$\alpha \geq \frac{2^{2R_{pt}-1}}{2^{2R_{pt}}} + \frac{2 \times d_{BC}^v \times e^{-d_{AC}^v \theta} \times (2^{2R_{pt}} - 1)}{[e^{-d_{BC}^v \theta} + e^{-d_{AC}^v \theta} \times d_{BC}^v \times \theta] \times (\rho/4) \times 2^{2R_{pt}}} \text{ elde edilir.}$$

(5.26)'da $\beta < \alpha \leq 1$ koşulu için δ yerine konularak benzer adımlarla (5.31) ve (5.32) elde edilir. Fakat $\beta < \alpha \leq 1$ koşulu için önceki $0 < \alpha \leq \beta$ koşulundan farklı olarak $\Gamma = \frac{(2^{2R_{pt}}-1)(\frac{\rho}{4}\sigma_L^2+1)}{\rho/4}$, dir ve P_{out}^{PU} ifadesi buna uygun olarak elde edilir.

İlk evrede $C \rightarrow D$ linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi,

$$R_{CD,1} = \log_2(1 + \Gamma_{D,1}) \quad (5.33)$$

şeklindedir. (5.33)'de $\frac{1}{2}$ çarpanı bulunmamasının nedeni C bilişsel rölesinin D'ye iki evrede farklı paketler gönderiyor olmasıdır. Diğer taraftan $A \rightarrow D$ ve $B \rightarrow D$ çoklu erişim linkleri için ulaşılabilir anlık hız ifadesi,

$$R_{AB,D} = \frac{1}{2} \log(1 + (\rho/4)(|g_{AD}|^2 + |g_{BD}|^2)) \quad (5.34)$$

şeklindedir. Eğer birinci evrede x_A ve x_B işaretleri D kullanıcısında başarılı bir şekilde çözülmüş ise ikinci evrede $C \rightarrow D$ linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi,

$$R_{CD,21} = \log(1 + \Gamma'_{D,2}) \quad (5.35)$$

olmaktadır. Fakat eğer birinci evrede x_A ve x_B işaretleri D kullanıcısında başarılı bir şekilde çözülememiş ise ikinci evrede $C \rightarrow D$ linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi,

$$R_{CD,22} = \log(1 + \Gamma_{D,2}) \quad (5.36)$$

elde edilmektedir. İkincil sistemin servis kesilme olasılığı (5.33)-(5.36) kullanılarak,

$$\begin{aligned} P(P_{out}^{SU}) = 1 - \frac{1}{2} & \left[(1 - P_r(R_{st} \geq R_{CD,1})) \right. \\ & + \left((1 - P_r(R_{pt} \geq R_{AB,D})) (1 - P_r(R_{st} \geq R_{CD,21})) \right) \\ & \left. + P_r(R_{pt} \geq R_{AB,D}) (1 - P_r(R_{st} \geq R_{CD,22})) \right] \end{aligned} \quad (5.37)$$

şeklinde ifade edilir. İkincil sistemin servis kesilme olasılığı, (5.37)'den anlaşılacağı üzere birinci ve ikinci evrede $C \rightarrow D$ linkinin servis kesilme durumunda olma olasılığına aynı oranda bağlıdır. (5.37)'de $P_r(R_{st} \geq R_{CD,1})$, birinci evrede $C \rightarrow D$ linkinin servis kesilme durumunda olma olasılığını göstermektedir. $P_r(R_{st} \geq R_{CD,1})$ olasılığının, (5.33) kullanıldığında, $P_r(\Gamma_{D,1} \leq 2^{R_{st}} - 1)$ olasılığına eşit olduğu

görülmektedir. Burada, $P_r(\Gamma_{D,1} \leq 2^{R_{st}} - 1)$ olasılığı $\Gamma_{D,1}$ 'nin CDF'i yardımıyla bulunabilmektedir. İlk olarak sırasıyla $\lambda_1 = d_{CD}^v/(\rho/4)$, $\lambda_2 = d_{AD}^v/(\rho/4)$ ve $\lambda_3 = d_{BD}^v/(\rho/4)$ parametrelili $X_1 \triangleq \frac{\rho}{4}|g_{CD}|^2$, $X_2 \triangleq \frac{\rho}{4}|g_{AD}|^2$ ve $X_3 \triangleq \frac{\rho}{4}|g_{BD}|^2$ yeni rastlantı değişkenleri tanımlanıp (5.5) düzenlenirse,

$$\Gamma_{D,1} = \frac{X_1}{X_2 + X_3 + 1} \quad (5.38)$$

elde edilir. (5.38)'de hesaplamaları kolaylaştırmak amacıyla özellikle yüksek SNR bölgesinde geçerli olan,

$$\Gamma_{D,1} \approx \frac{X_1}{X_2 + X_3} \quad (5.39)$$

yaklaşımı yapılabilir. Burada (5.39) kullanılarak gerekli ara işlemler yapıldığında $P_r(\Gamma_{D,1} \leq 2^{R_{st}} - 1)$ olasılığı yani,

$$\begin{aligned} P_r(R_{st} \geq R_{CD,1}) &= 1 - \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_1(2^{R_{st}} - 1) + \lambda_2)(\lambda_1(2^{R_{st}} - 1) + \lambda_3)} \\ &= 1 - \frac{d_{AD}^v d_{BD}^v}{(d_{CD}^v(2^{R_{st}} - 1) + d_{AD}^v)(d_{CD}^v(2^{R_{st}} - 1) + d_{BD}^v)} \end{aligned} \quad (5.40)$$

şeklinde elde edilir. $P_r(R_{st} \geq R_{CD,1})$ olasılığı, (3.16) ile benzer ara adımlarla elde edilmektedir.

(5.37)'de $P_r(R_{pt} \geq R_{AB,D})$, birinci evrede $A \rightarrow D$ ve $B \rightarrow D$ linklerinin servis kesilme durumunda olma olasılığını göstermektedir. Diğer bir ifade ile x_A ve x_B işaretlerinin D'de doğru çözilememe olasılığıdır. $P_r(R_{pt} \geq R_{AB,D})$ olasılığının, (5.34)

kullanıldığında, $P_r\left(\frac{(2^{2R_{pt}} - 1)}{(\rho/4)} \geq (|g_{AD}|^2 + |g_{BD}|^2)\right)$ olasılığına eşit olduğu

görülmektedir. Burada, $P_r\left(\frac{(2^{2R_{pt}} - 1)}{(\rho/4)} \geq (|g_{AD}|^2 + |g_{BD}|^2)\right)$ olasılığı $(|g_{AD}|^2 +$

$|g_{BD}|^2)$ 'nin CDF'i yardımıyla bulunabilmektedir. X_1 ve X_2 birbirinden bağımsız üstel dağılımlı ve sırasıyla λ_1 , λ_2 parametrelili rastlantı değişkenleri olsun. $W = X_1 + X_2$ olmak üzere W rastlantı değişkeninin CDF'i

$$F_W(w) = \begin{cases} 1 - \left[\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) e^{-\lambda_1 w} + \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \right) e^{-\lambda_2 w} \right], & \lambda_1 \neq \lambda_2 \\ 1 - (1 + \lambda w) e^{-\lambda w}, & \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda \end{cases} \quad (5.41)$$

şeklinde [28]. (5.41)'den hareketle eğer $d_{AC} = d_{BC}$ ise birinci evrede $A \rightarrow D$ ve $B \rightarrow D$ linklerinin servis kesilme durumunda olma olasılığı,

$$P_r(R_{pt} \geq R_{AB,D}) = 1 - \left(1 + d_{AD}^v \left(\frac{2^{2R_{pt}} - 1}{\rho/4} \right) \right) e^{-d_{AD}^v \left(\frac{2^{2R_{pt}} - 1}{(\rho/4)} \right)} \quad (5.42)$$

olarak elde edilirken, $d_{AC} \neq d_{BC}$ ise,

$$P_r(R_{pt} \geq R_{AB,D}) = 1 - \left[\left(\frac{d_{BD}^v}{d_{BD}^v - d_{AD}^v} \right) e^{-d_{AD}^v \left(\frac{R_p}{(\rho/4)} \right)} + \left(\frac{d_{AD}^v}{d_{AD}^v - d_{BD}^v} \right) e^{-d_{BD}^v \left(\frac{R_p}{(\rho/4)} \right)} \right] \quad (5.43)$$

şeklinde elde edilir. Burada, $R_p = 2^{2R_{pt}} - 1$ 'dir.

(5.37)'de $P_r(R_{st} \geq R_{CD,21})$, birinci evrede x_A ve x_B işaretlerinin D kullanıcısında başarılı bir şekilde çözüldüğü koşulu altında ikinci evrede $C \rightarrow D$ linkinin servis kesilme durumunda olma olasılığını göstermektedir. $P_r(R_{st} \geq R_{CD,21})$ olasılığının, (5.11) ve (5.35) kullanıldığında, $P_r \left(\frac{R_s}{(1-\alpha)(\rho/4)} \geq |g_{CD}|^2 \right)$ olasılığına eşit olduğu görülmektedir. Burada $R_s = 2^{R_{st}} - 1$ 'dir ve $P_r \left(\frac{R_s}{(1-\alpha)(\rho/4)} \geq |g_{CD}|^2 \right)$ olasılığı $|g_{CD}|^2$ 'nin CDF'i yardımıyla bulunabilmektedir. Bu durumda,

$$\begin{aligned} Pr(R_{st} \geq R_{CD,21}) &= P_r \left(\frac{R_s}{(1-\alpha)(\rho/4)} \geq |g_{CD}|^2 \right) \\ &= \int_0^{\frac{R_s}{(1-\alpha)(\rho/4)}} d_{CD}^v e^{-d_{CD}^v x_{CD}} dx_{CD} \\ &= 1 - e^{-d_{CD}^v \frac{R_s}{(1-\alpha)(\rho/4)}} \end{aligned} \quad (5.44)$$

olarak elde edilir.

(5.37)'de $P_r(R_{st} \geq R_{CD,22})$, birinci evrede x_A ve x_B işaretlerinin D kullanıcısında başarılı bir şekilde çözülemediği koşulu altında ikinci evrede $C \rightarrow D$ linkinin servis kesilme durumunda olma olasılığını göstermektedir. $P_r(R_{st} \geq R_{CD,22})$ olasılığının, (5.9) ve (5.36) kullanıldığında, $P_r \left(\frac{R_s}{((\rho/4)-\alpha(\rho/4)-R_s\alpha(\rho/4))} \geq |g_{CD}|^2 \right)$ olasılığına eşit olduğu görülmektedir. Burada eğer $\frac{R_s}{((\rho/4)-\alpha(\rho/4)-R_s\alpha(\rho/4))} \leq 0$ ise $P_r(R_{st} \geq R_{CD,22}) = 1$ 'dir. Fakat eğer $\frac{R_s}{((\rho/4)-\alpha(\rho/4)-R_s\alpha(\rho/4))} > 0$ ise $P_r \left(\frac{R_s}{((\rho/4)-\alpha(\rho/4)-R_s\alpha(\rho/4))} \geq |g_{CD}|^2 \right)$ olasılığı $|g_{CD}|^2$ 'nin CDF'i yardımıyla bulunabilmektedir ve

$$\begin{aligned}
Pr(R_{st} \geq R_{CD,22}) &= P_r \left(\frac{R_s}{((\rho/4) - \alpha(\rho/4) - Rs\alpha(\rho/4))} \geq |g_{CD}|^2 \right) \\
&= \int_0^{\frac{R_s}{((\rho/4) - \alpha(\rho/4) - Rs\alpha(\rho/4))}} d_{CD}^v e^{-d_{CD}^v x_{CD}} dx_{CD} \\
&= 1 - e^{-d_{CD}^v \left(\frac{R_s}{((\rho/4) - \alpha(\rho/4) - Rs\alpha(\rho/4))} \right)} \tag{5.45}
\end{aligned}$$

olarak elde edilir. Son olarak, eğer $\frac{R_s}{((\rho/4) - \alpha(\rho/4) - Rs\alpha(\rho/4))} > 0$ ise, $d_{AC} = d_{BC}$ için ikincil sistemin servis kesilme olasılığı, (5.40),(5.42),(5.44) ve (5.45) eşitlikleri kullanılarak (5.37) yeniden düzenlendiğinde,

$$\begin{aligned}
P(P_{out}^{SU}) &= 1 - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{d_{AD}^v d_{BD}^v}{(d_{CD}^v R_s + d_{AD}^v) + (d_{CD}^v R_s + d_{BD}^v)} \right) \right. \\
&\quad + \left(\left(\left(1 + d_{AD}^v \frac{R_p}{(\rho/4)} \right) e^{-d_{AD}^v \left(\frac{R_p}{(\rho/4)} \right)} \right) \times \left(e^{-d_{CD}^v \left(\frac{R_s}{(1-\alpha)(\rho/4)} \right)} \right) \right. \\
&\quad + \left(1 - \left(1 + d_{AD}^v \frac{R_p}{(\rho/4)} \right) e^{-d_{AD}^v \left(\frac{R_p}{(\rho/4)} \right)} \right) \\
&\quad \left. \left. \times \left(1 - e^{-d_{CD}^v \left(\frac{R_s}{((\rho/4) - \alpha(\rho/4) - Rs\alpha(\rho/4))} \right)} \right) \right) \right] \tag{5.46}
\end{aligned}$$

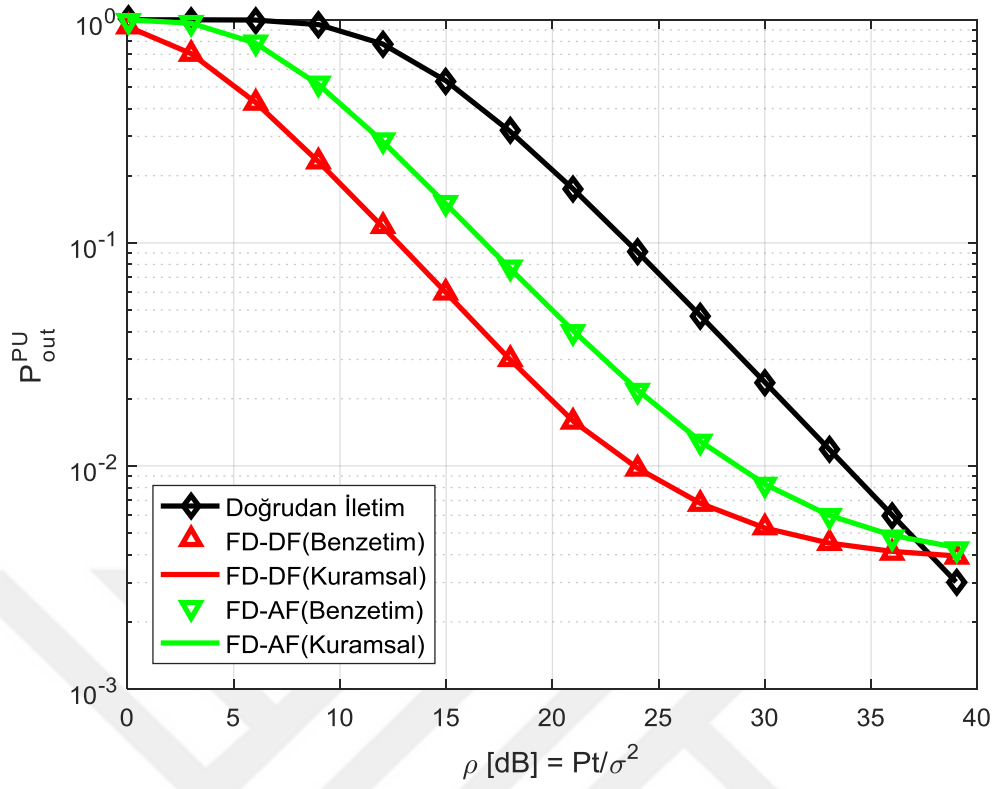
şeklinde elde edilirken, eğer $\frac{R_s}{((\rho/4) - \alpha(\rho/4) - Rs\alpha(\rho/4))} \leq 0$ ise,

$$\begin{aligned}
P(P_{out}^{SU}) &= 1 - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{d_{AD}^v d_{BD}^v}{(d_{CD}^v R_s + d_{AD}^v) + (d_{CD}^v R_s + d_{BD}^v)} \right) \right. \\
&\quad \left. + \left(\left(1 + d_{AD}^v \frac{R_p}{(\rho/4)} \right) e^{-d_{AD}^v \left(\frac{R_p}{(\rho/4)} \right)} \right) \times \left(e^{-d_{CD}^v \left(\frac{R_s}{(1-\alpha)(\rho/4)} \right)} \right) \right] \tag{5.47}
\end{aligned}$$

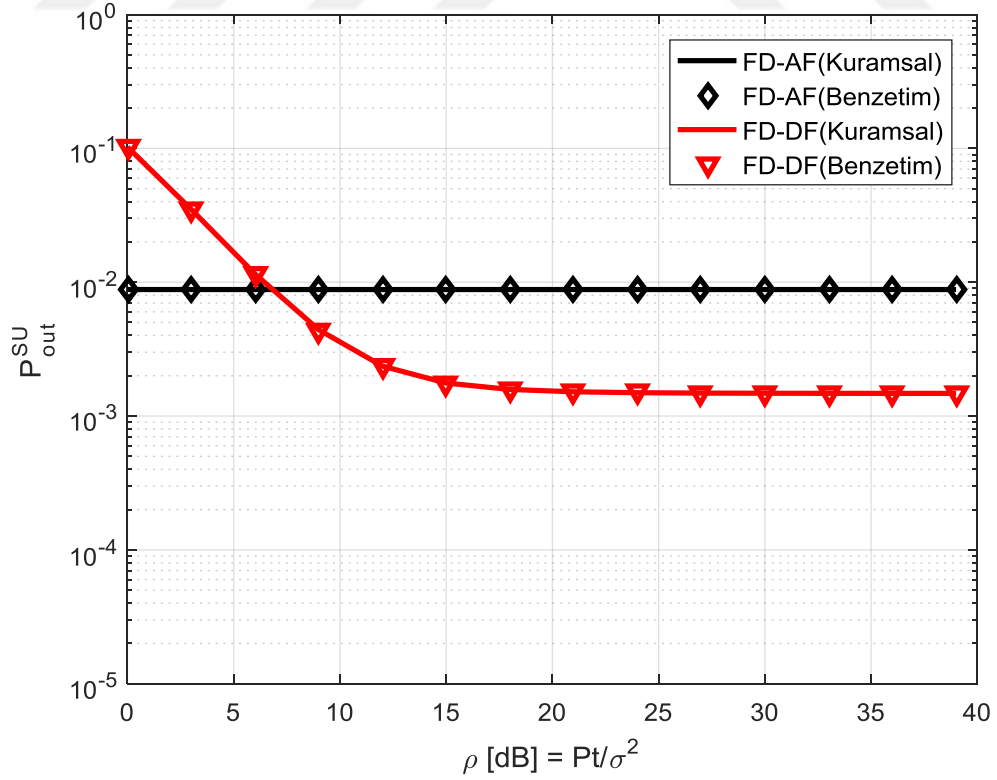
olarak elde edilir.

5.3 Başarım Değerlendirmeleri ve Karşılaştırmalar

Bu alt bölümde, önerilen spektrum paylaşım protokolü için değişik parametrelere göre servis kesilme başarım eğrileri bilgisayar benzetimleri ile elde edilmiş ve sonuçlar Bölüm 4.2’de anlatılan literatürdeki referans modele ait servis kesilme başarımları ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda önerilen sistem için kuramsal çıkarımlar benzetim sonuçları ile doğrulanmıştır.



Şekil 5.2 : Birincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.



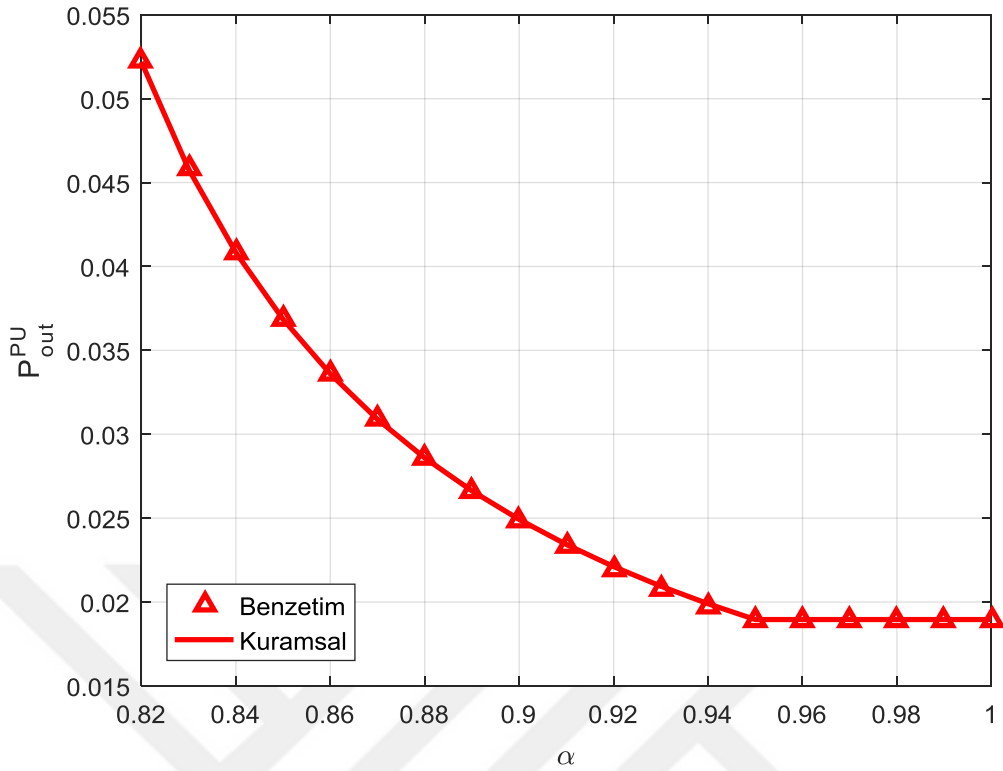
Şekil 5.3 : İkincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.

Yapılan benzetimlerde birincil kullanıcılar arasındaki uzaklık 1'e normalleştirilmiş ve bilişsel röle C iki birincil kullanıcının ortasına ($d_{AC} = d_{BC} = 0.5$) yerleştirilmiştir. Ayrıca yapılan tüm benzetimlerde yol kaybı üsteli $\nu = 4$ alınmıştır.

