

**ALTINA SERMELİ BİLİŞSEL RADYO AĞLARI İÇİN
İŞBİRLİKLİ SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sema SARAÇ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

EKİM 2016

**ALTINA SERMELİ BİLİŞSEL RADYO AĞLARI İÇİN
İŞBİRLİKLİ SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Sema SARAÇ
(504141324)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ

EKİM 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504141324 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Sema SARAÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ALTINA SERMELİ BİLİŞSEL RADYO AĞLARI İÇİN İŞBİRLİKLİ SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLLERİ" başlıklı tezini aşağıdaki 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 : **9 Eylül 2016**
Savunma Tarihi : **5 Ekim 2016**





Aileme...



ÖNSÖZ

Tez çalışması süresince her türlü katkıyı sağlayan, sonsuz enerjisi ve yardımlarıyla beni destekleyen danışmanım Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ'ne bu süreçte gösterdiği sabır ve anlayış için teşekkür ederim. Ayrıca her zaman yanımda olup benden desteğini esirgemeyen aileme, arkadaşlarıma ve Deniz'e sonsuz minnettarlığımı sunarım.

Ekim 2016

Sema SARAÇ
(Elektronik Haberleşme Mühendisi)





İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
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.....	2
2. TELSİZ İLETİŞİM KANALLARININ ÖZELLİKLERİ VE OTOMATİK YİNELEME İSTEME MEKANİZMASI	5
2.1 Telsiz İletişim Kanalları	5
2.1.1 Yol kaybı.....	6
2.1.2 Gölgeleme.....	7
2.1.3 Sönümlenme	8
2.2 İşbirlikli Çeşitleme	9
2.2.1 Çöz-ve-aktar	9
2.2.2 Kuvvetlendir-ve-aktar	10
2.3 Otomatik Yinemele İsteme	12
3. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI	15
3.1 Altına Serme Yaklaşımı.....	16
3.2 Üstüne Serme Yaklaşımı.....	17
3.3 Araya Yerleştirme Yaklaşımı.....	17
4. ALTINA SERMELİ BİLİŞSEL RADYO AĞ MODELİ	21
5. DF TEKNİĞİ İÇİN YENİ SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ	23
5.1 DF Tekniği için Yeni Protokolün Tanımlanması	23
5.2 Servis Kesilme Olasılığı ve Verim Analizi	28
5.2.1 Birincil kullanıcı.....	32
5.2.2 İkincil kullanıcı.....	35
5.3 Referans Modeller	37
5.3.1 Klasik model.....	37
5.3.2 Yalnız işbirlikli model	38
5.3.3 Yalnız altına sermeli model	40
5.4 Başarım Değerlendirmesi	42
6. AF TEKNİĞİ İÇİN YENİ SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ	45
6.1 AF Tekniği için Yeni Protokolün Tanımlanması	45
6.2 Servis Kesilme Olasılığı ve Verim Analizi	50

6.2.1 Birincil kullanıcı.....	52
6.2.2 İkincil kullanıcı.....	55
6.3 Referans Modeller	56
6.3.1 Klasik model.....	56
6.3.2 Yalnız işbirlikli model	56
6.3.3 Yalnız altına sermeli model	58
6.4 Başarım Değerlendirmesi	58
7. DF ve AF İÇİN ÖNERİLEN PROTOKOLLERİN BAŞARIM KARŞI- LAŞTIRMALARI.....	61
7.1 DF ve AF için Önerilen Protokollerin Başarım Karşılaştırması	61
7.2 DF ve AF için Önerilen Protokollerin Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Başarım Karşılaştırması	64
8. SONUÇ	73
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ	79