Şekil 5.2 ve 5.3'te sırasıyla birincil ve ikincil sistemin servis kesilme olasılığı, iletim işaret-gürültü oranı ρ 'ya bağlı olarak incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -20\text{dB}$, güç paylaşırma çarpanı $\alpha = 0.95$, ikincil kullanıcılar arasındaki mesafe $d_{CD} = 0.1$ olarak alınmıştır. Ayrıca Şekil 5.2'de birincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{pt} = 1$, Şekil 5.3'de ise ikincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{st} = 1$ olarak seçilmiştir. Şekil 5.2'de, önerilen sistem, Bölüm 4.2'de anlatılan referans sistem ve A ile B arasındaki doğrudan iletme ait birincil servis kesilme başarımları eğrileri görülmektedir. Burada A ile B arasındaki doğrudan iletim için iki yönlü servis kesilme olasılığı,

$$P_{out}^{direct} = 1 - \left[\exp \left(-d_{AB}^{\nu} (2^{2R_{pt}} - 1) / (\rho/4) \right) \right]^2 \quad (5.48)$$

olarak bulunmaktadır. Şekil 5.2'deki benzetim sonuçlarında $\rho = 37\text{dB}$ 'ye kadar olan bölgede önerilen sistemin, A ile B arasındaki doğrudan iletim durumu ve referans sistem yani tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağına göre daha iyi bir birincil servis kesilme başarımına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bilişsel rölenin tam-çift yönlü olarak çalıştığı Bölüm 4.2'deki referans sistem ve önerilen sistem için ρ arttıkça birincil sisteme ait servis kesilme olasılığının sabit bir değere yakınsadığı görülmektedir. Bunun nedeni ρ 'nun artmasıyla artık döngü girişiminin etkisinin artması ve bir değerden sonra rölede alınan işaretler arasında tamamen baskın hale gelmesidir. σ_L^2 değeri arttıkça birincil sistem servis kesilme olasılığı daha hızlı bir şekilde sabit bir değere yakınsamaktadır. Şekil 5.3'de önerilen sistem ve referans sisteme ait ikincil sistemin servis kesilme başarımları eğrileri görülmektedir. Burada ρ 'nun 7dB veya daha yüksek bir değer aldığı bölgede önerilen sistem, tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağına göre daha iyi ikincil servis kesilme başarımına sahiptir. ρ 'nun 7dB'nin altında olduğu bölgede önerilen sistemin daha kötü başarımlar göstermesinin nedeni, birinci evrede D'de A ve B'den gelen birincil işaretlerin düşük SNR nedeniyle doğru çözülmemesi ve bunun sonucu olarak ikinci evrede D'de alınan işarettaki birincil işaretlerin oluşturduğu girişimin giderilememesidir. Diğer bir deyişle birinci evrede D'de A ve B'den gelen işaretlerin doğru çözülmemesi ikinci evrede $C \rightarrow D$

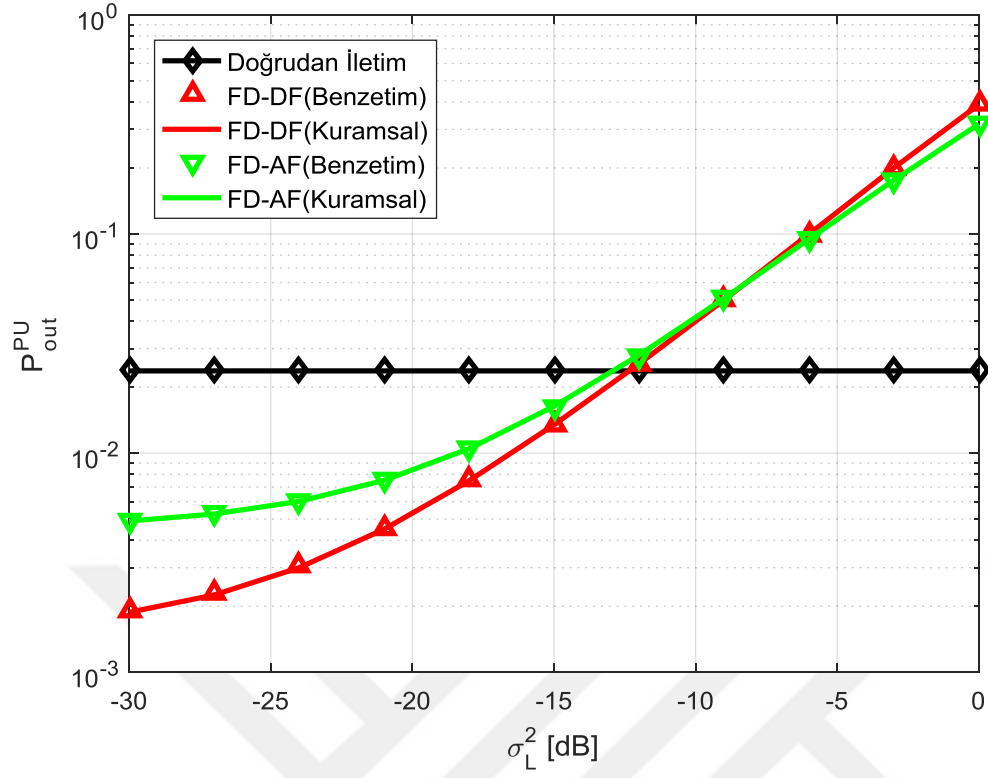


Şekil 5.4 : Önerilen spektrum paylaşım protokolünde birincil kullanıcılara ait servis kesilme başarımının α 'ya bağlı değişimi.

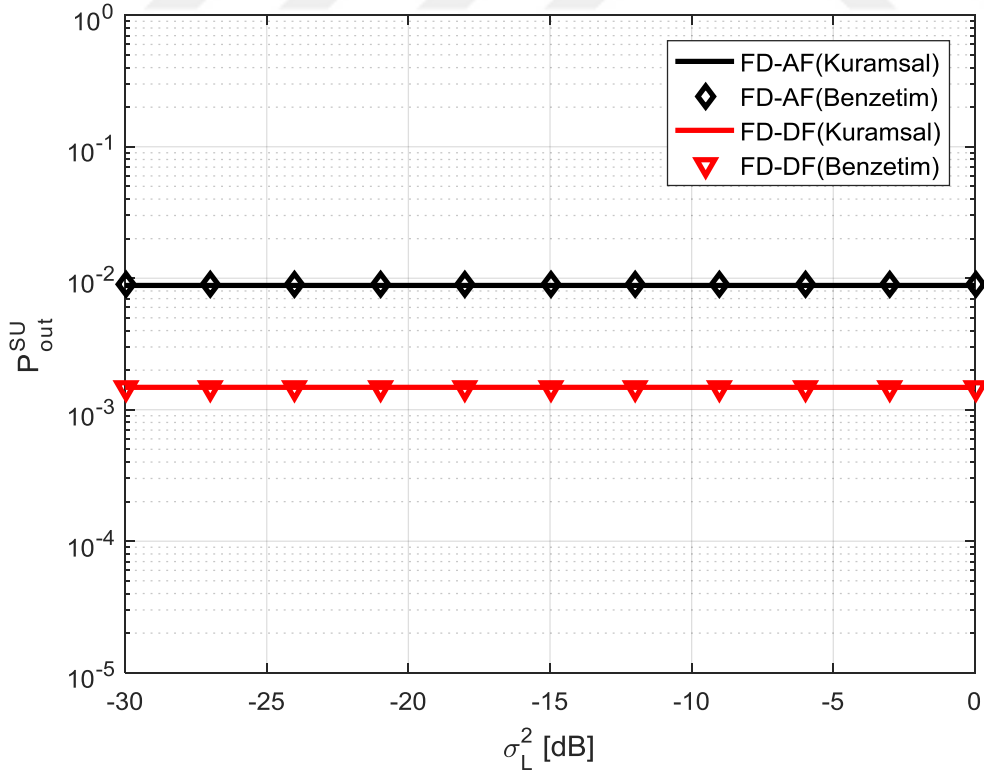
linkinin servis kesilme durumunda olma olasılığını arttırmaktadır. Ayrıca Şekil 5.3'de tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağı için ikincil sistem servis kesilme olasılığının tüm ρ değerleri boyunca sabit olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni birinci evrede C'den gelen ikincil işaretin gücünün artmasının yanında aynı zamanda A ve B'den gelen girişim işaretlerinin gücünün de artmasıdır.

Şekil 5.4'de önerilen spektrum paylaşım protokolü için güç paylaşırma çarpanı α 'nın birincil sistem servis kesilme olasılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -20\text{dB}$, birincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{pt} = 1$, iletim işaret-gürültü oranı $\rho = 20\text{dB}$ olarak alınmıştır. α değerinin artmasıyla daha iyi birincil sistem servis kesilme başarımı elde edilmekte ve $\alpha > 0.95$ için servis kesilme olasılığı sabit kalmaktadır.

Şekil 5.5 ve 5.6'da sırasıyla birincil ve ikincil sistemin servis kesilme olasılığı, artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması σ_L^2 'ye bağlı olarak incelenmiştir. İletim işaret gürültü oranı $\rho = 30\text{dB}$, güç paylaşırma çarpanı $\alpha = 0.95$, ikincil kullanıcılar arasındaki mesafe $d_{CD} = 0.1$ olarak alınmıştır. Ayrıca Şekil 5.5'de birincil



Şekil 5.5 : Birincil sistem servis kesilme olasılıklarının σ_L^2 [dB]'ye göre değişimi

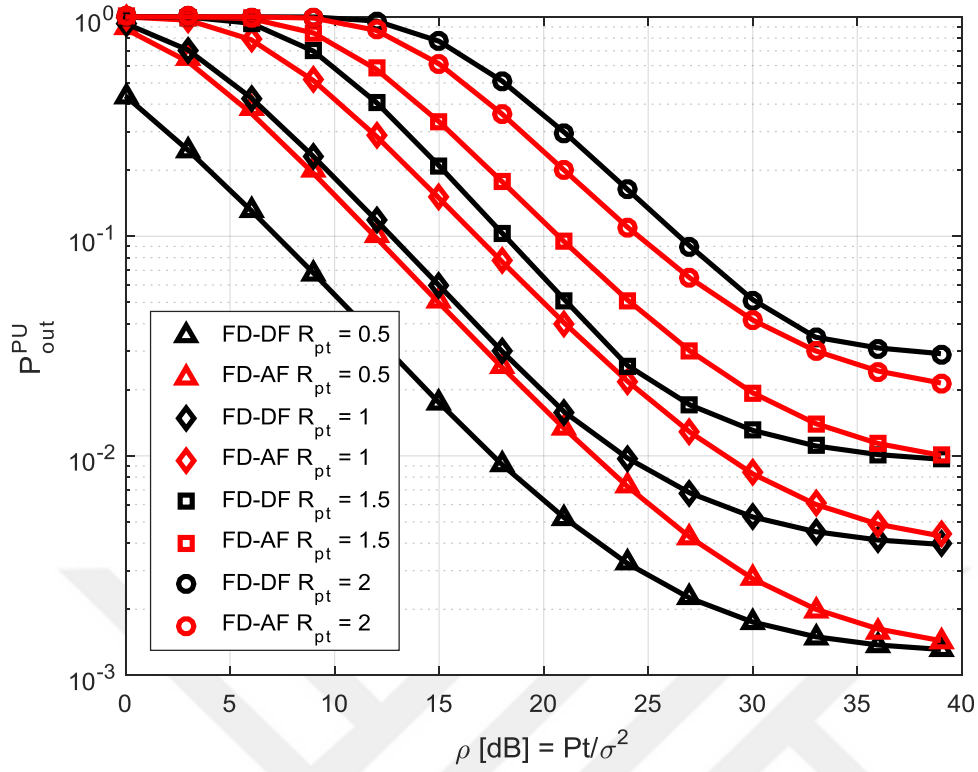


Şekil 5.6 : İkincil sistem servis kesilme olasılıklarının σ_L^2 [dB]'ye göre değişimi.

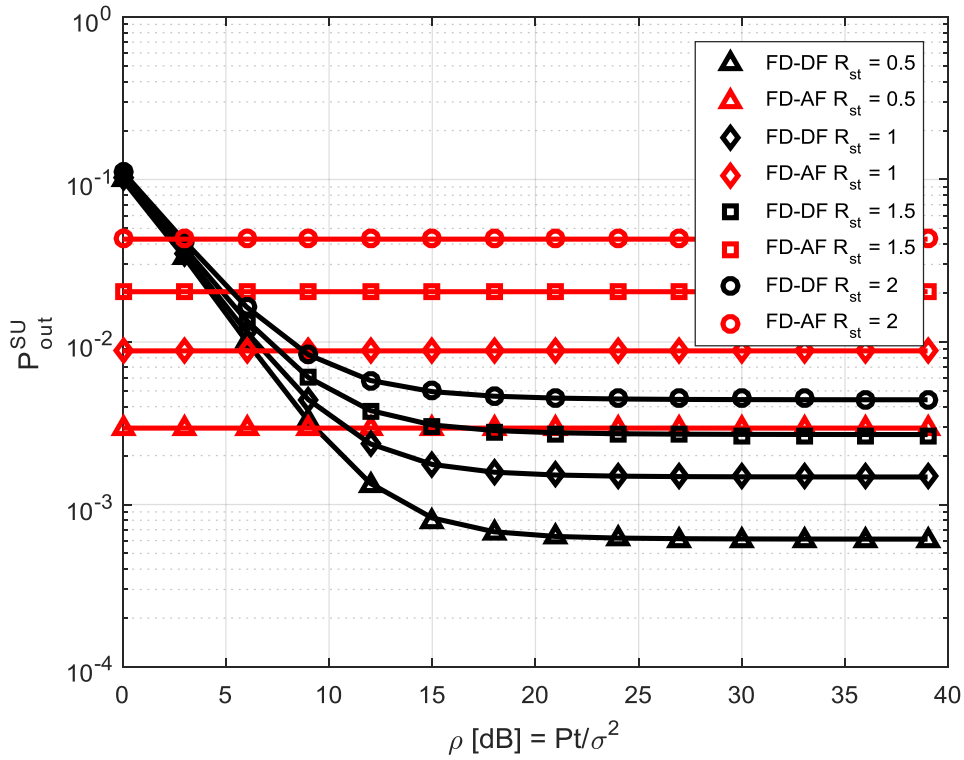
kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{pt} = 1$, Şekil 5.6'da ise ikincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{st} = 1$ olarak seçilmiştir. Şekil 5.5'de, döngü girişim şiddeti arttıkça önerilen sistem için birincil servis kesilme olasılığının arttığı görülmektedir. σ_L^2 'nin -12dB veya daha küçük bir değer aldığı durumlarda önerilen sistem, Bölüm 4.2'de tanıtilen referans sistem ve doğrudan iletim durumuna göre daha iyi birincil servis kesilme başarımına sahiptir. Burada doğrudan iletim durumunda servis kesilme başarımının sabit kalmasının nedeni doğrudan iletimde sadece iki uç biriminin olması ve işbirliği için tam-çift yönlü olarak çalışan bir röle kullanılmamasıdır. Şekil 5.6'da döngü girişim şiddeti arttıkça önerilen sistem ve referans sistem için ikincil sistem servis kesilme başarımı değişmemektedir. Referans sistem olan tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağındaki ikincil kullanıcılara ait servis kesilme olasılığının döngü girişimine bağlı olmamasının nedeni bu protokolde bilişsel rölenin sadece ilk evrede ikincil alıcıya iletim yapmasıdır.

Şekil 5.7 ve 5.8'de sırasıyla birincil ve ikincil sistemin servis kesilme olasılığı, farklı R_{pt} ve R_{st} değerleri için ρ 'ya bağlı olarak incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -20\text{dB}$, ikincil kullanıcılar arasındaki mesafe $d_{CD} = 0.1$ olarak alınmıştır. Ayrıca birincil sistem servis kesilme olasılığının incelendiği Şekil 5.7'de $R_{st} = 1$ ve ikincil sistem servis kesilme olasılığının incelendiği Şekil 5.8'de $R_{pt} = 1$ 'dir. Şekil 5.7'de $R_{pt} = 0.5$ haricindeki birincil hedeflenen hızları için önerilen sistem, referans sisteme göre daha iyi birincil sistem servis kesilme başarımına sahiptir. Şekil 5.8'de ise tüm R_{st} değerleri için önerilen sistemin, referans sisteme göre daha iyi ikincil sistem servis kesilme başarımına sahip olduğu görülmektedir.

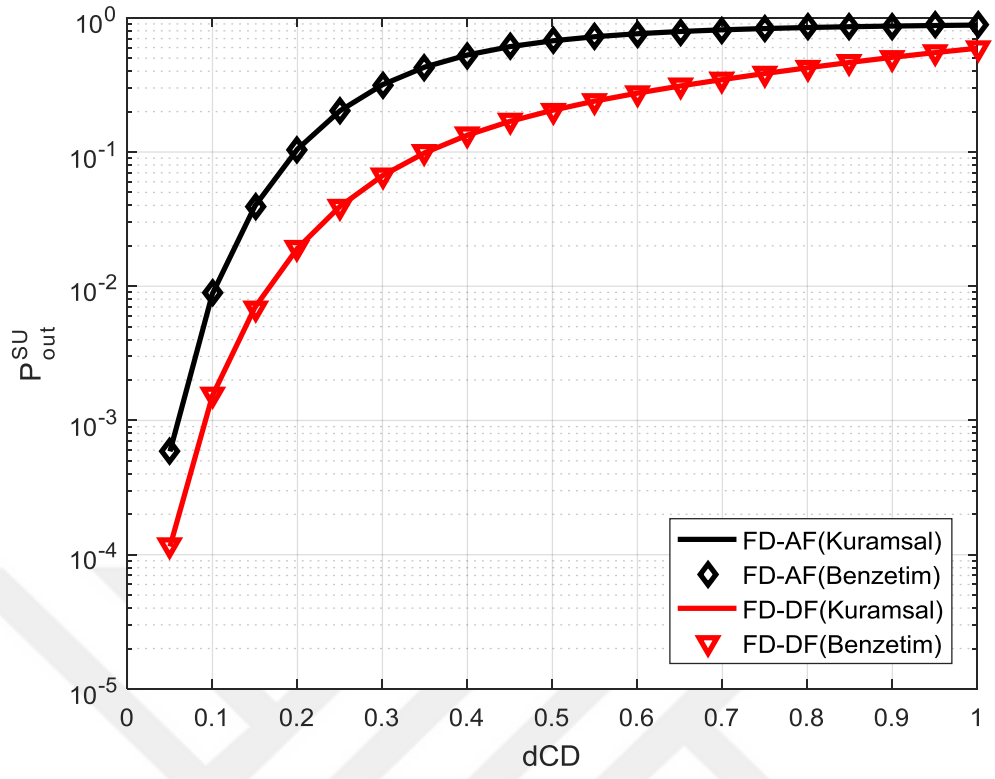
Şekil 5.9'da önerilen spektrum paylaşım protokolü ve referans sistem için ikincil sistemin servis kesilme olasılığının d_{CD} 'ye göre değişimi incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -20\text{dB}$, $R_{st} = 1$, güç paylaşırma çarpanı $\alpha = 0.95$, iletim işaret-gürültü oranı $\rho = 20\text{dB}$ olarak seçilmiştir. Burada C ile D arasındaki uzaklık arttıkça ikincil sistem servis kesilme başarımlarının olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenmektedir.



Şekil 5.7 : Birincil sistem servis kesilme olasılıklarının farklı R_{pt} değerleri için ρ [dB]'ya göre değişimi.



Şekil 5.8 : İkincil sistem servis kesilme olasılıklarının farklı R_{st} değerleri için ρ [dB]'ya göre değişimi.



Şekil 5.9 : İkincil sistem servis kesilme olasılıklarının d_{CD} 'ye göre değişimi.



6. TAM-ÇİFT YÖNLÜ BİLİŞSEL RÖLE AĞLARI İÇİN ENERJİ HASATLAMALI SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ

Bölüm 4.2’de literatürdeki tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağına ait spektrum paylaşım protokolü tanıtılmıştır. Bölüm 5’de ise tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağı için yeni bir spektrum paylaşım protokolü önerilmiş ve analizler yapılmıştır. Bu bölümde, Bölüm 4.2’de tanıtılan sistem ile Bölüm 5’de yeni önerilen protokole enerji hasatlama uygulanması durumunda incelemeler ve servis kesilme başarımları analizleri yapılacaktır. Sistemlerdeki bilişsel rölenin sırasıyla PSR, TSR veya ASR enerji hasatlama protokolü kullanması durumu incelenecektir. Sistemlerdeki birincil ve ikincil kullanıcıların göndereceği ve alacağı işaretler, bilişsel röledeki ve hedef kullanıcılardaki SINR ve ulaşılabilir anlık hız ifadeleri (achievable instantaneous rate) belirlenecektir. Sistemlerdeki birincil ve ikincil kullanıcılara ait servis kesilme olasılıklarının kuramsal ifadeleri çıkarılacak ve yapılan bilgisayar benzetimleri ile doğrulanacaktır. Ayrıca uygulanan belirli enerji hasatlama protokolü için Bölüm 4.2’de tanıtılan sistem ile Bölüm 5’de yeni önerilen sistemin birincil ve ikincil sistem servis kesilme başarımları farklı parametreler bakımından karşılaştırılacaktır.

6.1 Tam-Çift Yönlü Bilişsel AF Röle Ağı İçin Enerji Hasatlama

Bu alt bölümde, Bölüm 4.2’de tanıtılan referans sistem için bilişsel rölenin enerji hasatlama alıcı yapısına sahip olduğu durum incelenecektir. Böylece bilişsel rölenin enerji kaynağından bağımsız olarak çalışabildiği varsayıp, TSR, PSR veya ASR enerji hasatlama protokollerini kullanarak alınan işaretten hem bilgi işleme hem de enerji hasatlama yaptığı durum için kuramsal çıkarımlar yapılacaktır.

6.1.1 Enerji hasatlamalı protokol tanımı

Ele alınan sistem modeli Şekil 4.2’deki gibidir. Bu bölümde, Bölüm 4.2’deki tanımlamalardan farklı olarak kullanıcıların harcağı güçler ile ilgili değişiklik yapılmış ve ek büyüklükler tanımlanmıştır. İletimin ilk evresinde, A ve B birincil kullanıcıları işaretlerini iletmek için eşit ve $P\mu_p$ güç harcarken, C bilişsel rölesi ilk evrede $P\mu_{s,1}$

Çizelge 6.1 : TSR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel AF röle ağı için iletim çizelgesi.

İletim Zaman Aralıkları	A	B	C
εT	$A \rightarrow C$ 'ye x_A işaretinin iletimi	$B \rightarrow C$ 'ye x_B işaretinin iletimi	Rölede enerji hasatlama, $C \rightarrow D$ 'ye x_C işaretinin iletimi
$(1 - \varepsilon)T/2$	$A \rightarrow C$ 'ye x_A işaretinin iletimi	$B \rightarrow C$ 'ye x_B işaretinin iletimi	Rölede bilgi işleme (AF), $C \rightarrow D$ 'ye x_C işaretinin iletimi
$(1 - \varepsilon)T/2$	Sessiz	Sessiz	$C \rightarrow A$ 'ya ve $C \rightarrow B$ 'ye x_R işaretinin iletimi

gücü ile işaretini D'ye iletmektedir. Burada, iletim güç katsayıları μ_p ve $\mu_{s,1}$, 0 ile 1 arasında bir değer almakta ve ilk evrede A, B ve C kullanıcılarının P gücünün yüzde kaçlık kısmını harcadığını belirlemektedir. Ayrıca, $\rho = P/\sigma^2$ olarak tanımlanmıştır. Bilişsel röle C, ilk evrede hasatladığı enerjiye bağlı olarak ikinci evrede P_H gücü ile iletim yapmaktadır. Diğer bir ifade ile C, ikinci evrede dışarıdan enerji kaynağına ihtiyaç duymadan P_H gücü ile iletimini gerçekleştirmektedir. Ayrıca ek olarak PSR protokolü için güç bölme çarpanı β , TSR protokolü için zaman bölme çarpanı ε ve enerji dönüşüm verimi η ile tanımlanmıştır.

A'dan B'ye bilgi iletimi iki evrede gerçekleşmektedir ve blok iletişim süresi T kabul edilmiştir. Çizelge 6.1'de TSR protokolü kullanılması durumunda ele alınan sistem için iletim yapısı görülmektedir. İlk evrede A ve B kullanıcıları işaretlerini C bilişsel rölesine göndermektedir. TSR protokolü kullanılması durumunda ilk evrede bilişsel röle, εT süresince alınan işaretten enerji hasatlamakta daha sonra, $\frac{(1-\varepsilon)T}{2}$ süresi boyunca ise bilgi işlemektedir. TSR protokolü için ilk evrede toplam $\varepsilon T + \frac{(1-\varepsilon)T}{2}$ süre harcanmaktadır ve hem enerji hasatlama hem de temelband bilgi işleme alıcısının girişindeki işaret,

$$y_{CI} = y_{CE} = \sqrt{P\mu_p}g_{AC}x_A + \sqrt{P\mu_p}g_{BC}x_B + \sqrt{P\mu_{s,1}}g_Lx_C + n_C \quad (6.1)$$

şeklindedir. (6.1)'de y_{CI} , bilgi işleme alıcısının girişindeki işareti göstermektedir ve y_{CI} için $n_C = n_C^{[a]} + n_C^{[c]}$ olup alıcı antenden ve RF bandından temelbanda dönüşümden kaynaklanan AWGN'nin toplamına eşittir. y_{CE} ise enerji hasatlama alıcısının girişindeki işareti göstermektedir ve y_{CE} için $n_C = n_C^{[a]}$ olup alıcı antenden

Çizelge 6.2 : PSR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel AF röle ağı için iletim çizelgesi.

İletim Zaman Aralıkları	A	B	C
$T/2$	$A \rightarrow C$ 'ye x_A işaretinin iletimi	$B \rightarrow C$ 'ye x_B işaretinin iletimi	Rölede enerji hasatlama βP , Rölede bilgi işleme $(1 - \beta)P$ (AF), $C \rightarrow D$ 'ye x_C işaretinin iletimi
$T/2$	Sessiz	Sessiz	$C \rightarrow A$ 'ya ve $C \rightarrow B$ 'ye x_R işaretinin iletimi

kaynaklanan AWGN'ye eşittir.

Çizelge 6.2'de PSR protokolü kullanılması durumunda ele alınan sistem için iletim yapısı görülmektedir. İlk evrede bilişsel röle, $T/2$ sürede alınan işaretin gücünün β ile orantılı olan kısmını enerji hasatlama için kullanmakta ve $(1 - \beta)$ ile orantılı olan kısmını bilgi işleme için kullanmaktadır. İlk evrede enerji hasatlama alıcısının girişindeki işaret,

$$y_{CE} = \sqrt{P\mu_p\beta}g_{AC}x_A + \sqrt{P\mu_p\beta}g_{BC}x_B + \sqrt{P\mu_{s,1}\beta}g_Lx_C + n_C \quad (6.2)$$

olarak elde edilir. (6.2)'de $n_C = \sqrt{\beta}n_C^{[a]}$ olup alıcı antenden kaynaklanan AWGN'ye eşittir. Temelband bilgi işleme alıcısının girişindeki işaret ise,

$$y_{CI} = \sqrt{P\mu_p(1 - \beta)}g_{AC}x_A + \sqrt{P\mu_p(1 - \beta)}g_{BC}x_B + \sqrt{P\mu_{s,1}(1 - \beta)}g_Lx_C + n_C \quad (6.3)$$

şeklinde elde edilir. (6.3)'de $n_C = \sqrt{(1 - \beta)}n_C^{[a]} + n_C^{[c]}$ olup alıcı anten ve RF bandından temelbanda dönüşümden kaynaklanan AWGN etkisini içermektedir.

Çizelge 6.3'de ASR protokolü kullanılması durumunda ele alınan sistem için iletim yapısı görülmektedir. ASR protokolünde gelen işaretleri almak için C bilişsel rölesinde iki anten kullanılmaktadır. İlk evrede bilişsel röle, $T/2$ sürede birinci antenden alınan işareti enerji hasatlama için kullanmakta ve ikinci antenden alınan işareti ise bilgi işleme için kullanmaktadır. ASR protokolü için ilk evrede enerji hasatlama alıcısının girişindeki işaret y_{CE} ve temelband bilgi işleme alıcısının girişindeki işaret y_{CI} , (6.1)'deki gibi yazılabilir.

Diğer taraftan eş zamanlı olarak C bilişsel rölesi, TSR protokolü için $\varepsilon T + \frac{(1 - \varepsilon)T}{2}$, PSR ve ASR protokolü için ise $T/2$ süresi boyunca x_C ikincil işaretini D'ye iletmektedir.

Çizelge 6.3 : ASR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel AF röle ağı için iletim çizelgesi.

İletim Zaman Aralıkları	A	B	C
$T/2$	$A \rightarrow C$ 'ye x_A işaretinin iletimi	$B \rightarrow C$ 'ye x_B işaretinin iletimi	Rölenin 1. anteninde enerji hasatlama, Rölenin 2. anteninde bilgi işleme (AF), $C \rightarrow D$ 'ye x_C işaretinin iletimi
$T/2$	Sessiz	Sessiz	$C \rightarrow A$ 'ya ve $C \rightarrow B$ 'ye x_R işaretinin iletimi

Tam-çift yönlü iletimden dolayı C rölesi üzerinde artık döngü girişimi oluşmakta ve bu girişim C bilişsel rölesinde hasatlanan enerjiyi ve bilgi işleme başarımını etkilemektedir. İlk evrede TSR, PSR veya ASR protokolü kullanımından bağımsız olarak D'de alınan işaret,

$$y_{D,1} = \sqrt{P\mu_{s,1}}g_{CD}x_C + \sqrt{P\mu_p}g_{AD}x_A + \sqrt{P\mu_p}g_{BD}x_B + n_D \quad (6.4)$$

şeklindedir. (6.4)'de ilk terim D'de istenen ikincil işarete ait terim iken ikinci ve üçüncü terimler birincil işaretlerden kaynaklanan girişim terimleridir. İlk evrede D'de elde edilen SINR,

$$\Gamma_{D,1} = \frac{P\mu_{s,1}|g_{CD}|^2}{P\mu_p(|g_{AD}|^2 + |g_{BD}|^2) + \sigma^2} \quad (6.5)$$

şeklindedir.

Bu alt bölümde, PSR, TSR veya ASR'nin kullanılmasına bağlı olarak tekrardan kaçınmak amacıyla bundan sonraki eşitlik ve denklemler modüler bir şekilde yazılmıştır. Herhangi bir eşitlik ε ve β 'dan herhangi birini içeriyorsa veya ikisini içeriyorsa $\beta = 0$ alındığında eşitlik TSR protokolü için elde edilirken, $\varepsilon = 0$ alındığında eşitlik PSR protokolü için elde edilmektedir. ASR protokolü için ise, eşitliklerde β ve ε 'nın alacağı değerler eşitliklerin tanımlandığı yerlerde belirtilecektir.

C bilişsel rölesinde hasatlanan toplam enerji, (6.1) ve (6.2) kullanıldığında hem TSR hem PSR hem de ASR için,

$$E_H = \eta T \left(\varepsilon + \beta \left(\frac{1 - \varepsilon}{2} \right) \right) [P\mu_p(|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) + P\mu_{s,1}\sigma_L^2] \quad (6.6)$$

şeklinde elde edilir. (6.6)'da enerji dönüşüm verimi η , $0 < \eta < 1$ arasında değer almakta olup rektifikasyon işlemine ve enerji hasatlama devresine bağlıdır. İkinci evrede C bilişsel rölesinin iletim gücü, (6.6) kullanılarak,

$$P_H = \eta \left(\frac{2\varepsilon}{(1-\varepsilon)} + \beta \right) [P\mu_p(|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) + P\mu_{s,1}\sigma_L^2] \quad (6.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (6.7)'de görüldüğü gibi P_H , hasatlanan enerjinin yayın evresi iletim süresine bölünmesiyle $\frac{E_H}{(1-\varepsilon)(T/2)}$ olarak bulunmaktadır ASR protokolü için (6.7)'de $\beta = 1$ ve $\varepsilon = 0$ alınmalıdır.

İkinci evrede bilişsel röle, AF aktarma protokolünü kullanarak P_H gücü ile birincil kullanıcının iletimine yardım etmekte ve x_R işaretini birincil kullanıcılar A ve B'ye iletmektedir. Ayrıca, ikinci evrede, TSR için $\frac{(1-\varepsilon)T}{2}$ süresi boyunca iletim yapılırken, PSR ve ASR için $T/2$ süresi boyunca iletim yapılmaktadır. C'den iletilen işaret,

$$x_R = \sqrt{P_H} \frac{y_{CI}}{\gamma} \quad (6.8)$$

şeklinde dir. (6.8)'de γ , kuvvetlendirme katsayısıdır ve gönderilecek işaret için normalizasyon işlemi sağlayarak verici gücünün osilasyona girmesini önlemektedir. γ katsayısı,

$$\gamma = \sqrt{P\mu_p(1-\beta)(|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) + P\mu_{s,1}(1-\beta)\sigma_L^2 + \sigma_C^2} \quad (6.9)$$

olarak seçilebilir. (6.9)'de $\sigma_C^{[a]} = \sigma_C^{[c]} = \sigma^2$ olmak üzere gürültü varyansı $\sigma_C^2 = \sqrt{(1-\beta)\sigma_C^{[a]} + \sigma_C^{[c]}}$ ifadesine eşittir ve diğer terimlerin yanında ihmal edilebilir büyüklüktedir. Buradan hareketle hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından γ yaklaşık olarak,

$$\gamma \cong \sqrt{P\mu_p(1-\beta)(|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) + P\mu_{s,1}(1-\beta)\sigma_L^2} \quad (6.10)$$

şeklinde yazılabilir. ASR protokolü için (6.10)'da $\beta = 0$ alınmalıdır. C bilişsel rölesinin iletimi sonucunda B kullanıcısında alınan işaret,

$$y_B = g_{BC}x_R + n_B \quad (6.11)$$

şeklinde dir. (6.8) ve (6.10) kullanılarak (6.11) yeniden yazıldığında,

$$y_B = \frac{\sqrt{P_H} g_{BC} y_{CI}}{\sqrt{P\mu_p(1-\beta)(|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) + P\mu_{s,1}(1-\beta)\sigma_L^2}} + n_B \quad (6.12)$$

elde edilir. (6.3) ve (6.7), (6.12)'de yerine konup düzenlendiğinde,

$$y_B = \sqrt{\eta \frac{2\varepsilon + \beta - \varepsilon\beta}{(1-\varepsilon)}} P\mu_p (g_{BC} g_{AC} x_A + g_{BC} g_{BC} x_B) \\ + \sqrt{\eta \frac{2\varepsilon + \beta - \varepsilon\beta}{(1-\varepsilon)}} P\mu_{s,1} g_L g_{BC} x_C + \sqrt{\eta \frac{2\varepsilon + \beta - \varepsilon\beta}{(1-\varepsilon)(1-\beta)}} g_{BC} n_C + n_B \quad (6.13)$$

ifadesi bulunur. (6.13)'de ilk terim A'dan B'ye gönderilmiş istenen işarettir. İkinci terim öz girişimdir ve B kullanıcısı x_B işaretini doğru olarak bildiği için B tarafından elimine edilir. Üçüncü terim C'de oluşan artık döngü girişiminden kaynaklanan terimdir ve istenmeyen işarettir. Dördüncü ve beşinci terimler sırasıyla C ve B'nin alıcılarındaki AWGN'den kaynaklanan terimlerdir. (6.13) kullanılarak B'deki SINR ifadesi,

$$\Gamma_B = \frac{\eta \frac{2\varepsilon + \beta - \varepsilon\beta}{(1-\varepsilon)} P\mu_p |g_{AC}|^2 |g_{BC}|^2}{\eta \frac{2\varepsilon + \beta - \varepsilon\beta}{(1-\varepsilon)} P\mu_{s,1} \sigma_L^2 |g_{BC}|^2 + \eta \frac{2\varepsilon + \beta - \varepsilon\beta}{(1-\varepsilon)(1-\beta)} |g_{BC}|^2 \sigma^2 + \sigma^2} \quad (6.14)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada (6.14)'ün ASR protokolü için elde edilmesinde (6.7) ve (6.10)'da ε ve β 'nın ASR protokolü için alması gereken değerler kullanılmalıdır. (6.14) ASR için yeniden yazılırsa,

$$\Gamma_B = \frac{\eta P\mu_p |g_{AC}|^2 |g_{BC}|^2}{\eta P\mu_{s,1} \sigma_L^2 |g_{BC}|^2 + \eta |g_{BC}|^2 \sigma^2 + \sigma^2} \quad (6.15)$$

elde edilir. C bilişsel rölesinin iletimi sonucunda A kullanıcısında alınan işaret ve A'daki SINR ifadesi (6.14)'ün elde edilmesindeki benzer adımlar izlenerek elde edilebilmektedir.

6.1.2 Servis kesilme analizi

Bu alt bölümde enerji hasatlamalı tam-çift yönlü AF röle ağı için birincil ve ikincil sistem servis kesilme olasılıkları ve verim ifadeleri kuramsal olarak elde edilecektir. Birincil ve ikincil kullanıcıların hedeflenen hızları sırasıyla R_{pt} ve R_{st} olmak üzere

$R_k < R_{pt}$ ve $R_k < R_{st}$ için kullanıcılar servis kesilme durumundadırlar. Burada, R_k belli bir linke ait ulaşılabilir anlık hızı göstermektedir.

$i \in \{A, B\}$ olmak üzere A'dan B'ye veya B'den A'ya birincil sistemin tek yönlü servis kesilme olasılığı,

$$P_{out}^{PU} = P_r(R_i < R_{pt}) \quad (6.16)$$

şeklinde bulunmaktadır. Γ_i , A veya B'deki SINR olmak üzere (6.16)'daki ulaşılabilir anlık hız ifadesi,

$$R_i = \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_i) \quad (6.17)$$

olarak ifade edilir. $i = B$ olmak üzere (6.14), (6.17)'de yerine konursa ve ardından (6.17), (6.16)'da yerine konursa, A'dan B'ye birincil sistem servis kesilme olasılığı,

$$\begin{aligned} P_{out}^{PU} &= P_r(R_B < R_{pt}) \\ &= P_r\left(\frac{\eta(1-\beta)(2\varepsilon+\beta-\varepsilon\beta)P\mu_p|g_{AC}|^2|g_{BC}|^2}{\eta(1-\beta)(2\varepsilon+\beta-\varepsilon\beta)P\mu_{s,1}\sigma_L^2|g_{BC}|^2+\eta(2\varepsilon+\beta-\varepsilon\beta)|g_{BC}|^2\sigma^2+(1-\varepsilon)(1-\beta)\sigma^2} < R_p\right) \end{aligned} \quad (6.18)$$

şeklinde elde edilir. Burada $R_p = 2^{2R_{pt}} - 1$ olarak tanımlanmıştır. (6.18)'de $|g_{AC}|^2$ eşitsizliğin sol tarafında yalnız bırakılarak yeniden düzenlenme yapıldığında,

$$\begin{aligned} P_{out}^{PU} &= P_r(R_B < R_{pt}) \\ &= P_r\left(|g_{AC}|^2 < \frac{(R_p\eta(1-\beta)P\mu_{s,1}\sigma_L^2+R_p\eta\sigma^2)(2\varepsilon+\beta-\varepsilon\beta)\times|g_{BC}|^2+R_p(1-\varepsilon)(1-\beta)\sigma^2}{\eta(1-\beta)(2\varepsilon+\beta-\varepsilon\beta)P\mu_p|g_{BC}|^2}\right) \end{aligned} \quad (6.19)$$

elde edilir. Benzer şekilde ASR protokolü için ilk olarak (6.15), $i = B$ olmak üzere (6.17)'de ve ardından (6.17), (6.16)'da yerine konulduğunda P_{out}^{PU} olasılığı,

$$\begin{aligned} P_{out}^{PU} &= P_r(R_B < R_{pt}) \\ &= P_r\left(|g_{AC}|^2 < \frac{(R_p\eta P\mu_{s,1}\sigma_L^2+R_p\eta\sigma^2)\times|g_{BC}|^2+R_p\sigma^2}{\eta P\mu_p|g_{BC}|^2}\right) \end{aligned} \quad (6.20)$$

şeklinde yazılabilir. PSR ve TSR protokolleri için, $a = (R_p\eta(1-\beta)P\mu_{s,1}\sigma_L^2 + R_p\eta\sigma^2)(2\varepsilon + \beta - \varepsilon\beta)$, $b = R_p(1-\varepsilon)(1-\beta)\sigma^2$ ve $c = \eta(1-\beta)(2\varepsilon + \beta - \varepsilon\beta)P\mu_p$ olarak tanımlanıp (6.19)'da yerine konursa ve ASR protokolü için $a = R_p\eta P\mu_{s,1}\sigma_L^2 +$

$R_p\eta\sigma^2$, $b = R_p\sigma^2$ ve $c = \eta P\mu_p$ olarak tanımlanıp (6.20)'de yerine konursa A'dan B'ye birincil sistem servis kesilme olasılığı,

$$P_{out}^{PU} = P_r(R_B < R_{pt}) = P_r\left(|g_{AC}|^2 < \frac{a|g_{BC}|^2 + b}{c|g_{BC}|^2}\right) \quad (6.21)$$

olarak ifade edilebilir. (6.21)'de $P_r\left(|g_{AC}|^2 < \frac{a|g_{BC}|^2 + b}{c|g_{BC}|^2}\right)$ olasılığı, $|g_{BC}|^2$ rastlantı değişkeninin olasılık yoğunluk işlevi (pdf) üzerinden ortalama alınarak,

$$P_{out}^{PU} = P_r\left(|g_{AC}|^2 < \frac{a|g_{BC}|^2 + b}{c|g_{BC}|^2}\right) = \int_0^\infty f_{|g_{BC}|^2}(z) F_{|g_{AC}|^2}(z) dz \quad (6.22)$$

eşitliği ile bulunabilir. $|g_{BC}|^2$ 'nin pdf'i $f_{|g_{BC}|^2}(z) = \lambda_{g_{BC}} e^{-z\lambda_{g_{BC}}}$ ve $|g_{BC}|^2$ 'nin cdf'i $F_{|g_{AC}|^2}(z) = 1 - e^{-z\lambda_{g_{AC}}}$ olmak üzere (6.22)'deki eşitlik,

$$P_r\left(|g_{AC}|^2 < \frac{a|g_{BC}|^2 + b}{c|g_{BC}|^2}\right) = \int_0^\infty \lambda_{g_{BC}} e^{-z\lambda_{g_{BC}}} \left(1 - e^{-\left(\frac{az+b}{cz}\right)\lambda_{g_{AC}}}\right) dz \quad (6.23)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. (6.23)'teki ifade, gerekli ara işlemler yapıldığında,

$$P_{out}^{PU} = 1 - \lambda_{g_{BC}} e^{-\frac{a\lambda_{g_{AC}}}{c}} \int_0^\infty e^{-\left(z\lambda_{g_{BC}} + \frac{b\lambda_{g_{AC}}}{cz}\right)} dz \quad (6.24)$$

şeklini almaktadır. (6.24) için [33]'teki (3.324.1) eşitliği kullanıldığında A'dan B'ye birincil sistem servis kesilme olasılığı kapalı biçimde,

$$P_{out}^{PU} = 1 - \lambda_{g_{BC}} e^{-\frac{a\lambda_{g_{AC}}}{c}} \sqrt{\frac{4b\lambda_{g_{AC}}}{c\lambda_{g_{BC}}}} K_1\left(\sqrt{\frac{4b\lambda_{g_{AC}}\lambda_{g_{BC}}}{c}}\right) \quad (6.25)$$

şeklinde ifade edilir. (6.25)'de $\lambda_{g_{BC}} = d_{BC}^v$, $\lambda_{g_{AC}} = d_{AC}^v$ ve $K_1(x) = x \int_0^\infty \frac{\cos t}{(x^2 + t^2)^{3/2}} dt$ birinci derece ikinci türden değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur [32]. A'dan B'ye uçtan uca verim ise

$$\tau^{PU} = (1 - P_{out}^{PU}) \times R_{pt} \times \frac{(1 - \varepsilon)}{2} \quad (6.26)$$

eşitliği ile bulunmaktadır.

Enerji hasatlamalı tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağı için ikincil sistem servis kesilme olasılığı enerji hasatlama olmayan durumdakine benzer şekilde bulunmaktadır. Bunun

nedeni bu spektrum paylaşım protokolünde sadece ilk evrede C'den D'ye iletim olması ve ilk evrede C'de hasatlanan enerjinin D'ye iletimde kullanılmamasıdır. Dolayısıyla enerji hasatlamalı durum ile enerji hasatlama olmayan durum için ikincil sistem servis kesilme başarımı bu spektrum paylaşım protokolü için aynıdır. $R_{CD} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_{D,1})$ olmak üzere $R_{CD} < R_{st}$ için ilk evrede C-D linki servis kesilme durumundadır ve C bilişsel rölesi D'ye iletim yapamamaktadır. İkincil iletim sadece ilk evrede C-D linki arasında olduğundan eğer bu link servis kesilme durumunda ise ikincil sistem servis kesilme durumunda olmuş olur. İkincil sistem servis kesilme olasılık hesabı için ilk olarak sırasıyla $\lambda_1 = (d_{CD}^v)/(\rho\mu_{s,1})$, $\lambda_2 = (d_{AD}^v)/(\rho\mu_p)$ ve $\lambda_3 = (d_{BD}^v)/(\rho\mu_p)$ parametrelili $X_1 \triangleq \rho\mu_{s,1}|g_{CD}|^2$, $X_2 \triangleq \rho\mu_p|g_{AD}|^2$ ve $X_3 \triangleq \rho\mu_p|g_{BD}|^2$ istatistiksel bağımsız rastlantı değişkenleri tanımlansın ve (6.5)'de yerine konsun. Elde edilen yeni SINR ifadesi kullanılarak Bölüm 4.2'dekine benzer adımlar izlendiğinde ikincil sistem servis kesilme olasılığı,

$$\begin{aligned}
 P_{out}^{SU} &= F_{\Gamma_D}(2^{2R_{st}} - 1) \\
 &= 1 - \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_1(2^{2R_{st}} - 1) + \lambda_2)(\lambda_1(2^{2R_{st}} - 1) + \lambda_3)} \\
 &= 1 - \frac{d_{AD}^v d_{BD}^v}{(d_{CD}^v \frac{\mu_p}{\mu_{s,1}} (2^{2R_{st}} - 1) + d_{AD}^v)(d_{CD}^v \frac{\mu_p}{\mu_{s,1}} (2^{2R_{st}} - 1) + d_{BD}^v)} \quad (6.27)
 \end{aligned}$$

şeklinde elde edilir. C'den D'ye uçtan uca iletim için ikincil sistemin verimi ise,

$$\tau^{SU} = (1 - P_{out}^{SU}) \times R_{st} \times \frac{(1 - \varepsilon)}{2} \quad (6.28)$$

olarak elde edilmektedir.

6.2 Tam-Çift Yönlü Bilişsel DF Röle Ağı İçin Enerji Hasatlamalı Yeni Bir Spektrum Paylaşım Protokolü

Bu alt bölümde, Bölüm 5'de yeni önerilen sisteme enerji hasatlama uygulanması durumunda incelemeler yapılacaktır. Böylece bilişsel rölenin enerji kaynağından bağımsız olarak çalışabildiği varsayıлып, TSR, PSR veya ASR protokolünü kullanarak alınan işaretten hem bilgi işleme hem de enerji hasatlama yaptığı durum için kuramsal çıkarımlar yapılacaktır.

Çizelge 6.4 : TSR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel DF röle ağı için iletim çizelgesi.

İletim Zaman Aralıkları	A	B	C
εT	A $\rightarrow$ C'ye x_A işaretinin iletimi	B $\rightarrow$ C'ye x_B işaretinin iletimi	Rölede enerji hasatlama, C $\rightarrow$ D'ye x_C işaretinin iletimi
$(1 - \varepsilon)T/2$	A $\rightarrow$ C'ye x_A işaretinin iletimi	B $\rightarrow$ C'ye x_B işaretinin iletimi	Rölede bilgi işleme (DF), C $\rightarrow$ D'ye x_C işaretinin iletimi
$(1 - \varepsilon)T/2$	Sessiz	Sessiz	C $\rightarrow$ A'ya, C $\rightarrow$ B'ye ve C $\rightarrow$ D'ye x_R işaretinin iletimi

6.2.1 Enerji hasatlamalı protokol tanımı

Ele alınan sistem modeli Şekil 5.1'deki gibidir. Bölüm 5.1'de yapılan tanımlamalardan farklı olarak kullanıcıların harcadığı güçler ile ilgili değişiklik yapılmış ve ek büyüklükler tanımlanmıştır. İletimin ilk evresinde, A ve B birincil kullanıcıları işaretlerini iletmek için eşit ve $P\mu_p$ güç harcarken, C bilişsel rölesi ilk evrede $P\mu_{s,1}$ gücü ile işaretini D'ye iletmektedir. Burada, iletim güç katsayıları μ_p ve $\mu_{s,1}$, 0 ile 1 arasında bir değer almakta ve ilk evrede A, B ve C kullanıcılarının P gücünün yüzde kaçlık kısmını harcadığını belirlemektedir. Ayrıca, $\rho = P/\sigma^2$ olarak tanımlanmıştır. Bilişsel röle C, ilk evrede hasatladığı enerjiye bağlı olarak ikinci evrede P_H gücü ile iletim yapmaktadır. Diğer bir ifade ile C, ikinci evrede dışarıdan enerji kaynağına ihtiyaç duymadan P_H gücü ile iletimini gerçekleştirmektedir. Ayrıca ek olarak PSR protokolü için güç bölme çarpanı β , TSR protokolü için zaman bölme çarpanı ε ve enerji dönüşüm verimi η ile tanımlanmıştır.