KISALTMALAR

ACK	: Acknowledgement (Alındı Onayı)
AF	: Amplify-and-Forward (Kuvvetlendir-ve-Aktar)
ARQ	: Automatic Repeat Request (Otomatik Yineleme İsteme)
AWGN	: Additive White Gaussian Noise (Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü)
CDF	: Cumulative Distribution Function (Olasılık Dağılım Fonksiyonu)
CSI	: Channel State Information (Kanal Durum Bilgisi)
CR	: Cognitive Radio (Bilişsel Radyo)
CRN	: Cognitive Radio Network (Bilişsel Radyo Ağı)
DF	: Decode-and-Forward (Çöz-ve-Aktar)
LoS	: Line of Sight (Doğrudan Görüş)
NACK	: Negative Acknowledgement (Alındı Reddi)
PDF	: Probability Density Function (Olasılık Yoğunluk Fonsiyonu)
PR	: Primary Receiver (Birincil Alıcı)
PT	: Primary Transmitter (Birincil Verici)
PU	: Primary User (Birincil Kullanıcı)
SNR	: Signal to Noise Ratio (İşaret Gürültü Oranı)
SR	: Secondary Receiver (İkincil Alıcı)
ST	: Secondary Transmitter (İkincil Verici)
SU	: Secondary User (İkincil Kullanıcı)



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Farklı ortamlar için yol kaybı sabitleri.....	7
Çizelge 5.1: DF tekniği için önerilen protokolün durumları.	26
Çizelge 6.1: AF tekniği için önerilen protokolün durumları.	48





ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Alıcı ve verici arasındaki çok yollu yayılım.....	7
Şekil 2.2 : Doppler kayması.....	8
Şekil 2.3 : Çöz-ve-aktar tekniği ile işaretin iletimi.....	10
Şekil 2.4 : Kuvvetlendir-ve-aktar tekniği ile işaretin iletimi.....	11
Şekil 3.1 : Bilişsel çevrim.....	16
Şekil 3.2 : Altına serme yaklaşımı için bir model.....	17
Şekil 3.3 : Üstüne serme yaklaşımı için bir model.....	18
Şekil 3.4 : Spektral yoğunluk ölçümü [12].....	18
Şekil 4.1 : Ele alınan altına sermeli CRN modeli (Düz çizgiler düğümler arasındaki kanalları gösterirken kesikli çizgiler ACK/NACK geri bildirimlerini göstermektedir).....	21
Şekil 5.1 : DF tekniği için önerilen yeni protokolün T_m yineleme sayısı için Markov zinciri.....	23
Şekil 5.2 : DF tekniği için önerilen protokolün $T_m = 2$ iken Markov zinciri.....	26
Şekil 5.3 : DF tekniği için önerilen protokolün $T_m = 3$ iken Markov zinciri.....	27
Şekil 5.4 : DF tekniğinde klasik model için Markov zinciri.....	37
Şekil 5.5 : DF tekniğinde yalnız işbirlikli model için Markov zinciri.....	38
Şekil 5.6 : DF tekniğinde yalnız altına sermeli model için Markov zinciri.....	41
Şekil 5.7 : DF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ için kararlı durum olasılıkları.....	43
Şekil 5.8 : DF tekniği için önerilen protokolün PU ve SU verimi ile referans modellerin PU verimlerinin karşılaştırılması ($T_m = 2$).....	43
Şekil 5.9 : DF tekniği için önerilen protokolün PU ve SU verimleri ($T_m = 2$ ve $T_m = 3$ için).....	44
Şekil 6.1 : AF tekniği için önerilen yeni protokolün T_m yineleme sayısı için Markov zinciri.....	46
Şekil 6.2 : AF tekniği için önerilen protokolün $T_m = 2$ iken Markov zinciri.....	49
Şekil 6.3 : AF tekniği için önerilen protokolün $T_m = 3$ iken Markov zinciri.....	49
Şekil 6.4 : AF tekniğinde yalnız işbirlikli model için Markov zinciri.....	56
Şekil 6.5 : AF tekniği için önerilen protokolde kararlı durum olasılıkları.....	58
Şekil 6.6 : AF tekniği için önerilen protokolün PU ve SU verimi ile referans modellerin PU verimlerinin karşılaştırılması ($T_m = 2$).....	59
Şekil 6.7 : AF tekniği için önerilen protokolün PU ve SU verimleri ($T_m = 2$ ve $T_m = 3$ için).....	60
Şekil 7.1 : DF ve AF teknikleri için önerilen protokollerde PU ve SU verimleri. ($T_m = 2$).....	61
Şekil 7.2 : DF ve AF tekniklerinde yalnız işbirlikli modeller için PU'nun verimi.....	62