A'dan B'ye bilgi iletimi iki evrede gerçekleşmektedir ve blok iletişim süresi T ile gösterilmektedir. Çizelge 6.4'de TSR protokolü kullanılması durumunda ele alınan sistem için iletim yapısı görülmektedir. Birinci evrede, birincil kullanıcı A, x_A işaretini, birincil kullanıcı B ise x_B işaretini aynı anda C rölesine iletmektedir. TSR protokolü kullanılması durumunda ilk evrede bilişsel röle, εT süresince alınan işaretten enerji hasatlamakta daha sonra, $\frac{(1-\varepsilon)T}{2}$ süresi boyunca ise bilgi işlemektedir. TSR protokolü için hem enerji hasatlama hem de temelband bilgi işleme alıcısının girişindeki işaret,

$$y_{CI} = y_{CE} = \sqrt{P\mu_p}g_{AC}x_A + \sqrt{P\mu_p}g_{BC}x_B + \sqrt{P\mu_{s,1}}g_Lx_C + n_C \quad (6.29)$$

Çizelge 6.5 : PSR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel DF röle ağı için iletim çizelgesi.

İletim Zaman Aralıkları	A	B	C
$T/2$	$A \rightarrow C$ 'ye x_A işaretinin iletimi	$B \rightarrow C$ 'ye x_B işaretinin iletimi	Rölede enerji hasatlama βP , Rölede bilgi işleme $(1 - \beta)P$ (DF), $C \rightarrow D$ 'ye x_C işaretinin iletimi
$T/2$	Sessiz	Sessiz	$C \rightarrow A$ 'ya, $C \rightarrow B$ 'ye ve $C \rightarrow D$ 'ye x_R işaretinin iletimi

şeklinde. (6.29)'da y_{CI} , bilgi işleme alıcısının girişindeki işareti göstermektedir ve y_{CI} için $n_C = n_C^{[a]} + n_C^{[c]}$ olup alıcı antenden ve RF bandından temelbanda dönüşümden kaynaklanan AWGN'nin toplamına eşittir. y_{CE} ise enerji hasatlama alıcısının girişindeki işareti göstermektedir ve y_{CE} için $n_C = n_C^{[a]}$ olup alıcı antenden kaynaklanan AWGN'ye eşittir.

Çizelge 6.5'de PSR protokolü kullanılması durumunda ele alınan sistem için iletim yapısı görülmektedir. İlk evrede bilişsel röle, $T/2$ sürede alınan işaretin gücünün β ile orantılı olan kısmını enerji hasatlama için kullanmakta ve $(1 - \beta)$ ile orantılı olan kısmını bilgi işleme için kullanmaktadır. PSR protokolü için ilk evrede enerji hasatlama alıcısının girişindeki işaret,

$$y_{CE} = \sqrt{P\mu_p\beta}g_{AC}x_A + \sqrt{P\mu_p\beta}g_{BC}x_B + \sqrt{P\mu_{s,1}\beta}g_Lx_C + n_C \quad (6.30)$$

olarak yazılır. (6.30)'de $n_C = \sqrt{\beta}n_C^{[a]}$ olup alıcı antenden kaynaklanan AWGN'ye eşittir. Temelband bilgi işleme alıcısının girişindeki işaret ise,

$$y_{CI} = \sqrt{P\mu_p(1 - \beta)}g_{AC}x_A + \sqrt{P\mu_p(1 - \beta)}g_{BC}x_B + \sqrt{P\mu_{s,1}(1 - \beta)}g_Lx_C + n_C \quad (6.31)$$

şeklinde elde edilir. (6.31)'de $n_C = \sqrt{(1 - \beta)}n_C^{[a]} + n_C^{[c]}$ olup alıcı anten ve RF bandından temelbanda dönüşümden kaynaklanan AWGN etkisini içermektedir.

Çizelge 6.6'da ASR protokolü kullanılması durumunda ele alınan sistem için iletim yapısı görülmektedir. ASR protokolünde gelen işaretleri almak için C bilişsel rölesinde iki anten kullanılmaktadır. İlk evrede bilişsel röle, $T/2$ sürede birinci antenden alınan işareti enerji hasatlama için kullanmakta ve ikinci antenden alınan işareti ise bilgi

Çizelge 6.6 : ASR protokolü kullanılması durumunda enerji hasatlamalı FD bilişsel DF röle ağı için iletim çizelgesi.

İletim Zaman Aralıkları	A	B	C
$T/2$	$A \rightarrow C$ 'ye x_A işaretinin iletimi	$B \rightarrow C$ 'ye x_B işaretinin iletimi	Rölenin 1. anteninde enerji hasatlama, Rölenin 2. anteninde bilgi işleme (DF), $C \rightarrow D$ 'ye x_C işaretinin iletimi
$T/2$	Sessiz	Sessiz	$C \rightarrow A$ 'ya, $C \rightarrow B$ 'ye ve $C \rightarrow D$ 'ye x_R işaretinin iletimi

işleme için kullanılmaktadır. ASR protokolü için ilk evrede enerji hasatlama alıcısının girişindeki işaret y_{CE} ve temelband bilgi işleme alıcısının girişindeki işaret y_{CI} , (6.29)'deki gibi yazılabilir.

Bu alt bölümde, PSR, TSR veya ASR'nin kullanılmasına bağlı olarak tekrardan kaçınmak amacıyla buradan sonraki eşitlik ve denklemler modüler bir şekilde yazılmıştır. Herhangi bir eşitlik ε ve β 'dan herhangi birini içeriyorsa veya ikisini içeriyorsa $\beta = 0$ alındığında eşitlik TSR protokolü için elde edilirken, $\varepsilon = 0$ alındığında eşitlik PSR protokolü için elde edilmektedir. ASR protokolü için ise, eşitlikler hem β hem de ε içeriyorsa $\beta = 1$ ve $\varepsilon = 0$ alınmalı veya eşitlikler ε ve β 'dan herhangi birini içeriyorsa $\beta = 0$ veya $\varepsilon = 0$ alınmalıdır. Diğer bir ifade ile ASR protokolü için, ilk evrede bilgi işleme alıcısı ile bağlantılı eşitliklerde $\beta = 0$, verim eşitliklerinde $\varepsilon = 0$, ikinci evrede enerji hasatlamadan kaynaklanan terimleri içeren eşitliklerde $\beta = 1$ ve $\varepsilon = 0$ alınmalıdır.

(6.29) ve (6.31) kullanıldığında $i \in \{A, B\}$ olmak üzere i . kullanıcı ile C rölesi arasındaki SINR,

$$\Gamma_{ic} = \frac{\rho\mu_p(1-\beta)|g_{ic}|^2}{\rho\mu_{s,1}(1-\beta)\sigma_L^2 + 1} \quad (6.32)$$

olup C rölesindeki çoklu erişim SINR ise,

$$\Gamma_C = \frac{\rho\mu_p(1-\beta)(|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2)}{\rho\mu_{s,1}(1-\beta)\sigma_L^2 + 1} \quad (6.33)$$

şeklindedir.

Diğer taraftan eş zamanlı olarak C bilişsel rölesi, TSR protokolü için $\varepsilon T + \frac{(1-\varepsilon)T}{2}$, PSR ve ASR protokolü için ise $T/2$ süresi boyunca x_C ikincil işaretini D'ye iletmektedir. Tam-çift yönlü iletimden dolayı C rölesi üzerinde artık döngü girişimi oluşmakta ve bu girişim C bilişsel rölesinde hasatlanan enerjiyi ve bilgi işleme başarımını etkilemektedir. İlk evrede TSR, PSR veya ASR protokolü kullanımından bağımsız olarak D'de alınan işaret,

$$y_{D,1} = \sqrt{P\mu_{s,1}}g_{CD}x_C + \sqrt{P\mu_p}g_{AD}x_A + \sqrt{P\mu_p}g_{BD}x_B + n_D \quad (6.34)$$

şeklindedir. (6.34)'de ilk terim D'de istenen ikincil işarete ait terim iken ikinci ve üçüncü terimler birincil işaretlerden kaynaklanan girişim terimleridir. İlk evrede D'de elde edilen SINR,

$$\Gamma_{D,1} = \frac{P\mu_{s,1}|g_{CD}|^2}{P\mu_p(|g_{AD}|^2 + |g_{BD}|^2) + \sigma^2} \quad (6.35)$$

şeklindedir. İkinci evrede, C rölesinden D kullanıcısına iletilen işarete birincil işaretlerin bulunmasından dolayı daha iyi ikincil sistem başarımı elde edebilmek için ilk evrede D kullanıcısında birincil işaretler ardışık girişim giderme (successive interference cancellation) yöntemi kullanılarak çözülmekte ve bu işaretler ikinci evrede kullanılarak girişim yok edilmektedir. C rölesinin ikincil kullanıcı D'ye birincil kullanıcılar A ve B'den daha yakın olduğu kabul edilmiştir. Bundan dolayı D kullanıcısı kendisine daha uzak olan A ve B kullanıcılarından gelen işaretleri gürültü olarak kabul edip ilk olarak en büyük olabirlikli (ML) karar kuralı ile kuvvetli olan $\tilde{x}_C = \arg \min_{x_C} |y_{D,1} - \sqrt{P\mu_{s,1}}g_{CD}x_C|^2$ ikincil işaretini çözmektedir. Daha sonra kestirilen $\tilde{x}_C$ işareti, alınan $y_{D,1}$ işaretinden çıkartılarak $\tilde{y}_{D,1} = y_{D,1} - \sqrt{P\mu_{s,1}}g_{CD}\tilde{x}_C$ işareti elde edilmektedir. D kullanıcısı bu işareten birleşik ML karar kuralı kullanarak,

$$(\tilde{x}_A, \tilde{x}_B) = \arg \min_{x_A, x_B} |\tilde{y}_{D,1} - \sqrt{P\mu_p}g_{AD}x_A - \sqrt{P\mu_p}g_{BD}x_B|^2 \quad (6.36)$$

birincil işaretlerini çözmektedir. Kestirilen birincil $(\tilde{x}_A, \tilde{x}_B)$ işaretleri ikinci evrede D kullanıcısında C'den iletilen birincil işaretlerin oluşturduğu girişimi gidermek için kullanılmaktadır.

İlk evrede C bilişsel rölesinde hasatlanan toplam enerji (6.29) ve (6.30) kullanıldığında TSR, PSR ve ASR için,

$$E_H = \eta T \left(\varepsilon + \beta \left(\frac{1 - \varepsilon}{2} \right) \right) \left[P_{\mu_p} (|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) + P_{\mu_{s,1}} \sigma_L^2 \right] \quad (6.37)$$

şeklinde elde edilir. (6.37)'de enerji dönüşüm verimi η , $0 < \eta < 1$ arasında değer almakta olup rektifikasyon işlemine ve enerji hasatlama devresine bağlıdır. İkinci evrede C bilişsel rölesinin iletim gücü, (6.37) kullanılarak,

$$P_H = \eta \left(\frac{2\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} + \beta \right) \left[P_{\mu_p} (|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) + P_{\mu_{s,1}} \sigma_L^2 \right] \quad (6.38)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (6.38)'de görüldüğü gibi P_H , hasatlanan enerjinin yayın evresi iletim süresine bölünmesiyle $\frac{E_H}{(1 - \varepsilon)(T/2)}$ olarak bulunmaktadır.

İkinci evrede veya diğer adıyla yayın (BC) evresinde bilişsel röle, DF aktarma protokolünü kullanarak P_H gücü ile x_R birleşik işaretini tüm kullanıcılara iletmektedir. Burada birleşik $x_R = \sqrt{P_H \alpha} (x_A \oplus x_B) + \sqrt{P_H (1 - \alpha)} x_C$ işareti, C'de x_A ve x_B doğru çözüldükten sonra fiziksel katman ağ kodlanmış (PLNC) $x_A \oplus x_B$ işareti ile yeni ikincil x_C işaretinin güç paylaşırma çarpanı α kullanılarak birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. C bilişsel rölesi, P_H 'nin α ile orantılı olan kısmını ağ kodlanmış $x_A \oplus x_B$ işaretinin aktarılması için kullanırken, $(1 - \alpha)$ ile orantılı olan kısmını ikincil işaret x_C 'yi iletmek için kullanmaktadır. α katsayısının uygun bir şekilde seçilmesi ile birincil sistemdeki servis kesilme başarımı artarken, aynı zamanda ikincil sistemin sürekli spektrum paylaşımı sağlanmaktadır. Ayrıca, ikinci evrede, TSR için $\frac{(1 - \varepsilon)T}{2}$ süresi boyunca iletim yapılırken, PSR ve ASR için $T/2$ süresi boyunca iletim yapılmaktadır. $j \in \{A, B, D\}$ olmak üzere diğer kullanıcılarda alınan işaretler

$$y_{j,2} = \sqrt{P_H \alpha} g_{Cj} (x_A \oplus x_B) + \sqrt{P_H (1 - \alpha)} g_{Cj} x_C + n_j \quad (6.39)$$

şeklinde yazılabilmektedir. (6.39)'da ilk terim birincil kullanıcılar tarafından istenen terim iken ikinci terim ikincil kullanıcı tarafından istenen terimdir. $i \in \{A, B\}$ olmak üzere i .kullanıcıdaki SINR,

$$\Gamma_{ic,2} = \frac{P_H \alpha |g_{ic}|^2}{P_H (1 - \alpha) |g_{ic}|^2 + \sigma^2} \quad (6.40)$$

olarak elde edilir. İkinci evrede D'deki SINR ise,

$$\Gamma_{D,2} = \frac{P_H(1-\alpha)|g_{CD}|^2}{P_H\alpha|g_{CD}|^2 + \sigma^2} \quad (6.41)$$

şeklindedir. İlk evrede kestirilen $\tilde{x}_A$ ve $\tilde{x}_B$ birincil işaretleri kullanılarak ikinci evrede (6.39)'daki ilk terimden kaynaklanan C rölesinin D kullanıcısında oluşturduğu girişim yok edilir. Girişim işaretinin giderilmesi sonucunda D kullanıcısında,

$$y'_{D,2} = \sqrt{P_H(1-\alpha)} g_{CD} x_C + n_D \quad (6.42)$$

işareti elde edilirken D'deki yeni SINR ifadesi,

$$\Gamma'_{D,2} = \frac{P_H(1-\alpha)|g_{CD}|^2}{\sigma^2} \quad (6.43)$$

olarak elde edilmektedir.

6.2.2 Servis kesilme analizi

Bu alt bölümde önerilen enerji hasatlamalı tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağı için birincil ve ikincil sistem servis kesilme olasılıkları ve verim ifadeleri kuramsal olarak elde edilecektir. Birincil ve ikincil kullanıcıların hedeflenen hızları sırasıyla R_{pt} ve R_{st} olmak üzere, $R_k < R_{pt}$ ve $R_k < R_{st}$ için kullanıcılar servis kesilme durumundadırlar. Burada, R_k belli bir linke ait ulaşılabilir anlık hızı göstermektedir.

$i \in \{A, B\}$ olmak üzere birinci evrede $A \rightarrow C$ veya $B \rightarrow C$ linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi,

$$R_{ic} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_{ic}) \quad (6.44)$$

şeklindedir. Burada (6.32), (6.44)'de yerine konduğunda,

$$R_{ic} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\rho \mu_p (1-\beta) |g_{ic}|^2}{\rho \mu_{s,1} (1-\beta) \sigma_L^2 + 1} \right) \quad (6.45)$$

elde edilir. Çoklu erişim ulaşılabilir anlık hız ifadesi ise,

$$R_\Sigma = \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_C) \quad (6.46)$$

eşitliği ile bulunmaktadır. (6.46)'da (6.33)'den yararlanılarak Γ_C yerine konursa,

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\rho \mu_p (1 - \beta) (|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2)}{\rho \mu_{s,1} (1 - \beta) \sigma_L^2 + 1} \right) \quad (6.47)$$

elde edilir. İkinci evrede $C \rightarrow A$ veya $C \rightarrow B$ linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi ise,

$$R_{iC,2} = \frac{1}{2} \log_2 (1 + \Gamma_{iC,2}) \quad (6.48)$$

şeklinde ifade edilir. (6.40)'daki $\Gamma_{iC,2}$ eşitliği (6.48)'de yerine konulduğunda,

$$R_{iC,2} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_H \alpha |g_{iC}|^2}{P_H (1 - \alpha) |g_{iC}|^2 + \sigma^2} \right) \quad (6.49)$$

elde edilir. (6.45), (6.47) ve (6.49) eşitliklerinde $\frac{1}{2}$ çarpanları vardır. Bunun nedeni birincil iletimin iki işaretleşme aralığında gerçekleşmesidir. Birincil kullanıcılar için servis kesilme olasılığı tek yön için hesaplanacaktır. A'dan B'ye doğru olan iletim için birincil sistem servis kesilme olasılığı,

$$P_{out}^{PU} = 1 - P_r(R_{AC} > R_{pt}, R_{BC} > R_{pt}, R_{\Sigma} > 2R_{pt}) P_r(R_{BC,2} > R_{pt}) \quad (6.50)$$

şeklinde yazılabilir. (6.50)'de R_{AC} birinci evrede A'dan C'ye kanalın ulaşılabilir anlık hız ifadesini, R_{BC} birinci evrede B'den C'ye kanalın ulaşılabilir anlık hız ifadesini ve $R_{BC,2}$, ikinci evrede C'den B'ye kanalın ulaşılabilir anlık hız ifadesini göstermektedir. (6.50)'de $P_r(R_{AC} > R_{pt}, R_{BC} > R_{pt}, R_{\Sigma} > 2R_{pt})$ olasılığı, (6.45) ve (6.47) eşitlikleri kullanılarak yeniden yazılırsa,

$$\begin{aligned} &P_r \left(\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\rho \mu_p (1 - \beta) |g_{AC}|^2}{\rho \mu_{s,1} (1 - \beta) \sigma_L^2 + 1} \right) > R_{pt} \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\rho \mu_p (1 - \beta) |g_{BC}|^2}{\rho \mu_{s,1} (1 - \beta) \sigma_L^2 + 1} \right) > R_{pt} \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\rho \mu_p (1 - \beta) (|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2)}{\rho \mu_{s,1} (1 - \beta) \sigma_L^2 + 1} \right) > 2R_{pt} \right) \end{aligned} \quad (6.51)$$

elde edilir. (6.51)'de $|g_{AC}|^2$ ve $|g_{BC}|^2$ istatistiksel bağımsız üstel dağılımlı ve sırasıyla $\lambda_{AC} = d_{AC}^v$ ve $\lambda_{BC} = d_{BC}^v$ parametrelili rastlantı değişkenleridir. $\Gamma = \frac{(2^{2R_{pt}} - 1)(\rho \mu_{s,1}(1 - \beta)\sigma_L^2 + 1)}{\rho \mu_p(1 - \beta)}$ ve $\theta = \frac{(2^{4R_{pt}} - 1)(\rho \mu_{s,1}(1 - \beta)\sigma_L^2 + 1)}{\rho \mu_p(1 - \beta)}$ olarak tanımlanıp (6.51)

yeniden yazılırsa,

$$\begin{aligned}
P_r(R_{AC} > R_{pt}, R_{BC} > R_{pt}, R_{\Sigma} > 2R_{pt}) \\
&= P_r(|g_{AC}|^2 > \Gamma, |g_{BC}|^2 > \Gamma, |g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2 > \theta) \\
&= P_r(|g_{AC}|^2 > \Gamma, |g_{BC}|^2 > \Gamma) \\
&\quad - P_r(|g_{AC}|^2 > \Gamma, |g_{BC}|^2 > \Gamma, |g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2 < \theta)
\end{aligned} \tag{6.52}$$

elde edilir. Burada, d_{AC}^v ve d_{BC}^v parametreli $|g_{AC}|^2$ ve $|g_{BC}|^2$ istatistiksel bağımsız üstel rastlantı değişkenlerine ait olasılık yoğunluk işlevleri sırasıyla $f_{X_{AC}}(x_{AC}) = d_{AC}^v e^{-d_{AC}^v x_{AC}}$ ve $f_{X_{BC}}(x_{BC}) = d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v x_{BC}}$ olmak üzere (6.52) daha açık olarak yazılırsa,

$$\begin{aligned}
P_r(R_{AC} > R_{pt}, R_{BC} > R_{pt}, R_{\Sigma} > 2R_{pt}) \\
&= \int_{\Gamma}^{\infty} d_{AC}^v e^{-d_{AC}^v x_{AC}} dx_{AC} \int_{\Gamma}^{\infty} d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v x_{BC}} dx_{BC} \\
&\quad - \int_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} \int_{\Gamma}^{\theta-x_{BC}} d_{AC}^v e^{-d_{AC}^v x_{AC}} dx_{AC} d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v x_{BC}} dx_{BC}
\end{aligned} \tag{6.53}$$

elde edilir. Eğer $d_{AC} = d_{BC}$ ise gerekli ara işlemler yapıldığında $P_r(R_{AC} > R_{pt}, R_{BC} > R_{pt}, R_{\Sigma} > 2R_{pt})$ ifadesi,

$$\begin{aligned}
P_r(R_{AC} > R_{pt}, R_{BC} > R_{pt}, R_{\Sigma} > 2R_{pt}) \\
&= e^{-d_{BC}^v \theta} + e^{-d_{AC}^v \theta} (\theta - 2\Gamma) d_{BC}^v
\end{aligned} \tag{6.54}$$

olarak elde edilirken, $d_{AC} \neq d_{BC}$ ise,

$$\begin{aligned}
P_r(R_{AC} > R_{pt}, R_{BC} > R_{pt}, R_{\Sigma} > 2R_{pt}) \\
&= \frac{d_{AC}^v}{d_{AC}^v - d_{BC}^v} e^{-d_{BC}^v \theta} e^{\Gamma(d_{BC}^v - d_{AC}^v)} + \frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v} e^{-d_{AC}^v \theta} e^{\Gamma(d_{AC}^v - d_{BC}^v)}
\end{aligned} \tag{6.55}$$

şeklinde elde edilir. (6.50)'deki $P_r(R_{BC,2} > R_{pt})$ olasılığı, $1 - P_r(R_{BC,2} \leq R_{pt})$ olasılığına eşittir. $P_r(R_{BC,2} \leq R_{pt})$, (6.49) kullanılarak yeniden yazılırsa,

$$P_r(R_{BC,2} \leq R_{pt}) = P_r\left(\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_H \alpha |g_{BC}|^2}{P_H (1 - \alpha) |g_{BC}|^2 + \sigma^2}\right) \leq R_{pt}\right) \tag{6.56}$$

elde edilir. (6.56)'da, (6.38) yerine konulup yeniden düzenlendiğinde,

$$P_r(R_{BC,2} \leq R_{pt}) =$$

$$P_r \left(|g_{BC}|^2 (|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2 + \delta) \leq \frac{R_p \sigma^2}{(\alpha - R_p(1 - \alpha)) \eta \left(\frac{2\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} + \beta \right) P \mu_p} \right) \quad (6.57)$$

elde edilir. Burada, $\delta = \frac{\mu_{s,1} \sigma_L^2}{\mu_p}$ ve $R_p = 2^{2R_{pt}} - 1$ olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, (6.57)'de $(\alpha - R_p(1 - \alpha)) > 0$ koşulu sağlanmalıdır. Burada δ sabit olmak üzere $R = |g_{BC}|^2 + \delta$ şeklinde rastlantı değişkeni tanımlansın. R 'nin olasılık yoğunluk işlevi $r \geq \delta$ olmak üzere $f_R(r) = f_{X_{BC}}(r - \delta) = d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v(r - \delta)} = e^{d_{BC}^v \delta} d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v r}$ şeklinde olmaktadır. Bu durum, üstel dağılımlı bir rastlantı değişkeninin bir sabit ile toplanmasının, bir sabitle ile çarpımına denk olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak $f_R(r)$ olasılık yoğunluk işlevi $r \geq \delta$ olmak üzere,

$$f_R(r) = \frac{d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}} e^{-\frac{d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}} r} \quad (6.58)$$