Şekil 7.3	: Önerilen protokollerde SU veriminin R_s 'ye göre değişimi ($R_p = 1$ iken).	63
Şekil 7.4	: Önerilen protokollerde SU'nun veriminin d_s 'ye göre değişimi.	63
Şekil 7.5	: Önerilen protokollerde PU ve SU'nun veriminin girişim eğişine göre değişimi.	64
Şekil 7.6	: Önerilen protokoller için yalnız altına sermeli durumlarda ve [3] için erişim durumunda PU için verim analizi ($R_p = R_s = 1$).	66
Şekil 7.7	: Önerilen protokoller ve [3] için yalnız işbirlikli durumlarda PU için verim analizi ($R_p = R_s = 1$).	67
Şekil 7.8	: Önerilen protokoller ve [3]'te PU için verim analizi ($R_p = R_s = 1$).	68
Şekil 7.9	: Önerilen protokoller ve [3]'te SU için verim analizi ($R_p = R_s = 1$).	68
Şekil 7.10	: [4]'te PU ve SU veriminin P_t/N_0 ile değişimi ($R_p = 1, R_s = 0.5$).	69
Şekil 7.11	: Önerilen protokoller ve [4]'te PU için verim analizi ($R_p = 1, R_s = 0.5$).	70
Şekil 7.12	: Önerilen protokoller ve [4]'te SU için verim analizi ($R_p = 1, R_s = 0.5$).	71

ALTINA SERMELİ BİLİŞSEL RADYO AĞLARI İÇİN İŞBİRLİKLİ SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLLERİ

ÖZET

Spektrum paylaşımli bilişsel radyo ağlarında ikincil kullanıcıların (SU), birincil kullanıcının (PU) başarımını en az etkileyecek şekilde spektrumu kullanması önemlidir. Ancak bunu yaparken kendi başarımını da belli bir düzeyde tutması gerekmektedir.