şeklinde yazılabilir. Tanımlanan R rastlantı değişkeni (6.57)'de yerine konulduğunda,

$$P_r(R_{BC,2} \leq R_{pt}) = P_r \left(|g_{BC}|^2 (|g_{AC}|^2 + R) \leq \frac{R_p \sigma^2}{(\alpha - R_p(1 - \alpha)) \eta \left(\frac{2\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} + \beta \right) P \mu_p} \right) \quad (6.59)$$

olmaktadır. Parametreleri λ_1, λ_2 olan X_1 ve X_2 üstel dağılımlı rastlantı değişkenlerinin toplamının olasılık yoğunluk işlevi, $x \geq 0$ olmak üzere $f_{X_1+X_2}(x) = \left[\frac{e^{-\lambda_1 x}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 x}}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \right] \lambda_1 \lambda_2$ şeklindedir. Benzer şekilde (6.59)'da R ve $|g_{AC}|^2$ sırasıyla parametreleri farklı istatistiksel bağımsız üstel rastlantı değişkenleri olmak üzere $Y = |g_{AC}|^2 + R$ olarak yeni bir rastlantı değişkeni tanımlanırsa Y 'nin olasılık yoğunluk işlevi,

$$f_Y(y) = \left[\frac{e^{-d_{AC}^v y}}{\left(\frac{d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}} - d_{AC}^v \right)} + \frac{e^{-\frac{d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}} y}}{\left(d_{AC}^v - \frac{d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}} \right)} \right] \frac{d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}} d_{AC}^v \quad (6.60)$$

şeklinde elde edilir. Tanımlanan Y rastlantı değişkeni (6.59)'da yerine konulduğunda,

$$P_r(R_{BC,2} \leq R_{pt}) = P_r \left(|g_{BC}|^2 Y \leq \frac{R_p \sigma^2}{(\alpha - R_p(1 - \alpha)) \eta \left(\frac{2\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} + \beta \right) P \mu_p} \right) \quad (6.61)$$

ifadesi elde edilir. (6.59)'da $Z = |g_{BC}|^2 Y$ şeklinde yeni bir rastlantı değişkeni tanımlansın. İki istatistiksel bağımsız rastlantı değişkeninin çarpımı olan Z 'nin olasılık yoğunluk işlevi $f_Z(z) = \int_0^\infty f_Y(y) f_{X_{BC}}\left(\frac{z}{y}\right) \frac{1}{y} dy$ eşitliği ile bulunmaktadır [34]. Y ve $|g_{BC}|^2$ 'nin olasılık yoğunluk işlevleri bu eşitlikte yerine konulup ara işlemler yapıldığında Z 'nin pdf'i,

$$f_Z(z) = d_{BC}^v d_{AC}^v \frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta}} \int_0^\infty \frac{1}{y} e^{-d_{BC}^v \frac{z}{y}} e^{-d_{AC}^v y} dy \\ + d_{BC}^v d_{AC}^v \frac{d_{BC}^v}{d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta} - d_{BC}^v} \int_0^\infty \frac{1}{y} e^{-d_{BC}^v \frac{z}{y}} e^{-\frac{d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}} y} dy \quad (6.62)$$

olarak elde edilir. [33]'deki (3.471-9) eşitliği, (6.62)'deki $\int_0^\infty \frac{1}{y} e^{-d_{BC}^v \frac{z}{y}} e^{-d_{AC}^v y} dy$ integrali için $\beta = z d_{BC}^v$, $\gamma = d_{AC}^v$, $v = 0$ dönüşümü ve $\int_0^\infty \frac{1}{y} e^{-d_{BC}^v \frac{z}{y}} e^{-\frac{d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}} y} dy$ integrali için $\beta = z d_{BC}^v$, $\gamma = \frac{d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}$, $v = 0$ dönüşümü yapılarak kullanıldığında Z 'nin pdf'i kapalı biçimde,

$$f_Z(z) = d_{BC}^v d_{AC}^v \frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta}} 2K_0\left(2\sqrt{z d_{AC}^v d_{BC}^v}\right) \\ + d_{BC}^v d_{AC}^v \frac{d_{BC}^v}{d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta} - d_{BC}^v} 2K_0\left(2\sqrt{\frac{z d_{AC}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}}\right) \quad (6.63)$$

şeklinde elde edilir. Yukarıdaki dönüşümü belirtmek için kullanılan β, v ve γ , [33]'deki (3.471-9)'da kullanılan değişkenlerdir ve tezde kullanılan aynı isimli değişkenlerle ilgisi yoktur. (6.61)'de Z rastlantı değişkeni yerine konulursa ve $x_z =$

$\frac{R_p \sigma^2}{(\alpha - R_p(1-\alpha))\eta\left(\frac{2\varepsilon}{(1-\varepsilon)} + \beta\right)^{P\mu_p}}$ olarak tanımlanırsa $P_r(R_{BC,2} \leq R_{pt}) = P_r(Z \leq x_z)$ olasılığı,

$$P_r(Z \leq x_z) = d_{BC}^v d_{AC}^v \frac{2d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta}} \int_0^{x_z} K_0\left(2\sqrt{z d_{AC}^v d_{BC}^v}\right) dz \\ + d_{BC}^v d_{AC}^v \frac{2d_{BC}^v}{d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta} - d_{BC}^v} \int_0^{x_z} K_0\left(2\sqrt{\frac{z d_{AC}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}}\right) dz \quad (6.64)$$

olarak yazılır. Burada ilk integralde $2\sqrt{z d_{AC}^v d_{BC}^v} = t$, $\left(\sqrt{z} = \frac{t}{2} \sqrt{\frac{1}{d_{AC}^v d_{BC}^v}}\right)$, $dz = \frac{t}{2} \frac{1}{d_{AC}^v d_{BC}^v} dt$ ve ikinci integralde $2\sqrt{\frac{z d_{AC}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}} = t$, $\left(\sqrt{z} = \frac{t}{2} \sqrt{\frac{e^{d_{BC}^v \delta}}{d_{AC}^v d_{BC}^v}}\right)$, $dz = \frac{t}{2} \frac{e^{d_{BC}^v \delta}}{d_{AC}^v d_{BC}^v} dt$ dönüşümü yapıldığında,

$$P_r(Z \leq x_z) = \frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta}} \int_0^{2\sqrt{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v}} t K_0(t) dt + \frac{d_{BC}^v e^{d_{BC}^v \delta}}{d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta} - d_{BC}^v} \int_0^{2\sqrt{\frac{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}}} t K_0(t) dt \quad (6.65)$$

elde edilir. [33]'deki (6.522-4) eşitliği, (6.65)'deki integraller için $\lambda = 0$, $\mu = 1$, $v = 0$ dönüşümü yapılarak kullanıldığında $P_r(R_{BC,2} \leq R_{pt})$ olasılığı kapalı biçimde,

$$P_r(R_{BC,2} \leq R_{pt}) = \frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta}} \left[1 - 2\sqrt{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v} \times K_1\left(2\sqrt{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v}\right) \right] + \frac{d_{BC}^v e^{d_{BC}^v \delta}}{d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta} - d_{BC}^v} \left[1 - 2\sqrt{\frac{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}} \times K_1\left(2\sqrt{\frac{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}}\right) \right] \quad (6.66)$$

şeklinde elde edilir. Yukarıdaki dönüşümü belirtmek için kullanılan λ, μ ve v , [33]'deki (6.522-4)'de kullanılan değişkenlerdir ve tezde kullanılan aynı isimli değişkenlerle ilgisi yoktur. $P_r(R_{BC,2} > R_{pt}) = 1 - P_r(R_{BC,2} \leq R_{pt})$ eşitliğinden yararlanılarak (6.66) kullanıldığında $P_r(R_{BC,2} > R_{pt})$ kolayca elde edilebilir. (6.54) ve (6.66) kullanılarak $d_{AC} = d_{BC}$ için (6.50) yeniden yazıldığında,

$$P_{out}^{PU} = 1 - \left[e^{-d_{BC}^v \theta} + e^{-d_{AC}^v \theta} (\theta - 2\Gamma) d_{BC}^v \right] \times \left[1 - \left[\frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta}} \left[1 - 2\sqrt{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v} \times K_1\left(2\sqrt{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v}\right) \right] + \frac{d_{BC}^v e^{d_{BC}^v \delta}}{d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta} - d_{BC}^v} \left[1 - 2\sqrt{\frac{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}} \times K_1\left(2\sqrt{\frac{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}}\right) \right] \right] \right] \quad (6.67)$$

olarak elde edilir. Eğer $d_{AC} \neq d_{BC}$ ise, (6.55) ve (6.66) kullanılarak (6.50) yeniden yazıldığında,

$$P_{out}^{PU} = 1 - \left[\frac{d_{AC}^v}{d_{AC}^v - d_{BC}^v} e^{-d_{BC}^v \theta} e^{\Gamma(d_{BC}^v - d_{AC}^v)} + \frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v} e^{-d_{AC}^v \theta} e^{\Gamma(d_{AC}^v - d_{BC}^v)} \right] \\ \times \left[1 - \left[\frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta}} \left[1 - 2\sqrt{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v} \times K_1(2\sqrt{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v}) \right] + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{d_{BC}^v e^{d_{BC}^v \delta}}{d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta} - d_{BC}^v} \left[1 - 2\sqrt{\frac{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}} \times K_1\left(2\sqrt{\frac{x_z d_{AC}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}}\right) \right] \right] \right] \quad (6.68)$$

şeklinde elde edilir. A'dan B'ye uçtan uca verim ise

$$\tau^{PU} = (1 - P_{out}^{PU}) \times R_{pt} \times \frac{(1 - \varepsilon)}{2} \quad (6.69)$$

eşitliği ile bulunmaktadır.

İlk evrede $C \rightarrow D$ linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi (6.35) kullanılarak,

$$R_{CD,1} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{\mu_{s,1}} |g_{CD}|^2}{P_{\mu_p} (|g_{AD}|^2 + |g_{BD}|^2) + \sigma^2} \right) \quad (6.70)$$

şeklinde yazılabilir. (6.70)'de $\frac{1}{2}$ çarpanı olmamasının nedeni C bilişsel rölesinin D'ye iki evrede farklı paketler göndermesinden dolayıdır. $A \rightarrow D$ ve $B \rightarrow D$ linkleri için ulaşılabilir anlık hız ifadesi ise,

$$R_{AB,D} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \rho \mu_p (|g_{AD}|^2 + |g_{BD}|^2) \right) \quad (6.71)$$

olmaktadır. Eğer birinci evrede x_A ve x_B işaretleri D kullanıcısında başarılı bir şekilde çözülmüş ise ikinci evrede $C \rightarrow D$ linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi (6.43) kullanıldığında,

$$R_{CD,21} = \log \left(1 + \frac{P_H |g_{CD}|^2 (1 - \alpha)}{\sigma^2} \right) \quad (6.72)$$

şeklinde elde edilir. Fakat eğer birinci evrede x_A ve x_B işaretleri D kullanıcısında başarılı bir şekilde çözülememiş ise $C \rightarrow D$ linki için ulaşılabilir anlık hız ifadesi (6.41) kullanıldığında,

$$R_{CD,22} = \log \left(1 + \frac{P_H(1-\alpha)|g_{CD}|^2}{P_H\alpha|g_{CD}|^2 + \sigma^2} \right) \quad (6.73)$$

olarak elde edilir. İkincil sistem servis kesilme olasılığı (6.70)-(6.73) eşitlikleri kullanılarak (5.37)'deki gibi bulunur. (5.37)'de $P_r(R_{st} \geq R_{CD,1})$, birinci evrede $C \rightarrow D$ linkinin servis kesilme durumunda olma olasılığını göstermekte ve $\Gamma_{D,1}$ 'nin CDF yardımıyla bulunmaktadır. (6.70) kullanılarak bir önceki bölümdeki benzer adımlar uygulandığında,

$$P_r(R_{CD,1} \leq R_{st}) = 1 - \frac{d_{AD}^v d_{BD}^v}{\left(d_{CD}^v \frac{\mu_p}{\mu_{s,1}} (2^{R_{st}} - 1) + d_{AD}^v \right) \left(d_{CD}^v \frac{\mu_p}{\mu_{s,1}} (2^{R_{st}} - 1) + d_{BD}^v \right)} \quad (6.74)$$

olarak elde edilir. (5.37)'de $P_r(R_{pt} \geq R_{AB,D})$, birinci evrede $A \rightarrow B$ ve $B \rightarrow D$ linklerinin servis kesilme durumunda olma olasılığını göstermekte ve $(|g_{AD}|^2 + |g_{BD}|^2)$ 'nin CDF'i yardımıyla bulunabilmektedir. (6.71) kullanılarak bir önceki bölümdeki benzer adımlar uygulandığında eğer $d_{AC} = d_{BC}$ ise,

$$P_r(R_{pt} \geq R_{AB,D}) = 1 - \left(1 + d_{AD}^v \left(\frac{R_p}{\rho \mu_p} \right) \right) e^{-d_{AD}^v \left(\frac{R_p}{\rho \mu_p} \right)} \quad (6.75)$$

olarak elde edilirken, $d_{AC} \neq d_{BC}$ ise,

$$P_r(R_{pt} \geq R_{AB,D}) = 1 - \left[\left(\frac{d_{BD}^v}{d_{BD}^v - d_{AD}^v} \right) e^{-d_{AD}^v \left(\frac{R_p}{\rho \mu_p} \right)} + \left(\frac{d_{AD}^v}{d_{AD}^v - d_{BD}^v} \right) e^{-d_{BD}^v \left(\frac{R_p}{\rho \mu_p} \right)} \right] \quad (6.76)$$

şeklinde elde edilir. Burada $R_p = 2^{2R_{pt}} - 1$ 'dir. (5.37)'de $P_r(R_{st} \geq R_{CD,21})$, birinci evrede x_A ve x_B işaretleri D kullanıcısında başarılı olarak çözülmüş ise ikinci evrede $C \rightarrow D$ linkinin servis kesilme durumunda olma olasılığını göstermektedir. Ayrıca,

$$P_r(R_{st} \geq R_{CD,21}), \quad \delta = \frac{\mu_{s,1}\sigma_L^2}{\mu_p}, \quad R_s = 2^{R_{st}} - 1 \quad \text{ve} \quad x_r = \frac{R_s\sigma^2}{(1-\alpha)\eta\left(\frac{2\varepsilon}{(1-\varepsilon)} + \beta\right)^P \mu_p}$$

$((|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) + \delta)|g_{CD}|^2$ 'nin CDF'i yardımıyla bulunabilmektedir. Burada $P_r(x_r > ((|g_{AC}|^2 + |g_{BC}|^2) + \delta)|g_{CD}|^2)$ olasılığı kapalı formda bulunurken birincil sistem servis kesilme olasılığı ifadesindeki $P_r(R_{BC,2} \leq R_{pt})$ olasılığının elde edilmesindeki benzer ara adımlar uygulanır. Bu durumda,

$$P_r(R_{CD,21} \leq R_{st}) = \frac{d_{AC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v} \left[1 - 2\sqrt{x_r d_{CD}^v d_{BC}^v} \times K_1 \left(2\sqrt{x_r d_{CD}^v d_{BC}^v} \right) \right]$$

$$+ \frac{d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta}}{d_{AC}^v e^{d_{BC}^v \delta} - d_{BC}^v} \left[1 - 2 \sqrt{\frac{x_r d_{CD}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}} \times K_1 \left(2 \sqrt{\frac{x_r d_{CD}^v d_{BC}^v}{e^{d_{BC}^v \delta}}} \right) \right] \quad (6.77)$$

elde edilir.

(5.37)'de $P_r(R_{st} \geq R_{CD,22})$, birinci evrede x_A ve x_B işaretlerinin D kullanıcısında başarılı bir şekilde çözülemediği koşulu altında ikinci evrede C $\rightarrow$ D linkinin servis kesilme durumunda olma olasılığını göstermektedir. (6.73) kullanılarak $P_r(R_{st} \geq R_{CD,22}) = P_r(R_s \sigma^2 > P_H |g_{CD}|^2 [(1 - \alpha) - R_s \alpha])$ olduğu görülebilir. Burada $P_r(R_{st} \geq R_{CD,22})$, $[(1 - \alpha) - R_s \alpha] > 0$ koşulu sağlandığı takdirde $x_t = \frac{R_s \sigma^2}{[(1 - \alpha) - R_s \alpha] \eta \left(\frac{2\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} + \beta \right)^{P\mu_p}}$ olmak üzere (6.77)'de x_r yerine x_t konularak bulunabilir.

Eğer $[(1 - \alpha) - R_s \alpha] > 0$ koşulu sağlanmıyorsa $P_r(R_{st} \geq R_{CD,22}) = 1$ 'dir.

İkincil sistem servis kesilme olasılığı, $[(1 - \alpha) - R_s \alpha] > 0$ koşulunun sağlanıp sağlanmadığı ve $d_{AC} = d_{BC}$ olup olmadığına bağlı olarak (6.74)-(6.77) eşitlikleri (5.37)'de yerine konulduğunda daha açık biçimde elde edilebilir.

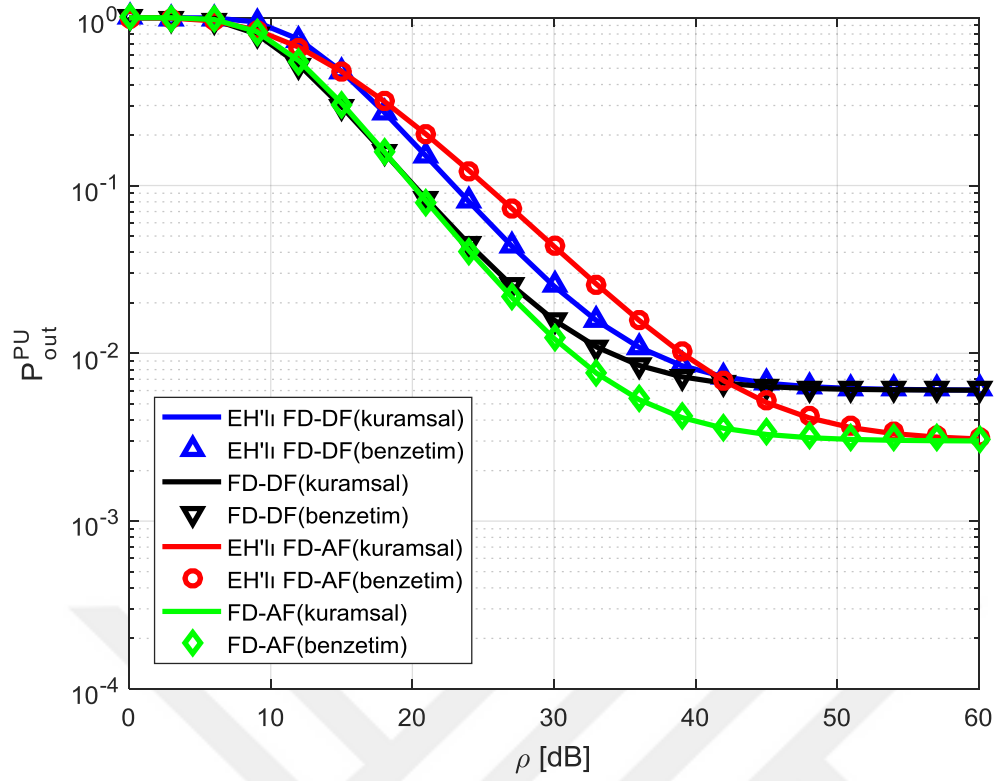
C'den D'ye uçtan uca iletim için ikincil sistemin verimi ise,

$$\tau^{SU} = (1 - P_{out}^{SU}) \times R_{st} \times (1 - \varepsilon) \quad (6.78)$$

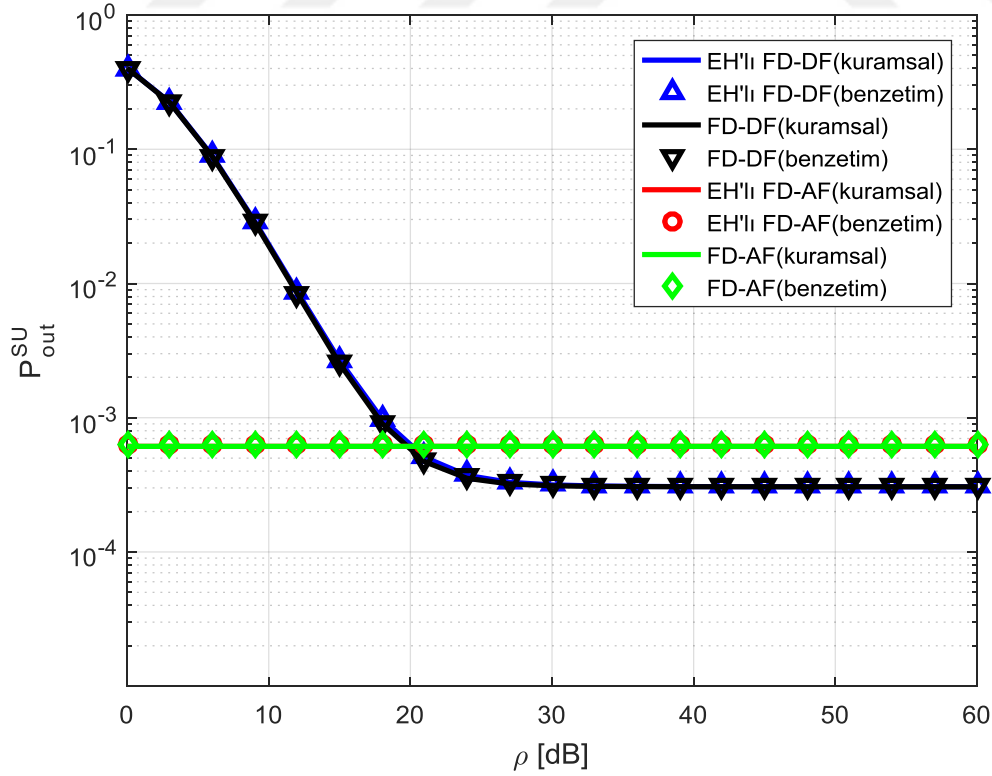
olarak elde edilmektedir. (6.78)'de $\frac{1}{2}$ çarpanı olmamasının nedeni iki evrede de C'den D'ye iletimin gerçekleşmesidir.

6.3 Başarım Değerlendirmeleri ve Karşılaştırmalar

Bu alt bölümde, Bölüm 6.1 ve Bölüm 6.2'de analizleri yapılan sistemler için birincil ve ikincil sistem servis kesilme başarım ve uçtan uca verim eğrileri bilgisayar benzetimleri ile elde edilmiş ve sonuçlar kuramsal çıkarımlar ile doğrulanmıştır. Enerji hasatlamalı sistemlerin servis kesilme başarımları ve uçtan uca verimleri, işaret-gürültü oranı, artık döngü girişi, kullanıcılar arası uzaklık, birincil ve ikincil hedeflenen hız vs. gibi farklı parametreler bakımından karşılaştırılmıştır. Sistemlerde farklı enerji hasatlama protokolü kullanıldığı durum için servis kesilme başarımları incelenmiştir. Ayrıca, sistemlere enerji hasatlama uygulanan durum ile uygulanmayan durum arasında başarım karşılaştırması yapılmıştır. Bu alt bölümde, Bölüm 4.2'de



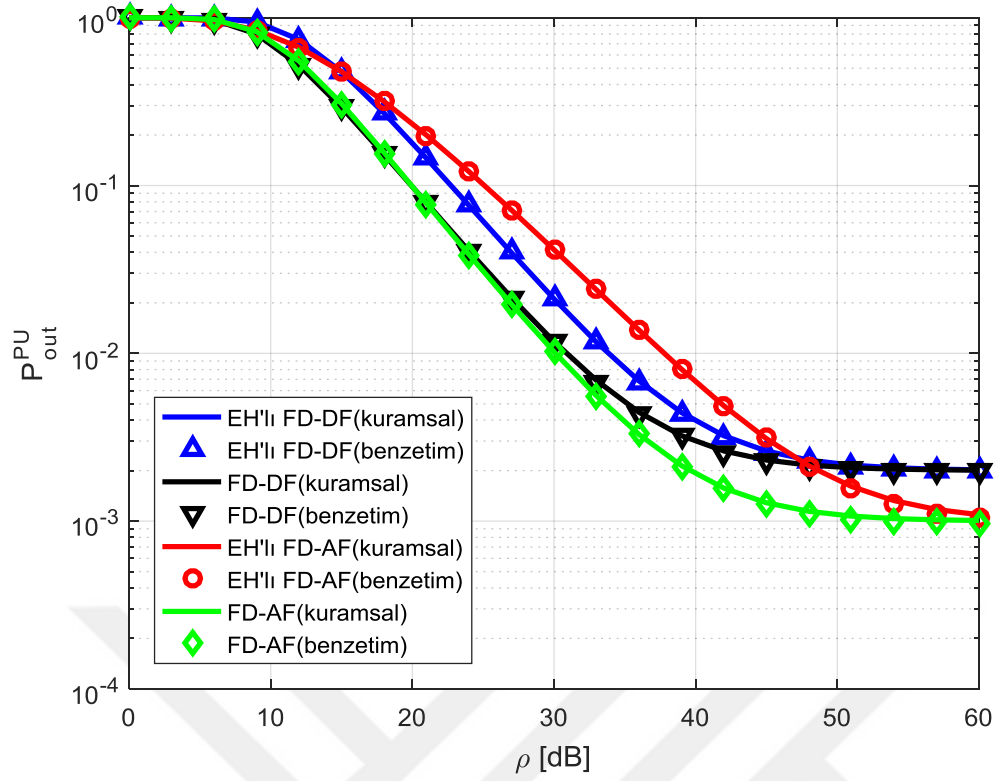
Şekil 6.1 : $\mu_{s,1} = 1$ ve $d_{AC} = d_{BC} = 1$ için EH'lı ve EH'sız birincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.