Bu tezde, otomatik yineleme isteme (ARQ) tabanlı PU'dan ve çift yönlü iletişim kurabilen SU'dan oluşan altına sermeli bilişsel radyo ağı için yeni iki farklı işbirlikli spektrum paylaşım protokolü önerilmiştir. Önerilen protokollerde SU bazı durumlarda kendi paketini iletmek için spektrumu kullanırken bazı durumlarda ise yalnızca PU'nun paketini iletmektedir. Böylece spektrumun paylaşımli olarak kullanıldığı durumlarda kendi başarımını iyileştirirken, diğer durumlarda işbirliği yaparak spektrum paylaşımli durumda PU'nun kötü etkilenen başarımını arttırmayı amaçlamaktadır. Bu tezde ilk olarak, telsiz iletişim ağları ve işbirlikli çeşitleme protokolleri ile ARQ protokolü anlatılmış ve bilişsel radyo ağ kavramı ve çeşitlerinden bahsedilmiştir. Sonrasında ele alınan ARQ tabanlı PU'dan ve iki yönlü iletişim kurabilen SU'dan oluşan altına sermeli bilişsel ağ modeli tanıtılmıştır. Sırasıyla çöz-ve-aktar (DF) tekniği ile kuvvetlendir-ve-aktar (AF) tekniği için önerilen spektrum paylaşım protokolleri açıklanmış ve her iki protokol için referans modeller oluşturulmuştur. PU'nun paketinin iletilebilmesi için farklı yineleme sayılarında bu protokoller incelenmiştir. Ele alınan protokollerde PU ve SU'nun servis kesilme olasılıkları kullanılarak verim analizleri yapılmış ve bilgisayar benzetimleriyle başarımlar değerlendirilmiştir. Her iki teknik için de önerilen protokollerde yineleme sayısındaki artış PU'nun düşük SNR'lerde verimini az da olsa kötü etkilemesine rağmen yüksek SNR'lerde bir değişime neden olmamıştır. DF tekniği için önerilen protokolle PU'nun verimi AF için önerilen protokolle göre düşük SNR değerlerinde daha iyi iken; SU'nun verimi sadece çok düşük SNR değerlerinde farklılık göstermiş; kalan değerlerde başarımının değişmediği gözlenmiştir. Ayrıca her iki protokolle de yüksek SNR değerlerinde PU'nun veriminden göz ardı edilebilecek bir kayıpla, SU'nun verimi aynı SNR değerlerinde belirli bir düzeyde sabit tutulmuştur. Her iki protokolün de birinde PU'nun başarımına öncelik veren diğerinde ise SU'nun başarımına öncelik veren farklı iki çalışmayla başarımlar karşılaştırılması yapılmıştır. Birincil kullanıcının başarımına öncelik veren çalışmaya göre önerilen protokollerde PU'nun başarımı düşük SNR'lerde daha iyi iken, yüksek SNR'lere gidildikçe biraz azalmıştır. Ancak yüksek SNR'lerde SU başarımı bu çalışmada sifıra düşerken, önerilen protokollerin her ikisi için de belli bir değerde sabit kalmıştır. Önerilen protokollerde SU başarımı SU'nun başarımına öncelik veren çalışmaya göre yüksek SNR'lerde yaklaşık %50 kötüleşirken; aynı SNR değerlerinde PU başarımı bu çalışmaya kıyasla %70 daha iyileşmiştir.



COOPERATIVE SPECTRUM SHARING PROTOCOLS FOR UNDERLAY COGNITIVE RADIO NETWORKS

SUMMARY

Of late years, usage of wireless communication systems increases in military and public area. The increase in number of users and inefficient usage of the spectrum lead to the problem of spectrum scarcity. One of the most promising technologies to overcome this problem is the cognitive radio to sense and access the spectrum dynamically and to use the available spectrum efficiently. Cognitive radios are intelligent devices able to be aware of their surrounding environment to control and adjust their parameters according to their internal conditions. Cognitive radios optimize the communication in a sophisticated way for users by providing spectrum flexibility and spectrum management.

The basis of cognitive radio networks consist of one primary and one secondary network. Primary user (PU) which belongs to primary network has license to access the spectrum band, while secondary user (SU) which belongs to secondary network has not. In earlier times, researches have been based on spectrum sensing by SU, whereas increasing number of researches have been carried out on spectrum sharing between PU and SU recently. In the literature, three fundamental paradigms for cognitive radio networks are explored: interweave, overlay and underlay. According to studies, the major part of the spectrum has spectrum holes in a certain time because of the inefficient usage. In interweave cognitive radio networks, SU opportunistically detects the spectrum holes in where PU does not operate and uses these holes to access the spectrum without interfering at PU's receiver. When PU accesses that spectrum band, SU detects another spectrum hole and settle in after it concludes its communication. However, PU and SU are able to access spectrum at the same time in overlay cognitive radio networks. SU has knowledge of PU's information to mitigate or cancel interference at the SU's receiver; SU cooperates with PU and improves PU's performance by transmitting PU's packet to receivers with its own packet simultaneously. The underlay cognitive radio networks allow PU and SU to reach spectrum and transmit their packet concurrently. In contrast to overlay cognitive radio networks, SU can access the spectrum simultaneously with PU as long as the interference that it causes at PU's receiver is under an acceptable level. SU needs to know interference it causes at the PU's receiver. It is important that the SU's spectrum usage has minimum destructive effect on PU's transmission while SU has to keep its performance at a certain level.

In this dissertation, first, basics on wireless communication networks and cooperative diversity techniques with automatic repeat request (ARQ) are reviewed, and the concept of cognitive radio network with its different paradigms are surveyed. Second, an underlay cognitive radio network model which consists of an ARQ based PU and a bidirectionally communicating SU is probed. Proposed spectrum sharing protocols for two different cooperative diversity strategies i.e., amplify-and-forward

(AF), decode-and-forward (DF) are described. Reference schemes as cooperation-only scheme, underlay-only scheme and non-CR scheme are also presented to make performance comparisons for PU in both proposed protocols. In cooperation-only scheme, SU only uses spectrum to cooperate with PU without transmitting its own information to improve the PU's transmission. On the contrary, PU and SU use the spectrum concurrently where SU's transmission considers a certain interference threshold in underlay-only scheme to not degrade the PU's performance. SU stays silent during PU's transmission or vice versa. On the other hand, non-CR scheme is composed of only the PU network which indicates that no SU's activity occurs in the considered spectrum. PU transmits its own packet in the absence of SU nodes in surrounding environment. Finally, PU's and SU's throughputs are derived from outage probabilities and the throughput results are supported via computer simulation results for both proposed protocols. The performance comparisons between the proposed protocols and the existing protocols in the literature are also provided.

In the considered underlay cognitive radio network, PU arises from a primary transmitter (PT) and a primary receiver (PR) whereas, SU has two nodes S1 and S2 which communicate with each other bidirectionally. Thanks to ARQ mechanisms, PR sends Acknowledgment (ACK) feedback for every successful packet which reaches to PR smoothly and sends Negative Acknowledgment (NACK) for every failed packet to increase the reliability of the packet transmission. Our cognitive radio network model operates on three different modes by switching between them. SU is permitted to reach spectrum either by transmitting its own packet in underlay mode or by transmitting PU's packet to enhance PU's transmission in cooperation mode. In without SU mode, PT transmits its own packet to PR while SU eavesdrops on PT's transmission and stays silent. In addition to SU's transmission structure, PU's packets can be transmitted under interference caused by SU's transmission in underlay mode or can be transmitted while SU stays silent. Apart from these, PU's packet can be transmitted over SU's nodes while PT stays silent in cooperation mode. Two different cooperative diversity methods are exploited in cooperation mode.

In the proposed spectrum sharing protocol for DF one of the SU's nodes S1, S2 or both can decode received PT's packet and transmit the packet to PR in cooperative mode. In the proposed spectrum sharing protocol for AF, without any decision mechanism at S1 and S2, PU's packet is amplified and transmitted to PR. In that way, SU aims to help PU's transmission when it is affected badly from the channel and will improve its own performance when PU's transmission is successful. Both protocols including reference schemes operate on retransmission for PU's failed packet. If PU's packet from PT to PR is failed while SU listens PU's transmission, the unsuccessful packet is retransmitted either by one of the SU's nodes or by node PT. However, the new packet is transmitted from PT to PR in underlay mode, if PU's packet is successes.

To observe the effects of permitted retransmission number on the successful packet rate of PU and improve PU's QoS, retransmission number is taken equal to 2 and 3 respectively for both proposed protocols, on the other hand retransmission number is taken equal to 2 for reference schemes to make comparison with the proposed protocols' throughputs.

To sum up, PU's throughput in the proposed protocols is worse than the cooperation-only scheme and is better than the underlay-only scheme, as expected. PU in the proposed protocol for DF operates in underlay mode for attempting PU's

and SU's transmission at the same time in very low SNR region, where SU has a good performance. SU's throughput starts decreasing at some level of SNR for which PU operates in cooperative mode by the assistance of SU; however, SU's throughput becomes stable with increasing SNR values. Similarly, PU in the proposed protocol for AF operates in cooperative mode in very low SNR region, so SU's has no performance. SU's performance that is as good as the proposed protocol for DF is observed with increasing SNR values. Because of this characteristic way of work, PU's throughput is decreased in high SNR region while, it is better than the non-CR scheme in low SNR region. Both of the proposed protocols stabilize the SU's throughput that is near 40 % with a certain sacrifice about 15 % in PU's throughput at high SNR region.