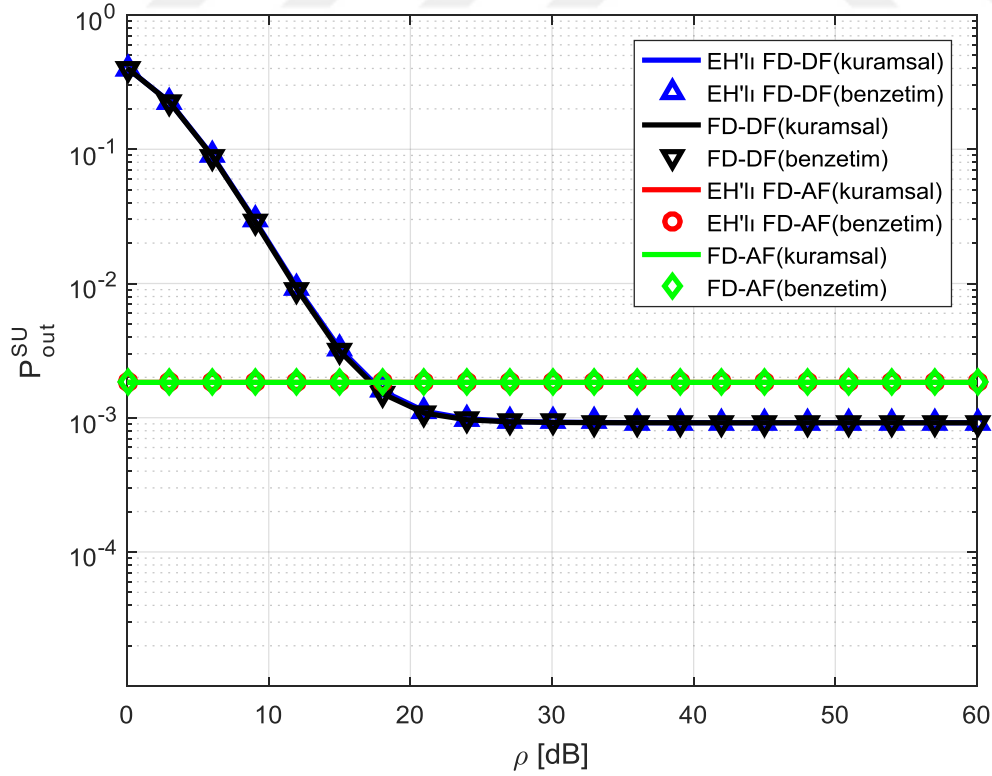
Şekil 6.2 : $\mu_{s,1} = 1$ ve $d_{CD} = 0.05$ için EH'lı ve EH'sız ikincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.

tanıtılan referans sistem için FD-AF, Bölüm 5'deki yeni önerilen sistem için FD-DF, Bölüm 4.2'deki referans sisteme enerji hasatlama uygulanan durum olan Bölüm 6.1'deki sistem için EH'lı FD-AF ve Bölüm 5'de yeni önerilen sisteme enerji hasatlama uygulanan durum olan Bölüm 6.2'deki sistem için EH'lı FD-DF kısaltmaları kullanılacaktır. FD-AF ve FD-DF sistemleri için, C bilişsel rölesinin ikinci evrede $P\mu_{s,2}$ gücü ile iletim yaptığı kabul edilmiştir. Burada iletim güç katsayısı $\mu_{s,2}$ 'nin değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Yapılan tüm benzetimlerde yol kaybı üsteli $\nu = 2.7$, güç paylaşırma çarpanı $\alpha = 0.95$ ve enerji dönüşüm verimi $\eta = 1$ alınmıştır.

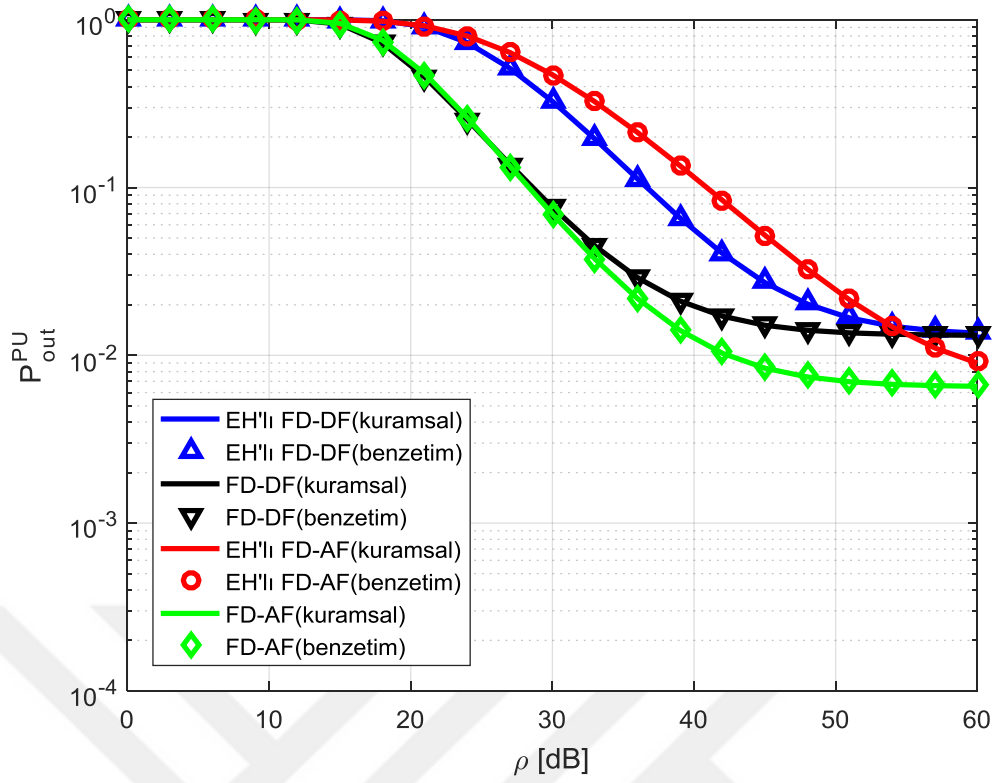
Şekil 6.1 ve 6.2'de FD-AF, FD-DF, EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF için sırasıyla birincil ve ikincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ 'ya göre değişimi incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -30$ dB, ikincil kullanıcılar arasındaki mesafe $d_{CD} = 0.05$, birincil kullanıcılar ile C arasındaki mesafe $d_{AC} = d_{BC} = 1$, birincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{pt} = 1$, ikincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{st} = 1$ ve $\mu_p = \mu_{s,1} = \mu_{s,2} = 1$ olarak alınmıştır. EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF, PSR enerji hasatlama protokolünü kullanmaktadır ve güç bölme çarpanı $\beta = 0.4$ seçilmiştir. Şekil 6.1'deki benzetim sonuçlarında ρ 'nun 15dB'den 42dB'ye arttığı bölgede EH'lı FD-DF sistemin EH'lı FD-AF sisteme göre daha iyi birincil sistem başarımı sağladığı görülmektedir. Diğer taraftan, artan ρ değerleri için EH'lı sistemlerdeki birincil sistem servis kesilme olasılıkları, FD-DF ve FD-AF sistemlere göre daha yüksektir. Bu beklenen bir durumdur çünkü EH'lı sistemlerde hasatlanan enerjiden elde edilen iletim güç değerleri, harici enerji kaynaklarının sağladığı yüksek güç değerlerine ulaşamamaktadır. Şekil 6.1'de yüksek ρ değerleri için bütün sistemlere ait birincil sistem servis kesilme olasılıklarının sabit bir değere yakınsadığı görülmektedir. Bu durumun nedeni tüm sistemlerde C bilişsel rölesinin tam-çift yönlü olarak çalışması ve ρ arttıkça artık döngü girişiminin etkisinin artmasıdır. Şekil 6.2'deki sonuçlarda, seçilen değerler için EH'lı FD-AF'in FD-AF ile ve EH'lı FD-DF'in FD-DF ile benzer ikincil sistem servis kesilme başarımı gösterdiği görülmektedir. EH'lı FD-AF sisteminde sadece ilk evrede C'den D'ye iletim olduğundan enerji hasatlamasının ikincil sisteme etkisi yoktur ve ikincil sistem servis kesilme başarımı FD-AF'ninki ile aynıdır. Diğer taraftan EH'lı FD-DF'in FD-DF ile benzer ikincil sistem servis kesilme başarımı göstermesinin nedeni C ve D'nin



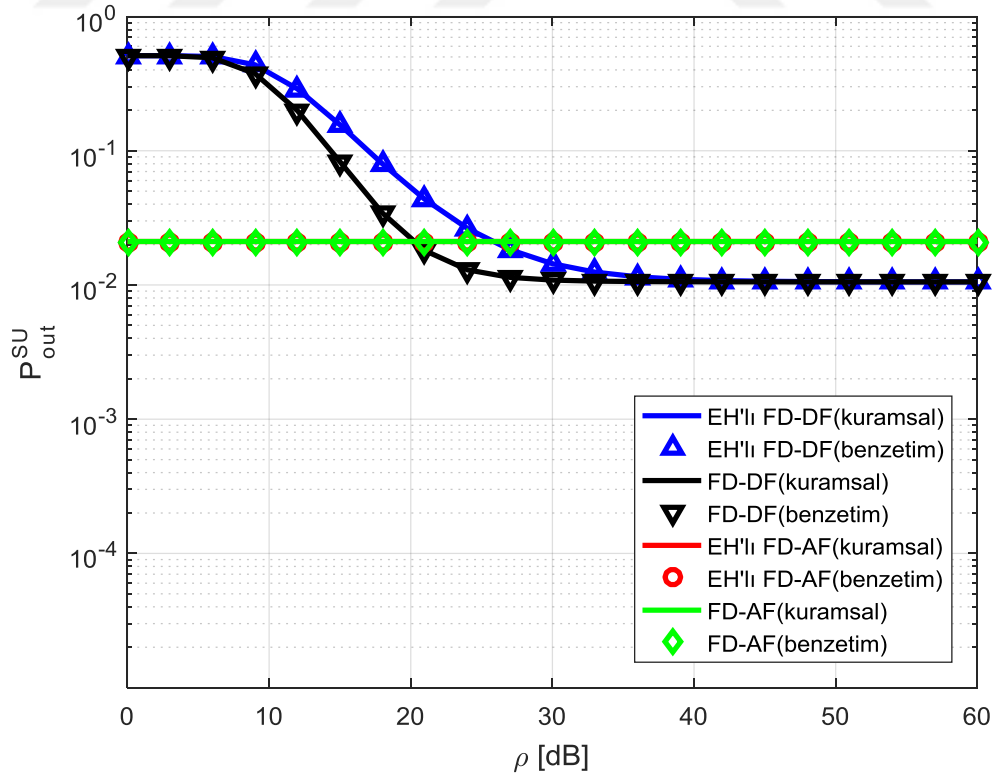
Şekil 6.3 : $\mu_{s,1} = 1/3$ ve $d_{AC} = d_{BC} = 1$ için EH'lı ve EH'sız birincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.



Şekil 6.4 : $\mu_{s,1} = 1/3$ ve $d_{CD} = 0.05$ için EH'lı ve EH'sız ikincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.



Şekil 6.5 : $\mu_{s,1} = 1/3$ ve $d_{AC} = d_{BC} = 2$ için EH'lı ve EH'sız birincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.



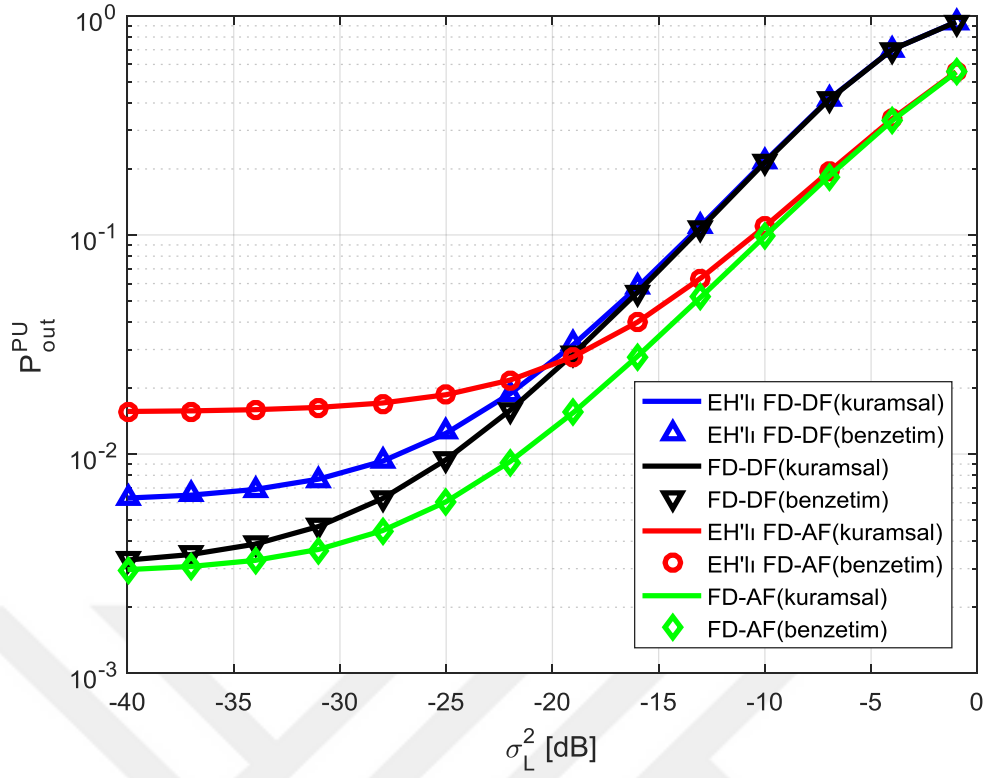
Şekil 6.6 : $\mu_{s,1} = 1/3$ ve $d_{CD} = 0.25$ için EH'lı ve EH'sız ikincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.

birbirine çok yakın konumlanmış olmasıdır. Ayrıca ρ 'nun 20 dB veya daha yüksek değer aldığı bölgede EH'lı FD-DF ve FD-DF sistemlerinin, EH'lı FD-AF ve FD-AF sistemlerine göre daha iyi ikincil servis kesilme başarımına sahip olduğu görülmektedir.

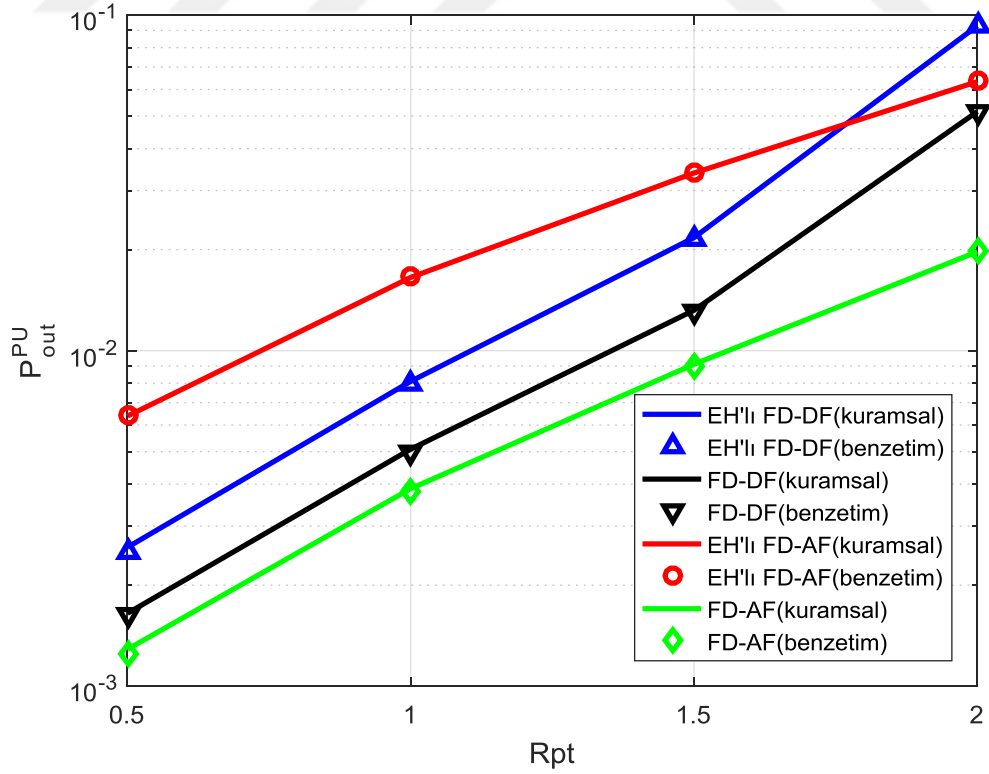
Şekil 6.3 ve 6.4'de, Şekil 6.1 ve 6.2'den farklı olarak $\mu_{s,1} = 1/3$ seçilmiş ve sırasıyla sistemlerin birincil ve ikincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ 'ya göre değişimi incelenmiştir. Diğer bir ifade ile birinci evrede A ve B, P gücü ile iletim yaparken, C bilişsel rölesi $P/3$ gücü ile iletim yapmaktadır. Sonuçlardan anlaşılabileceği üzere, birinci evrede C'nin P yerine $P/3$ gücü ile iletim yapması sayesinde artık döngü girişiminin birincil sistem üzerindeki etkisi azaltılmış ve bundan birincil sistem servis kesilme başarımları olumlu yönde etkilenmiştir. Buna karşılık C'nin iletim gücü azaldığı için sistemlere ait ikincil sistem servis kesilme olasılıkları bir miktar artmıştır. Fakat, sistemlerin ikincil servis kesilme başarımları kötü yönde etkilense de ρ 'nun 20 dB yerine 18 dB veya daha yüksek değer aldığı bölgede EH'lı FD-DF ve FD-DF sistemlerinin, EH'lı FD-AF ve FD-AF sistemlerine göre daha iyi ikincil servis kesilme başarımına sahip olduğu görülmüştür.

Şekil 6.5 ve 6.6'da Şekil 6.3 ve 6.4'den farklı olarak $d_{AC} = d_{BC} = 2$ ve $d_{CD} = 0.25$ seçilmiş ve sırasıyla sistemlerin birincil ve ikincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ 'ya göre değişimi incelenmiştir. d_{AC} , d_{BC} ve d_{CD} uzaklarının artmasıyla beraber sistemlere ait birincil ve ikincil sistem servis kesilme başarımlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.6'da, $d_{CD} = 0.25$ için FD-DF'in EH'lı FD-DF'e göre daha iyi ikincil sistem servis kesilme başarımı sağladığı görülmektedir. d_{CD} uzaklığı arttıkça FD-DF ile EH'lı FD-DF sistemleri arasındaki ikincil sistem servis kesilme başarımları farkı belirgenleşmektedir.

Şekil 6.7'de FD-AF, FD-DF, EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF sistemleri için birincil sistem servis kesilme olasılıklarının σ_L^2 'ye göre değişimi incelenmiştir. İletim işaret-gürültü oranı $\rho = 35$ dB, ikincil kullanıcılar arasındaki mesafe $d_{CD} = 0.05$, birincil kullanıcılar ile C arasındaki mesafe $d_{AC} = d_{BC} = 1$, birincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{pt} = 1$, ikincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{st} = 1$, $\mu_p = \mu_{s,2} = 1$ ve $\mu_{s,1} = 1/3$ olarak alınmıştır. EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF, PSR enerji hasatlama protokolünü kullanmaktadır ve güç bölme çarpanı $\beta = 0.4$ seçilmiştir. Beklenildiği gibi σ_L^2 arttıkça tüm sistemlerin birincil sistem servis kesilme başarımları



Şekil 6.7 : EH'lı ve EH'sız birincil sistem servis kesilme olasılıklarının σ_L^2 [dB]'ye göre değişimi.

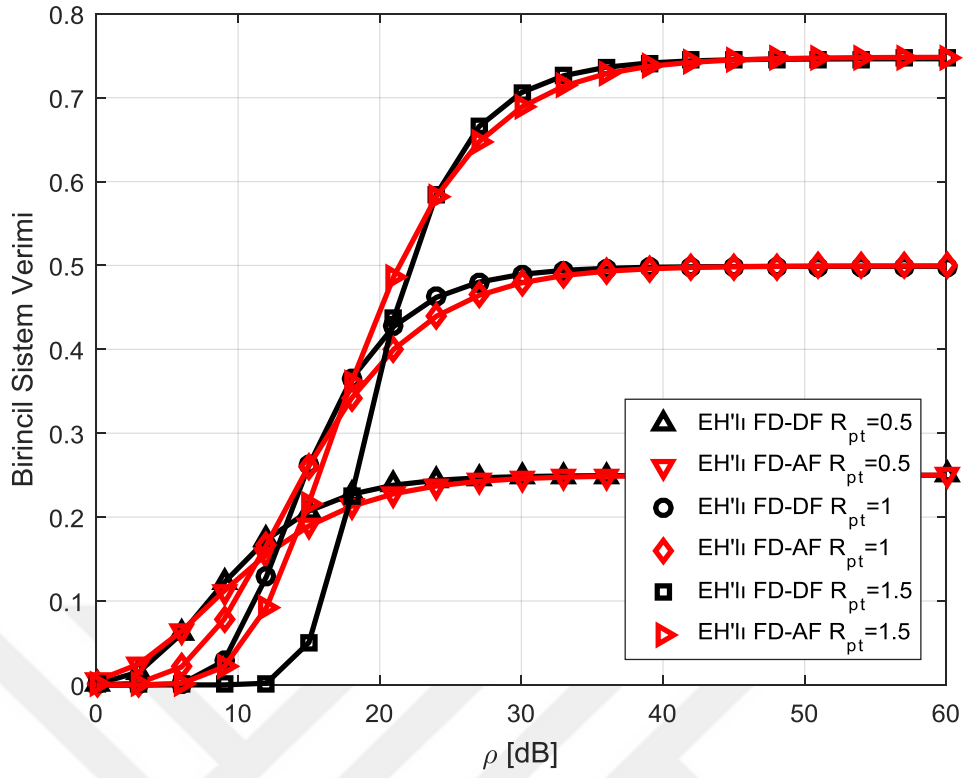


Şekil 6.8 : EH'lı ve EH'sız birincil sistem servis kesilme olasılıklarının R_{pt} 'ye göre değişimi.