PU's performance in the proposed protocol for DF is a little higher compared with that for AF in low SNR region while SU's throughput is different for both protocols only in very low SNR region. It is observed that the performances are equivalent for both protocols with increasing SNR values. Since the cooperation modes in DF protocol are higher than that of AF protocol, SU's performance is worse in DF protocol compared to that of AF protocol, at low SNR region.

For both protocols, effects of the system parameter on PU's and S's performance are investigated. Increasing achievable rate R_s for SU lead to decrease the SU's performance while PU's performance is not affected. Similarly, the SU's performance gets worse if the distance d_s between the nodes S1 and S2 is increased. SU's power P_s is limited for a certain value of the interference threshold which is taken as the difference between PU's power P_p and P_s to protect the PU's channel quality in the underlay mode. SU's performance is decreased; conversely PU's performance gets better with increasing values of the interference threshold.

Both of the proposed protocols are compared with two protocols given in the literature. One of them prioritizes PU's performance while the other prioritizes SU's performance. PU's performance for the proposed protocols is better than that of reference protocol which prioritizes the PU's performance thanks to higher amount of cooperation mode in low SNR region. With the increasing SNR values, both proposed protocols operate in underlay mode where PU have some degradation in its performance and have a throughput near 70%. SU cooperates with PU in low SNR region where SU's performance is worse than that of the reference protocol which prioritizes the PU's performance. In relation to that, SU's throughput is maintained at a certain level in high SNR region where SU's throughput goes to zero in the reference protocol which prioritizes the PU's performance. SU's throughput for both proposed protocols is worse than that of reference protocol which prioritizes the SU's performance as expected. In low SNR region, PU's performance for both of the proposed protocols is worse than that of the reference protocol which prioritizes the SU's performance. However, PU's performance declines rapidly and goes to zero for the reference protocol which prioritizes the SU's performance with increasing SNR value where PU's throughput for both of the proposed protocols has throughput performance of about 70%.



1. GİRİŞ

1.1 Konu ile İlgili Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Günümüzde telsiz iletişimde bilişsel radyo üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Önceleri daha çok spektrum sezmeyle dayalı çalışmalar yapılırken son zamanlarda spektrum paylaşmaya yönelik çalışmaların sayısı artmaktadır.

Literatürde, spektrum paylaşımı bilişsel radyo ağı çalışmalarında SU'nun başarımını iyileştirmek için farklı sayıda röle kullanılarak modeller oluşturulmuştur [1,2]. SU'nun paketini iletebilmesi için birden fazla röle kullanılmış ve spektrum paylaşımı yapıda PU ve SU'nun servis kesilme olasılıkları hesaplanmıştır. Röle sayısının artması SU'nun başarımını artırırken, PU'nun başarımından da taviz verilmemiştir [1]. Benzer şekilde SU'nun düğümleri arasındaki röleler ile PU tarafından izin verilen girişim gücünü geçmeyecek şekilde PU'nun frekans bandından maksimum oranda faydalanmak amaçlanmıştır [2].