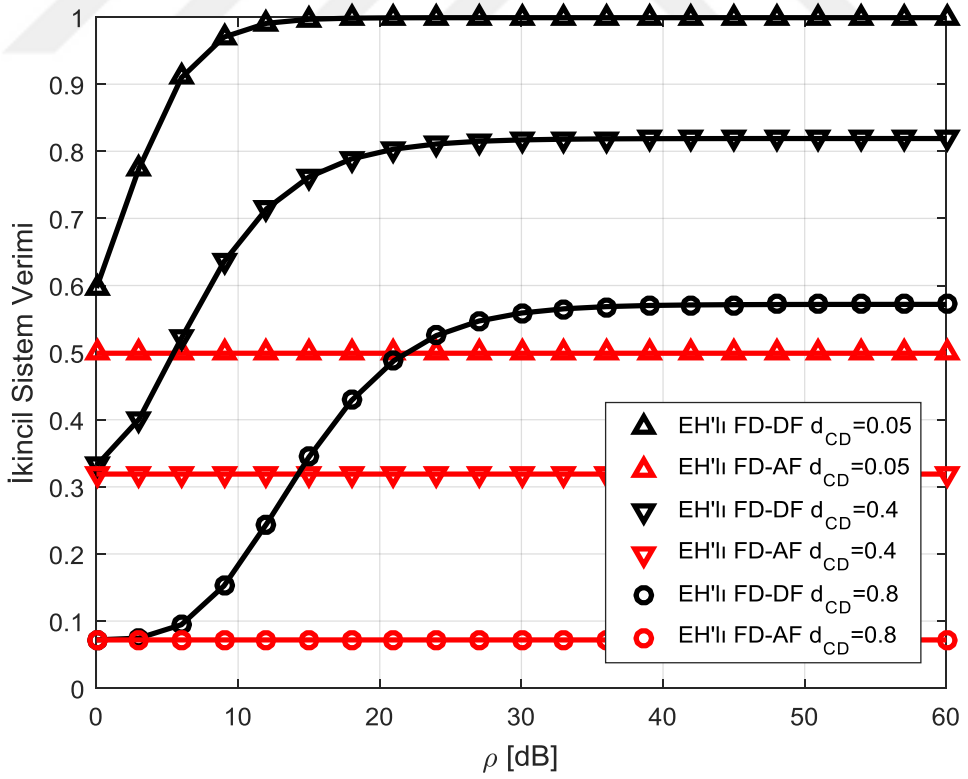
azalmaktadır. Şekil 6.7'deki benzetim sonuçları, σ_L^2 'nin -20 dB veya daha küçük değer aldığı durumlarda EH'lı FD-DF'in EH'lı FD-AF'e göre daha iyi birincil sistem servis kesilme başarımına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, σ_L^2 'nin -20 dB veya daha küçük olduğu bölgede FD-DF, EH'lı sistemlere göre daha iyi başarıma sahip iken σ_L^2 'nin -40 dB'den 0 dB'ye olan tüm değerleri için FD-AF, tüm sistemler arasında en iyi birincil sistem servis kesilme başarımı göstermektedir.

Şekil 6.8'de FD-AF, FD-DF, EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF sistemleri için birincil sistem servis kesilme olasılıklarının R_{pt} 'ye göre değişimi incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -30$ dB, iletim işaret-gürültü oranı $\rho = 35$ dB, ikincil kullanıcılar arasındaki mesafe $d_{CD} = 0.05$, birincil kullanıcılar ile C arasındaki mesafe $d_{AC} = d_{BC} = 1$, ikincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{st} = 1$, $\mu_p = \mu_{s,2} = 1$ ve $\mu_{s,1} = 1/3$ olarak alınmıştır. EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF, PSR enerji hasatlama protokolünü kullanmaktadır ve güç bölme çarpanı $\beta = 0.4$ seçilmiştir. Şekil 6.8'deki benzetim sonuçlarından, R_{pt} 'nin artmasıyla sistemlerin birincil sistem servis kesilme olasılıklarının arttığı anlaşılmaktadır. R_{pt} 'nin tüm değerleri için EH'sız sistemler, EH'lı sistemlere göre daha iyi servis kesilme başarımı sağlamaktadır. Ayrıca, R_{pt} 'nin 0.5 ile 1.75 arasında değer aldığı bölgede EH'lı FD-DF, EH'lı FD-AF'e göre daha iyi birincil sistem başarımı göstermektedir.

Şekil 6.9'da EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF'in birincil sistem verimleri farklı R_{pt} değerleri için ρ 'ya bağlı olarak incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -30$ dB, ikincil kullanıcılar arasındaki mesafe $d_{CD} = 0.05$, birincil kullanıcılar ile C arasındaki mesafe $d_{AC} = d_{BC} = 1$, ikincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{st} = 1$, $\mu_p = 1$ ve $\mu_{s,1} = 1/3$ olarak alınmıştır. Sistemlerde PSR enerji hasatlama protokolü kullanıldığı kabul edilmiş ve güç bölme çarpanı $\beta = 0.4$ seçilmiştir. Şekil 6.9'daki sonuçlarda birincil kullanıcıların hedeflenen hızı R_{pt} 'nin artmasıyla birincil sistem verimlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Sistemlerde iletimin iki işaretleşme aralığında gerçekleşmesinden dolayı yüksek ρ değerlerinde birincil sistem verimleri R_{pt} 'nin yarısına erişmektedir. Ayrıca, belli bir R_{pt} değeri için, ρ 'nun bir bölgesinde EH'lı FD-DF daha iyi birincil sistem verimine sahip iken başka bir ρ bölgesinde EH'lı FD-AF daha iyi birincil sistem verimine sahiptir. Örneğin, $R_{pt} = 1$ için ρ 'nun 18 ile 33 dB arasında bir değer aldığı bölgede EH'lı FD-DF, 0 ile 15 dB



Şekil 6.9 : EH'lı birincil sistem verimlerinin ρ [dB]'ya göre değişimi.

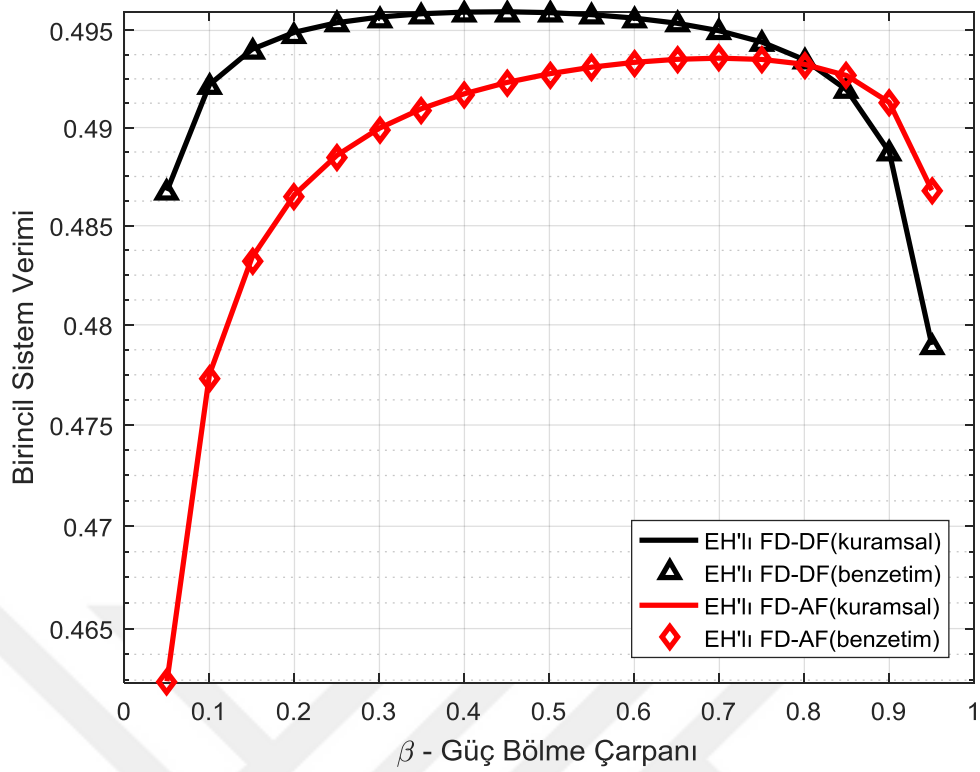


Şekil 6.10 : EH'lı ikincil sistem verimlerinin ρ [dB]'ya göre değişimi.

arasında bir değer aldığı bölgede EH'lı FD-AF daha iyi birincil sistem verimine sahiptir.

Şekil 6.10'da EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF'in ikincil sistem verimleri farklı d_{CD} değerleri için ρ 'ya bağlı olarak incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -30$ dB, birincil kullanıcılar ile C arasındaki mesafe $d_{AC} = d_{BC} = 1$, birincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{pt} = 1$, ikincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{st} = 1$, $\mu_p = 1$ ve $\mu_{s,1} = 1/3$ olarak alınmıştır. Sistemlerde PSR enerji hasatlama protokolü kullanıldığı kabul edilmiş ve güç bölme çarpanı $\beta = 0.4$ seçilmiştir. Şekil 6.10'daki sonuçlardan d_{CD} uzaklığının artmasıyla EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF sistemlerine ait ikincil sistem veriminin azaldığı görülebilmektedir. Ayrıca, her bir d_{CD} uzaklığı için EH'lı FD-DF, EH'lı FD-AF'e göre daha iyi ikincil sistem verimine sahiptir. Bu durumun nedeni EH'lı FD-DF sisteminde iki işaretleşme aralığında da C bilişsel rölesinin D'ye iletim yapması ve her bir evrede farklı paketler göndermesinden dolayıdır. Beklenildiği üzere, $d_{CD} = 0.05$ için yüksek ρ değerlerinde EH'lı FD-AF'nin ikincil sistem verimi, R_{st} 'nin yarısına erişirken, EH'lı FD-DF'in ikincil sistem verimi, R_{st} 'ye erişmektedir. Fakat d_{CD} 'nin artmasıyla ikincil sistem verimleri artan ρ değerleri için bu değerlere erişememektedir. Bu durum ikincil sistem verimlerinde d_{CD} 'nin büyük etkisi olduğunu göstermektedir.

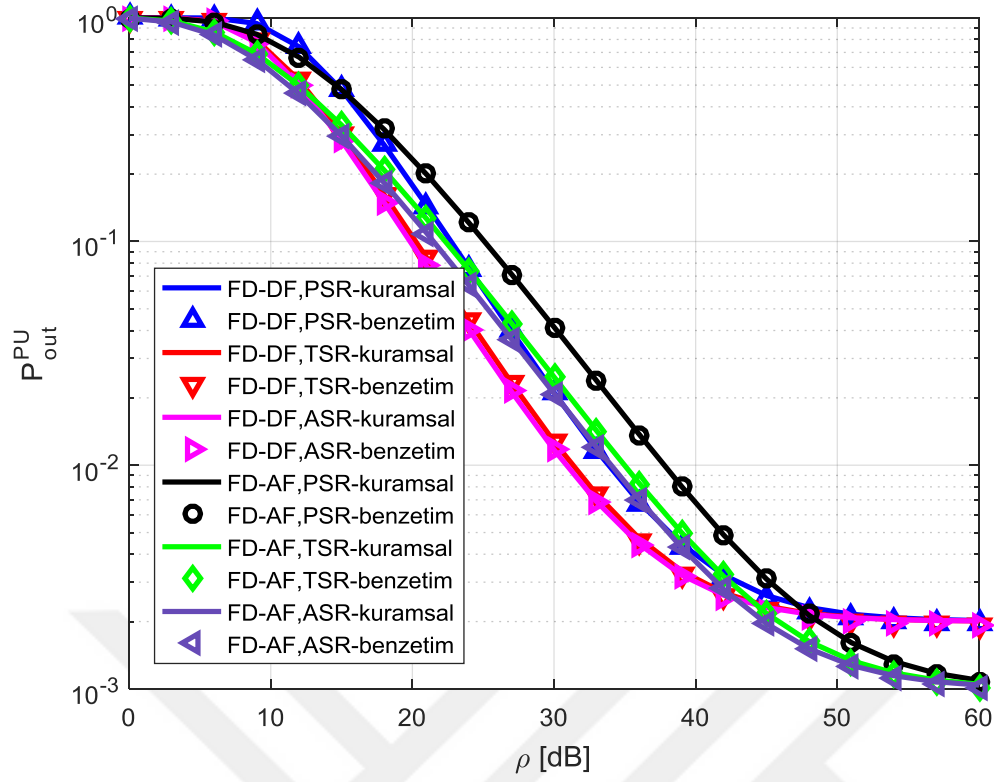
Şekil 6.11'de, EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF sistemlerinde PSR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda birincil sistem veriminin farklı β değerleri için değişimi incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -30$ dB, iletim işaret-gürültü oranı $\rho = 35$ dB, ikincil kullanıcılar arasındaki mesafe $d_{CD} = 0.05$, birincil kullanıcılar ile C arasındaki mesafe $d_{AC} = d_{BC} = 1$, ikincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{st} = 1$, $\mu_p = 1$ ve $\mu_{s,1} = 1/3$ olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, optimum β değerinin EH'lı FD-DF sistemi için 0.4-0.5, EH'lı FD-AF sistemi için ise 0.75 olduğunu göstermektedir. Ayrıca düşük ve yüksek β değerleri için birincil sistem verimlerinin oldukça düştüğü görülmektedir. Yüksek β değerlerinde verimin düşmesinin nedeni, bilgi işleme alıcısının girişine yeterli güçte işaretin gelmemesi ve bu durumun birinci evrede C bilişsel rölesinde bilgi işaretinin doğru bir şekilde işlenmesini engellemesidir. Düşük β değerlerinde verimin düşmesinin nedeni ise, ilk evrede C bilişsel rölesinin yeterli enerjiyi hasatlayamaması ve bu durumun sonucu olarak ikinci evrede C bilişsel rölesine gerekli iletim gücünün sağlanamamasıdır.



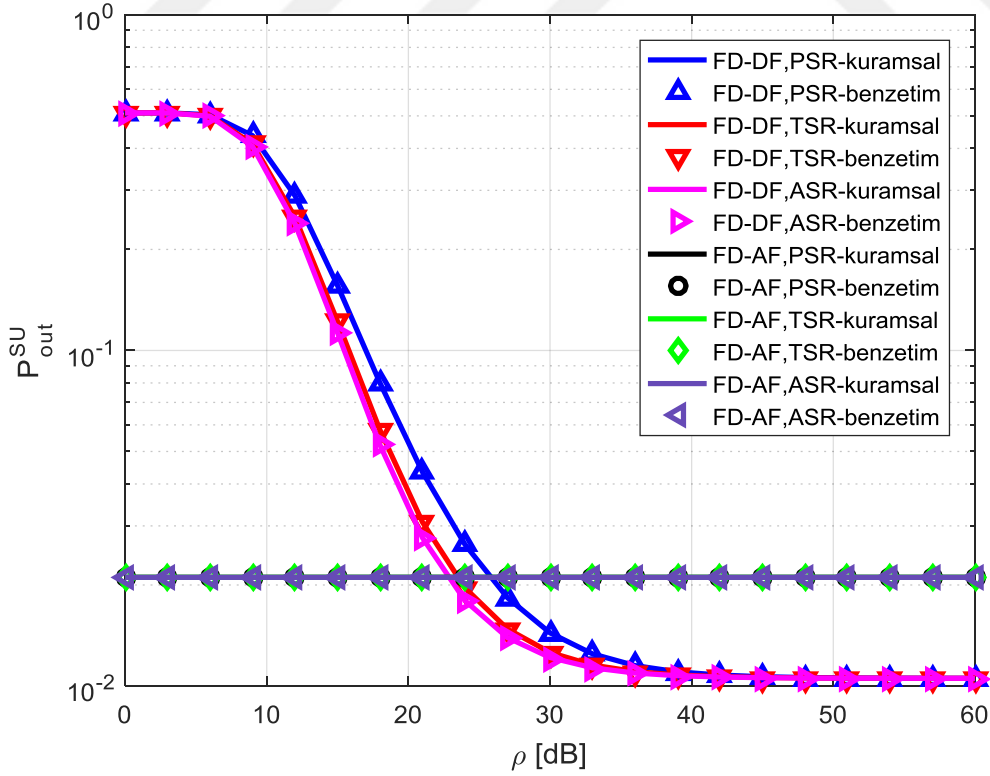
Şekil 6.11 : PSR kullanılması durumunda EH'lı birincil sistem verimlerinin β 'ya göre değişimi.

Şekil 6.12'de EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF sistemlerinde TSR, PSR veya ASR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda birincil sistem servis kesilme olasılığının ρ 'ya bağlı değişimi incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -30$ dB, birincil kullanıcılar ile C arasındaki mesafe $d_{AC} = d_{BC} = 1$, birincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{pt} = 1$, $\mu_p = 1$ ve $\mu_{s,1} = 1/3$ olarak alınmıştır. Sistemlerde PSR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda $\beta = 0.4$, TSR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda ise $\varepsilon = 0.28$ alınmıştır. Kullanılan enerji hasatlama protokolünden bağımsız olarak EH'lı FD-DF'nin, EH'lı FD-AF'e göre daha iyi birincil sistem servis kesilme başarımına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca hem EH'lı FD-DF sistemi hem de EH'lı FD-AF sistemi için ASR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda en iyi, PSR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda ise en kötü birincil sistem servis kesilme başarımının sağlandığı görülmüştür.

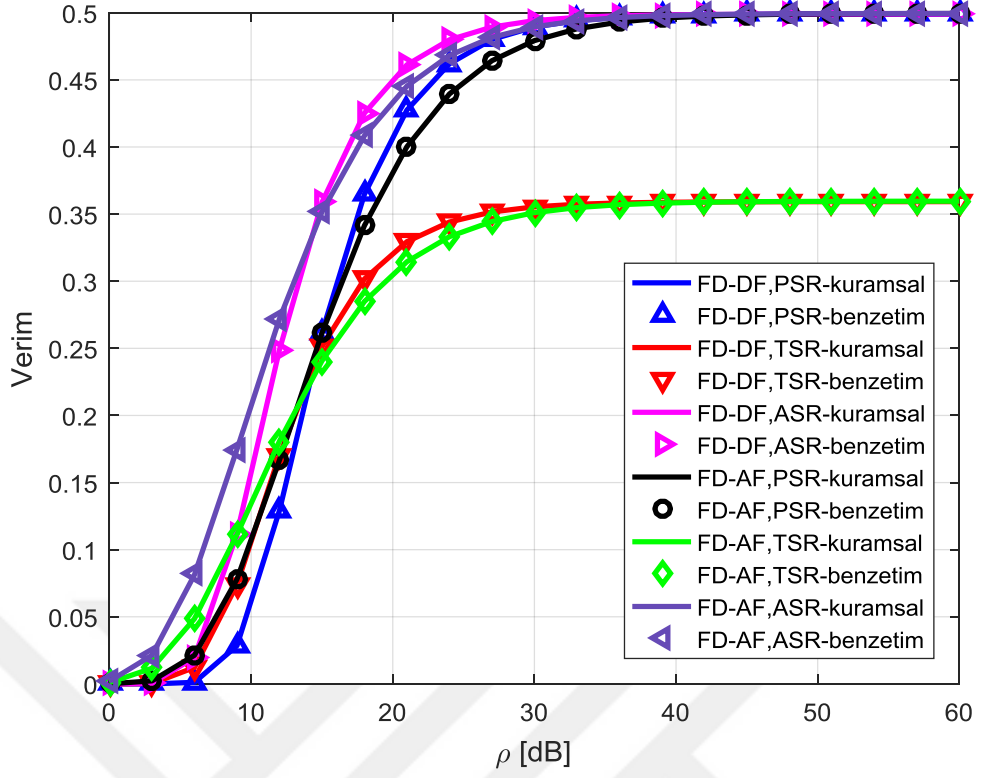
Şekil 6.13'de EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF sistemlerinde TSR, PSR veya ASR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda ikincil sistem servis kesilme olasılığının ρ 'ya bağlı değişimi incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -30$ dB, ikincil kullanıcılar arasındaki mesafe $d_{CD} = 0.25$, birincil kullanıcılar ile C



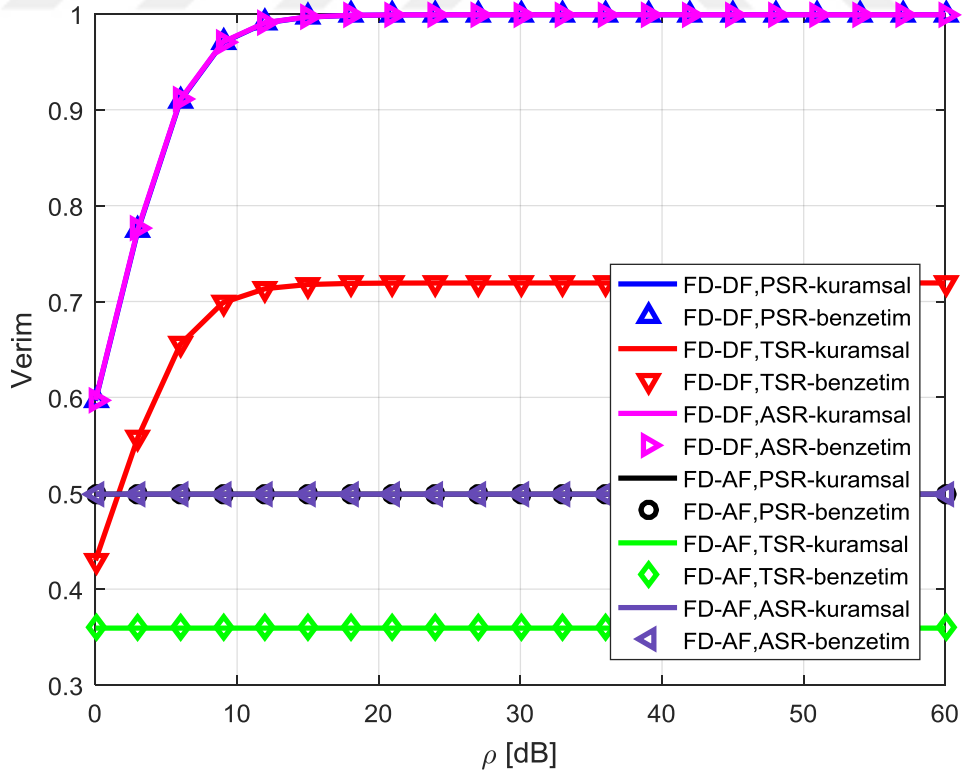
Şekil 6.12 : Farklı enerji hasatlama protokolleri için EH'lı birincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.



Şekil 6.13 : Farklı enerji hasatlama protokolleri için EH'lı ikincil sistem servis kesilme olasılıklarının ρ [dB]'ya göre değişimi.



Şekil 6.14 : Farklı enerji hasatlama protokolleri için EH'lı birincil sistem verimlerinin ρ [dB]'ya göre değişimi.



Şekil 6.15 : Farklı enerji hasatlama protokolleri için EH'lı ikincil sistem verimlerinin ρ [dB]'ya göre değişimi.

arasındaki mesafe $d_{AC} = d_{BC} = 2$, birincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{pt} = 1$, ikincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{st} = 1$, $\mu_p = 1$ ve $\mu_{s,1} = 1/3$ olarak seçilmiştir. Sistemlerde PSR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda $\beta = 0.4$, TSR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda ise $\varepsilon = 0.28$ alınmıştır. Sonuçlardan görüldüğü üzere EH'lı FD-AF sisteminde ikincil kullanıcılar için servis kesilme olasılığı kullanılan enerji hasatlama protokolünden bağımsız olarak sabit kalmaktadır. Bu durumun nedeni, EH'lı FD-AF sisteminde sadece ilk evrede C'den D'ye iletim yapılması ve C'deki enerji hasatlama işleminin ikincil sistem başarımını etkilememesidir. Ayrıca EH'lı FD-DF sistemi için ASR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda en iyi, PSR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda ise en kötü ikincil sistem servis kesilme başarımı elde edilmiştir.