PU ve SU düğümlerinden oluşan bir kısım spektrum paylaşımı bilişsel radyo ağlarında ise ARQ tabanlı PU'lar kullanılmış ve SU'nun oluşturduğu girişim etkisi ile azalan başarımın artması sağlanmıştır. Literatürde, ARQ tabanlı PU kullanılan bazı bilişsel radyo çalışmaları mevcuttur [3–10]. SU ve ARQ tabanlı PU'dan oluşan bir bilişsel radyo ağı ele alınmıştır. İletim protokolü SU'nun röle gibi davranıp PU'nun paketini ilettiği işbirliği durumundan ve PU'nun paket başarımını izleyip spektruma erişim kararı verdiği erişim durumlarından oluşmaktadır. SU, işbirlikli durumda topladığı krediler ile erişim durumunda kendi paketini iletmeye hak kazanmaktadır. Erişim durumunda ilettiği her paket de ceza olarak sayılmaktadır. Böylece SU'nun kredi/ceza yöntemiyle spektrumu kullanması sağlanmıştır [3]. Bir diğer çalışmada fırsatçı bir yaklaşımla spektrum paylaşım protokolü önerilmiş, PU ve SU başarımları incelenmiştir. SU, PU'nun ARQ geri bildirimlerini dinleyerek PU'nun iletim kanalının durumunu öğrenmektedir. SU'nun amacı, PU ile aynı anda spektrumu kullandığı ve yalnız kendi işaretini ilettiği altına sermeli durumlardaki paket iletiminin PU'nun

verimine etkisini en az düzeyde tutabilmektir [4]. PU'nun veriminden az bir kayıpla SU'nun verimini arttırmak amacıyla bir bilişsel radyo yapısı önerilmiştir. PU'nun başarımında sınırlı bir kayıpla SU kendi başarımını arttırmayı hedeflemiştir [5]. Farklı olarak PU'nun verimini arttırmak amacıyla fiziksel katmanda uyarlamalı kodlama ve kipleme tekniği uygulanmıştır [6]. Literatürdeki çalışmaların bir kısmında ise bazı girişim yok etme yöntemleri ile spektrum verimi arttırmayı amaçlamıştır [7–9]. SU ve ARQ tabanlı PU'nun oluşturduğu bilişsel ağda PU ve SU'nun birlikte çalıştıkları durumda başarımları karşılaştırılmıştır. SU'nun alıcısında bir ARQ penceresi boyunca geriye doğru girişim yok etme (*backward interference cancellation*) uygulanmış ve her iki kullanıcı için de servis kesilme olasılıkları azaltılmıştır [7]. SU işbirlikli çalışarak PU'nun verimini iyileştirirken, girişim azaltma yöntemiyle de altına sermeli çalışmaktadır. PU'nun paketi en fazla iki iletim hakkına sahiptir. Birinci iletimde sistem altına sermeli çalışmaktadır ve SU, PU'nun girişimini yok etmek için PU'nun işaretini çözmeye çalışmaktadır. Yeniden iletim hakkında ise SU, PU'nun oluşturduğu girişimi yok ederek ARQ geri bildirimine göre kendi işaretini iletmekte ya da PU'nun işaretini iletmektedir [8]. Bilişsel radyo ağlarında SU'nun veri iletim hızını arttırmak için fırsatçı bir girişim yok etme yöntemi önerilmiştir. Aynı zamanda önerilen analitik model ile SU'nun varlığında spektrum kullanımındaki değişim spektral verimlilik açısından analiz edilmiştir [9]. Üç farklı röle seçim tekniği ile altına sermeli bilişsel radyo ağlarında işbirlikli ARQ protokolleri geliştirilmiştir. Seçilen röleler SU'nun iletimine yardımcı olurken, PU'nun servis kalitesini korumak amacıyla SU iletimini belli girişim kısıtı altında yapmaktadır [10].