Şekil 6.14 ve 6.15'de, EH'lı FD-AF ve EH'lı FD-DF sistemlerinde TSR, PSR veya ASR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda sırasıyla birincil ve ikincil sistem verimleri ρ 'ya bağlı olarak incelenmiştir. Artık döngü girişim kanal kazancı ortalaması $\sigma_L^2 = -30$ dB, ikincil kullanıcılar arasındaki mesafe $d_{CD} = 0.05$, birincil kullanıcılar ile C arasındaki mesafe $d_{AC} = d_{BC} = 1$, birincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{pt} = 1$, ikincil kullanıcıların hedeflenen hızı $R_{st} = 1$, $\mu_p = 1$ ve $\mu_{s,1} = 1/3$ olarak alınmıştır. Sistemlerde PSR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda $\beta = 0.4$, TSR enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda ise $\varepsilon = 0.28$ seçilmiştir. Şekil 6.14'de ise EH'lı sistemler için en yüksek birincil sistem verimi ASR veya PSR'ın kullanılması ile sağlanırken, en düşük birincil sistem verimi TSR'ın kullanılması sonucu elde edilmektedir. EH'lı sistemlerde ASR veya PSR enerji hasatlama protokolleri kullanılması durumunda yüksek ρ değerleri için birincil sistem verimi R_{pt} 'nin yarısına erişirken, TSR'nin kullanılması durumunda $R_{pt}(1 - \varepsilon)$ 'nin yarısına erişmektedir. Şekil 6.15'de herhangi bir enerji hasatlama protokolü kullanılması durumunda EH'lı FD-DF'in EH'lı FD-AF'e göre daha iyi ikincil sistem verimine sahip olduğu görülmektedir. EH'lı FD-DF sistemi için ASR veya PSR enerji hasatlama protokolleri kullanılması durumunda yüksek ρ değerleri için ikincil sistem verimi R_{st} 'ye erişirken, TSR'nin kullanılması durumunda $R_{st}(1 - \varepsilon)$ 'a erişmektedir. Diğer taraftan EH'lı FD-AF sistemi için ASR veya PSR enerji hasatlama protokolleri kullanılması durumunda yüksek ρ değerleri için ikincil sistem verimi R_{st} 'nin yarısına erişirken, TSR'nin kullanılması durumunda $R_{st}(1 - \varepsilon)$ 'un yarısına erişmektedir. EH'lı FD-AF sistemine ait ikincil sistem verim eğrilerinin ρ arttıkça sabit kalmasının

nedeni, ilk evrede C'den D'ye iletimde ρ 'nun artmasıyla hem C'nin hem de girişim oluşturan A ve B'nin gücünün artması ve bunun sonucunda EH'lı FD-AF'nin ikincil sistem servis kesilme olasılığının sabit kalmasıdır. Ek olarak, daha önce belirtildiği gibi EH'lı FD-AF ile FD-AF sistemleri aynı ikincil sistem servis kesilme başarımına sahiptir.

Şekil 6.12, 6.13, 6.14 ve 6.15'de elde edilen sonuçlar özetlenirse, ASR enerji hasatlama protokolünün, her iki EH'lı sisteme ait hem birincil hem de ikincil sistem servis kesilme başarımları ve verimlerinde üstünlüğü görülmektedir. Diğer taraftan seçilen β ve ε değerleri için PSR enerji hasatlama protokolü, EH'lı sistemler için daha yüksek birincil ve ikincil sistem verim değerleri sağlarken TSR enerji hasatlama protokolü daha iyi birincil ve ikincil servis kesilme başarımları sağlamaktadır.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında ilk olarak bilişsel radyo ağları, bilişsel radyo ağlarında spektrum erişim tekniklerine göre spektrum paylaşımı ve işbirlikli iletişim teknikleri incelenmiştir. Enerji hasatlama protokolleri tanıtılarak bu protokollere ait iletim yapılarından ve röledeki alıcı yapılarından bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde tam-çift yönlü iletim hakkında bilgi verilerek yarı-çift yönlü ilettime göre artıları ve eksileri belirtilmiştir. Ayrıca bu bölümde bilişsel radyo ile işbirlikli iletişimin birlikte uygulaması olan tam-çift yönlü bilişsel AF röle ağı (FD-AF) referans sistemi incelenmiştir. FD-AF için sistem modeli, her bir kullanıcının her bir evrede ileteceği işaret ve son kullanıcıdaki işaret-gürültü+girişim oranı açıklanmıştır. Ulaşılabilir anlık hız ifadeleri çıkarılarak iki yönlü birincil sistem servis kesilme olasılığı ile ikincil sistem servis kesilme olasılığı elde edilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde tam-çift yönlü bilişsel DF röle ağı (FD-DF) için yeni bir spektrum paylaşım protokolü önerilmiştir. FD-DF için sistem modeli, her bir kullanıcının her bir evrede ileteceği işaretler tanımlanmış ve işaret-gürültü+girişim oranları elde edilmiştir. Ulaşılabilir anlık hız ifadeleri çıkarılarak iki yönlü birincil sistem servis kesilme olasılığı ile ikincil sistem servis kesilme olasılığı elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar FD-AF'inki ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan FD-DF'in FD-AF'e göre daha iyi iki yönlü birincil sistem servis kesilme başarımı sağladığı görülmüştür. FD-DF'de birinci evrede birincil işaretlerin D kullanıcısında ardışık girişim giderme kullanılarak çözülmesi ve ikinci evrede, ilk evrede çözülen bu birincil işaretlerin kullanılmasıyla D kullanıcısında girişim elimine edilerek FD-AF'e göre daha iyi ikincil sistem servis kesilme başarımı elde edilmiştir. Ayrıca, FD-AF'den farklı olarak FD-DF'de C bilişsel rölesinin her iki evrede de D kullanıcısına farklı paketler göndermesiyle ikincil kullanıcının spektral verimliliği artmış ve ikincil iletimde süreklilik sağlanmıştır. Diğer taraftan, hem FD-DF hem de FD-AF sistemleri için artık döngü girişiminin belli bir düzeyin altında olduğu durumlarda, birincil sistem servis kesilme başarımının doğrudan ilettime göre arttığı görülmüştür. d_{AC} , d_{BC} , d_{CD} ,

σ_L^2 , R_{pt} ve R_{st} değişkenlerinin artmasının sistemlere ait birincil ve ikincil sistem servis kesilme başarımlarını kötüleştirdiği gözlemlenmiştir.

Tezin altıncı bölümünde, hem FD-DF hem de FD-AF sistemleri için C bilişsel rölesinin enerji hasatlamalı alıcı yapısına sahip olduğu ve ikinci evrede ilk evrede hasatladığı enerjiyi kullanarak iletim yaptığı durum ele alınmıştır. C bilişsel rölesinin TSR, PSR veya ASR enerji hasatlama protokolü kullanmasına bağlı olarak işaret-gürültü+girişim oranları, ulaşılabilir anlık hız ifadeleri, birincil ve ikincil sistem servis kesilme olasılıkları ve verim ifadeleri çıkarılmıştır. PSR'ın kullanıldığı EH'lı sistemler ile EH'sız sistemlerin servis kesilme başarımları karşılaştırılmıştır. EH'sız sistemlerin EH'lı sistemlere göre daha iyi birincil sistem servis kesilme başarımları sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni ilk evrede hasatlanan enerjinin EH'sız sistemlerde ikinci evrede harici kaynağının sağladığı enerji kadar olmamasıdır. d_{CD} 'nin küçük olduğu durum için EH'lı FD-DF ile FD-DF aynı ikincil sistem başarımları sağlamakta iken d_{CD} 'nin artmasıyla FD-DF'in daha iyi başarımlar sağladığı görülmüştür. İkinci evrede C'den D'ye iletim olmadığı için EH'lı FD-AF ile FD-AF'in aynı ikincil sistem başarımlarına sahip olduğu elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır. İlk evrede C bilişsel rölesinin iletim gücünün P yerine $P/3$ alınması EH'lı ve EH'sız sistemlerin birincil sistem servis kesilme başarımlarını olumlu yönde etkilerken, ikincil sistem servis kesilme başarımlarını olumsuz yönde etkilemiştir. Bilişsel rölenin FD olarak çalışmasında dolayı oluşan artık döngü girişimi, yüksek ρ değerleri için sistemlerde baskın hale gelmekte ve bundan servis kesilme olasılıkları belli bir değere yakınsamaktadır. Ek olarak, C'de TSR, PSR veya ASR kullanılması durumunda EH'lı FD-DF ve EH'lı FD-AF sistemlerin birincil ve ikincil sistem servis kesilme olasılıkları ile verimleri karşılaştırılmıştır. EH'lı sistemler arasında EH'lı FD-DF için ASR veya PSR kullanılması durumunda en iyi birincil ve ikincil sistem verimi elde edilirken, ASR kullanılması durumunda en iyi birincil ve ikincil sistem servis kesilme başarımları elde edilmiştir. Belli bir ρ değeri için PSR'ın kullanıldığı EH'lı sistemlerde β 'ya ve TSR'ın kullanılan EH'lı sistemlerde ε 'a göre birincil sistem veriminin değişimi incelenmiş ve optimum β ve ε değerlerinin EH'lı sistemlerde farklılık gösterdiği görülmüştür.

EH'lı sistemlerde ASR kullanılması durumunda C bilişsel rölesinde enerji hasatlama veya bilgi işlemeyi önceliklendirecek anten seçimi yapılması servis kesilme başarımlarına ve verimlere olumlu yansıyacaktır. Bölüm 3'de anlatılan GSCI ve GSCE

yapıları, iki yönlü çalışan EH'lı tam-çift yönlü bilişsel röle ağlarına, *min-max*, *max-max* veya *sum-max* gibi anten seçme ölçütleri kullanılarak uygulanabilir. Hangi yapının hangi anten seçme yöntemi ile en uygun sonuç vereceği servis kesilme ve verim analizleri yapılarak bulunabilir. Diğer taraftan EH'lı FD-DF sisteminde ASR protokolü kullanılması durumunda N adet antene sahip C bilişsel rölesi, ikinci evrede D ile arasında en kuvvetli kanala sahip anteni ile D'ye iletim yapabilir.





KAYNAKLAR

- [1] **Haykin, S.** (2005). Cognitive radio: Brain-empowered Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23, 201-220., Feb.
- [2] **Akyildiz, I.F., Lee, W.-Y., Vuran, M.C. ve Mohanty S.** (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 40-48.
- [3] **Chen, Z., Zhang X., ve Luan T.** (2010). Cooperation based spectrum sharing in cognitive radio networks, *2010 IEEE Youth Conference on Information, Computing and Telecommunications*, Beijing, 2010, pp. 17-20.
- [4] **Pandit, S., & Singh, G.** (2017). An overview of spectrum sharing techniques in cognitive radio communication system. *Wireless Networks*, 23, 497-518.
- [5] **Letaief, K.B., & Zhang, W.** (2009). Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks. *Proceedings of the IEEE*, 97, 878-893., May
- [6] **Jia, J., Zhang, J., & Zhang, Q.** (2009). Cooperative Relay for Cognitive Radio Networks. *IEEE INFOCOM 2009*, 2304-2312., Rio de Janeiro, Brazil, Apr.
- [7] **Simeone, O., Gambini J., Bar-Ness Y. & Spagnolini U.** (2007). Cooperation and Cognitive Radio, *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp.6511-6515, Glasgow, U.K., Jun.
- [8] **Hyadi, A., Driouch, E., Ajib, W., & Alouini, M.** (2013). Overlay cognitive radio systems with adaptive two-way relaying. *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 937-942.
- [9] **Liao, Y., Song, L., Han, Z., & Li, Y.** (2015). Full duplex cognitive radio: a new design paradigm for enhancing spectrum usage. *IEEE Communications Magazine*, 53, 138-145.
- [10] **Alves, H., Costa, D.B., Souza, R.D., & Latva-aho, M.** (2013). On the performance of two-way half-duplex and one-way full-duplex relaying. *2013 IEEE 14th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 56-60.
- [11] **Duarte, M., Dick, C., & Sabharwal, A.** (2012). Experiment-Driven Characterization of Full-Duplex Wireless Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11, 4296-4307.
- [12] **Hong, S.S., Brand, J., Choi, J.I., Jain, M., Mehlman, J., Katti, S., & Levis, P.** (2014). Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond. *IEEE Communications Magazine*, 52, 114-121.

- [13] **Sabharwal, A., Schniter, P., Guo, D., Bliss, D.W., Rangarajan, S., & Wichman, R.** (2014). In-Band Full-Duplex Wireless: Challenges and Opportunities. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32, 1637-1652.
- [14] **Li, Q., Ting, S.H., Pandharipande, A., & Han, Y.** (2011). Cognitive Spectrum Sharing With Two-Way Relaying Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60, 1233-1240., Mar.
- [15] **Li, Y., Long, H., Peng, M., & Wang, W.** (2014). Spectrum Sharing With Analog Network Coding. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63, 1703-1716.
- [16] **Han Y., Pandharipande, A. & Ting, S. H.** (2009). Cooperative decode-and-forward relaying for secondary spectrum access, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 10, pp. 4945-4950, October.
- [17] **Li, N., Li, Y., Wang, T., Peng, M., & Wang, W.** (2015). Full-duplex based spectrum sharing in cognitive two-way relay networks. *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 997-1001.
- [18] **Varshney, L. R.** (2008). Transporting information and energy simultaneously, *2008 IEEE International Symposium on Information Theory*, Toronto, ON, pp. 1612-1616.
- [19] **Grover, P., & Sahai, A.** (2010). Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer. *2010 IEEE International Symposium on Information Theory*, 2363-2367.
- [20] **Zhou X., Zhang, R. & Ho, C. K.** (2013). Wireless Information and Power Transfer: Architecture Design and Rate-Energy Tradeoff. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 11, pp. 4754-4767, Nov.
- [21] **Zhang R. & Ho C. K.,** (2013). MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, May.
- [22] **Nasir, A.A., Zhou, X., Durrani, S., & Kennedy, R.A.** (2013). Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12, 3622-3636., Jul.
- [23] **Nasir, A.A., Zhou, X., Durrani, S., & Kennedy, R.A.** (2014). Throughput and ergodic capacity of wireless energy harvesting based DF relaying network. *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 4066-4071., Sydney, N.S.W., Australia.
- [24] **Tao, R., Salem, A., & Hamdi, K.A.** (2016). Adaptive Relaying Protocol for Wireless Power Transfer and Information Processing. *IEEE Communications Letters*, 20, 2027-2030.
- [25] **Krikidis, I., Sasaki, S., Timotheou, S., & Ding, Z.** (2014). A Low Complexity Antenna Switching for Joint Wireless Information and Energy Transfer in MIMO Relay Channels. *IEEE Transactions on Communications*, 62, 1577-1587.

- [26] **van der Meulen E. C.** (1968). Transmission of Information in a T-Terminal Discrete Memoryless Channel. Berkeley, CA: Dept. Statistics, Univ. California.
- [27] **Cover, T.M., & Gamal, A.E.** (1979). Capacity theorems for the relay channel. *IEEE Trans. Information Theory*, 25, 572-584.
- [28] **Laneman J. N., Tse D. N. C. & Wornell G. W.** (2004). Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec.
- [29] **Krikidis, I., Timotheou, S., Nikolaou, S., Zheng, G., Ng, D.W., & Schober, R.** (2014). Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems. *IEEE Communications Magazine*, 52, 104-110.
- [30] **Zhou, X., Zhang, R., & Ho, C.K.** (2012). Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff. *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 3982-3987.
- [31] **Martello, S., Pisinger, D., & Toth, P.** (1999). Dynamic Programming and Strong Bounds for the 0-1 Knapsack Problem. *Management Science*, vol. 45, no. 3, pp. 414–424.
- [32] **Url-1** mathworld.wolfram.com/ModifiedBesselFunctionoftheSecondKind.html, erişim tarihi 10.02.2019.
- [33] **Gradshteyn, I. S., Ryzhik, I. M.** (2007). *Table of Integrals, Series, and Products*. Elsevier/Academic Press, Amsterdam. ISBN: 978-0-12-373637-6; 0-12-373637-4, Seventh Edition.
- [34] **Springer, M., & Thompson, W.** (1966). The Distribution of Products of Independent Random Variables. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 14(3), 511-526.



EKLER

EK A: Bölüm 4.2’de (4.14)’den (4.15)’in elde edilmesi için uygulanan ara işlemler

EK B: Bölüm 5.2’de (5.30)’dan (5.31) ve (5.32)’nin elde edilmesi için uygulanan ara işlemler



EK A

Bölüm 4.2’de ikincil sistem servis kesilme olasılığının,

$$P_{out}^{SU} = P_r(R_{CD} < R_{st}) = P_r(\Gamma_D < 2^{2R_{st}} - 1) \quad (4.14)$$

şeklinde bulunduğu belirtilmişti. (4.13), (4.14)’de yerine yazıldığında, $P_r(R_{CD} \leq R_{st}) = P_r\left(\frac{X_1}{X_2 + X_3} \leq 2^{R_{st}} - 1\right)$ olduğu görülür. Burada $2^{R_{st}} - 1 = \tau$ olarak tanımlansın.

$$\begin{aligned} P_r\left(\frac{X_1}{X_2 + X_3} \leq \tau\right) &= P_r(X_1 \leq \tau(x_2 + x_3)) \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty F_{X_1|X_2, X_3}(\tau(x_2 + x_3)) f_{X_2}(x_2) f_{X_3}(x_3) dx_2 dx_3 \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty P_r(X_1 \leq \tau(x_2 + x_3)) \lambda_2 e^{-\lambda_2 x_2} \lambda_3 e^{-\lambda_3 x_3} dx_2 dx_3 \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\tau(x_2 + x_3)} \lambda_1 e^{-\lambda_1 x_1} dx_1 \lambda_2 e^{-\lambda_2 x_2} \lambda_3 e^{-\lambda_3 x_3} dx_2 dx_3 \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \left\{ -e^{-\lambda_1 x_1} \Big|_0^{\tau(x_2 + x_3)} \right\} \lambda_2 e^{-\lambda_2 x_2} \lambda_3 e^{-\lambda_3 x_3} dx_2 dx_3 \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \{1 - e^{-\lambda_1 \tau(x_2 + x_3)}\} \lambda_2 e^{-\lambda_2 x_2} \lambda_3 e^{-\lambda_3 x_3} dx_2 dx_3 \\ &= 1 - \int_0^\infty \int_0^\infty \lambda_2 \lambda_3 e^{-(\lambda_1 \tau + \lambda_2)x_2} e^{-(\lambda_1 \tau + \lambda_3)x_3} dx_2 dx_3 \\ &= 1 - \int_0^\infty \lambda_2 e^{-(\lambda_1 \tau + \lambda_2)x_2} dx_2 \int_0^\infty \lambda_3 e^{-(\lambda_1 \tau + \lambda_3)x_3} dx_3 \\ &= 1 - \left\{ \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 \tau + \lambda_2)} \times \frac{\lambda_3}{(\lambda_1 \tau + \lambda_3)} \right\} \end{aligned}$$

şeklinde bulunmaktadır.

EK B

Bölüm 5.2’de birincil sistem servis kesilme olasılığının,

$$P_{out}^{PU} = 1 + \int_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} \int_{\Gamma}^{\theta-x_{BC}} d_{AC}^v e^{-d_{AC}^v x_{AC}} dx_{AC} d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v x_{BC}} dx_{BC} - \int_{\Gamma}^{\infty} d_{AC}^v e^{-d_{AC}^v x_{AC}} dx_{AC} \int_{\Gamma}^{\infty} d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v x_{BC}} dx_{BC} \quad (5.30)$$

eşitliği ile bulunabileceği belirtilmişti. (5.30) daha açık yazıldığında,

$$\begin{aligned} P_{out}^{PU} &= 1 + \int_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} \left[-e^{-d_{AC}^v x_{AC}} \Big|_{\Gamma}^{\theta-x_{BC}} \right] d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v x_{BC}} dx_{BC} - e^{-d_{AC}^v \Gamma} e^{-d_{BC}^v \Gamma} \\ P_{out}^{PU} &= 1 + \int_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} e^{-d_{AC}^v \Gamma} d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v x_{BC}} dx_{BC} \\ &\quad - \int_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} e^{-d_{AC}^v (\theta-x_{BC})} d_{BC}^v e^{-d_{BC}^v x_{BC}} dx_{BC} - e^{-d_{AC}^v \Gamma} e^{-d_{BC}^v \Gamma} \\ P_{out}^{PU} &= 1 + e^{-d_{AC}^v \Gamma} \left[-e^{-d_{BC}^v x_{BC}} \Big|_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} \right] \\ &\quad - e^{-d_{AC}^v \theta} \int_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} d_{BC}^v e^{-x_{BC} (d_{BC}^v - d_{AC}^v)} dx_{BC} - e^{-d_{AC}^v \Gamma} e^{-d_{BC}^v \Gamma} \\ P_{out}^{PU} &= 1 + e^{-d_{AC}^v \Gamma} e^{-d_{BC}^v \Gamma} - e^{\Gamma (d_{BC}^v - d_{AC}^v)} e^{-d_{BC}^v \theta} \\ &\quad - e^{-d_{AC}^v \theta} \int_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} d_{BC}^v e^{-x_{BC} (d_{BC}^v - d_{AC}^v)} dx_{BC} - e^{-d_{AC}^v \Gamma} e^{-d_{BC}^v \Gamma} \end{aligned}$$

elde edilir. Burada eğer $d_{AC} = d_{BC}$ ise servis kesilme olasılığı,

$$\begin{aligned} P_{out}^{PU} &= 1 + e^{-d_{AC}^v \Gamma} e^{-d_{BC}^v \Gamma} - e^{-d_{BC}^v \theta} - e^{-d_{AC}^v \theta} \int_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} d_{BC}^v dx_{BC} - e^{-d_{AC}^v \Gamma} e^{-d_{BC}^v \Gamma} \\ P_{out}^{PU} &= 1 - e^{-d_{BC}^v \theta} - e^{-d_{AC}^v \theta} \int_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} d_{BC}^v dx_{BC} \\ P_{out}^{PU} &= 1 - e^{-d_{BC}^v \theta} - e^{-d_{AC}^v \theta} (\theta - 2\Gamma) d_{BC}^v \end{aligned} \quad (5.31)$$

elde edilmektedir. Fakat eğer $d_{AC} \neq d_{BC}$ ise,

$$\begin{aligned} P_{out}^{PU} &= 1 + e^{-d_{AC}^v \Gamma} e^{-d_{BC}^v \Gamma} - e^{\Gamma (d_{BC}^v - d_{AC}^v)} e^{-d_{BC}^v \theta} \\ &\quad - e^{-d_{AC}^v \theta} \left[\frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v} e^{-x_{BC} (d_{BC}^v - d_{AC}^v)} \Big|_{\Gamma}^{\theta-\Gamma} \right] - e^{-d_{AC}^v \Gamma} e^{-d_{BC}^v \Gamma} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{out}^{PU} &= 1 - e^{\Gamma(d_{BC}^v - d_{AC}^v)} e^{-d_{BC}^v \theta} \\
&\quad + e^{-d_{AC}^v \theta} \frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v} (e^{(\Gamma - \theta)(d_{BC}^v - d_{AC}^v)} - e^{-\Gamma(d_{BC}^v - d_{AC}^v)}) \\
P_{out}^{PU} &= 1 - e^{\Gamma(d_{BC}^v - d_{AC}^v)} e^{-d_{BC}^v \theta} + e^{-d_{BC}^v \theta} \frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v} e^{\Gamma(d_{BC}^v - d_{AC}^v)} \\
&\quad - e^{-d_{AC}^v \theta} \frac{d_{BC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v} e^{-\Gamma(d_{BC}^v - d_{AC}^v)} \\
P_{out}^{PU} &= 1 + \frac{d_{AC}^v}{d_{BC}^v - d_{AC}^v} e^{-d_{BC}^v \theta} e^{\Gamma(d_{BC}^v - d_{AC}^v)} + \frac{d_{BC}^v}{d_{AC}^v - d_{BC}^v} e^{-d_{AC}^v \theta} e^{\Gamma(d_{AC}^v - d_{BC}^v)} \quad (5.32)
\end{aligned}$$

olarak elde edilmektedir.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Hüseyin Onur Baktıroğlu
Doğum Tarihi ve Yeri : İstanbul, 1993
E-posta : baktiroglu3893@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Lisans Bölüm 7.si
- SIU 2018-IEEE Türkiye İletişim Kolu en iyi öğrenci bildirisi birincilik ödülü

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR:

- **Baktıroğlu O.**, Babaei M., Aygözü Ü., 2018: A Spectrum Sharing Protocol for Cognitive Full-Duplex DF Relaying Networks, *IEEE 26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Nov 20-21, 2018 Belgrade, Serbia.
- **Baktıroğlu O.**, Aygözü Ü., 2018: Tam Çift-yönlü Bilişsel DF Röle Ağları için Bir Spektrum Paylaşım Protokolü, *IEEE 26. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU-2018)*, 2-5 Mayıs, 2018, Çeşme-İzmir, Türkiye.