1.2 Tezin Konuya Katkıları

Bu tezde altına sermeli bilişsel radyo ağları için işbirlikli iki iletim protokolü önerilmiştir. ARQ tabanlı PU ve çift yönlü iletim kurabilen SU düğümlerinin oluşturduğu altına sermeli bir bilişsel radyo ağında SU'nun röle işlevini çöz-ve-aktar (DF) ve kuvvetlendir-ve-aktar (AF) tekniğine dayanarak gerçekleştirmesine bağlı olarak iki farklı iletim protokolü ele alınmıştır. İlk olarak bölüm 5'te anlatılan DF tekniği için bir protokol önerilmiştir. Bu protokolda PU'nun paketinin iletimi için gereken yinleme sayısının 2 olduğu ve 3 olduğu durumlar için ayrı ayrı PU ve SU'nun başarım değerlendirmeleri yapılmıştır. DF tekniği için önerilen protokolün,

SU'nun olmadığı, yalnız işbirlikli çalışan ve yalnız altına sermeli çalışan modeller ile PU başarımları karşılaştırılmıştır. Sonrasında bölüm 6'da AF tekniği için bir protokol önerilmiş ve PU başarımlarını karşılaştırabilmek için bölüm 5'tekine benzer şekilde 3 referans model oluşturulmuştur. PU'nun paketinin iletimi için 2 ve 3 yineleme sayılarında PU ve SU'nun başarımları değerlendirilmiş ve referans modeller ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra bölüm 7'de her iki teknik için önerilen protokollerin PU ve SU verimleri karşılaştırılıp birbirine olan üstünlükleri değerlendirilmiştir. Elde edilen teorik sonuçlar bilgisayar benzetimleriyle desteklenmiştir. Ayrıca bu iki teknik için önerilen protokollerin literatürde var olan Li ve diğ. (2012) ve Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmalarında önerilen protokollerle PU ve SU başarımları açısından karşılaştırması yapılmıştır [3, 4]. Sonuçlar bölüm 8'de verilmiştir.

Bu tezde önerilen her iki protokolde de PU'nun paketi tek başına PU'nun vericisinden iletebilirken, işbirlikli durumda SU düğümlerinin en az birinden iletebilir. Ayrıca altına sermeli durumlarda da SU'nun girişimi altında iken PU'nun vericisinden iletelebilmektedir. Altına sermeli durumlarda PU'nun olumsuz etkilenen paket başarımları işbirlikli durumlar ile iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte SU'ya altına sermeli durumlarda spektrumu kendi paketini iletmek için kullanma olanağı verilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki yineleme sayısı 2 alındığında her iki protokolde de, P_p/N_0 PU'nun vericisi için işaret gürültü oranı olmak üzere, $SNR = P_p/N_0$ alındığında düşük SNR değerlerinde PU'nun verimi işbirlikli durumlar sayesinde ikincil kullanıcı olmayan klasik modele göre daha iyi olmaktadır. Yüksek SNR değerlerinde ise yine her iki protokolde de PU'nun verimi altına sermeli durumlar yüzünden %15 kadar kötüleşmiştir. Ancak yüksek SNR'lerde PU'nun verimindeki bu kayıp aynı SNR değerlerinde SU'nun başarımlarını yaklaşık %40 artırmıştır. Yineleme sayısının 3 olması PU'nun başarımlarını her iki protokolde de az da olsa olumsuz etkilemesine rağmen başarımlar oranları değişmemiştir. Sonuçta DF ve AF teknikleri için önerilen protokollerde düşük SNR değerlerinde PU başarımları büyük ölçüde artarken, yüksek SNR değerlerinde SU başarımları belli bir düzeyde tutulmuştur. Li ve diğ. (2012) ve Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmaları dikkate alınarak yapılan karşılaştırmalarda ise P_t/N_0 PU ve SU'nun toplam işaret gürültü oranı olmak üzere, PU ve SU'nun $SNR = P_t/N_0$ 'a bağlı verimleri elde edilmiştir. Artan $SNR = P_t/N_0$ 'la birlikte PU'nun başarımları Li ve diğ. (2012) çalışmasına göre bir miktar daha kötü iken SU başarımları

aynı değerlerde daha iyileşmiştir. Nosratinia ve diğ. (2010) alışmasında PU verimi sıfıra yaklaşırken, SU verimi %50 civarındadır. Önerilen protokollerde yüksek $SNR = P_t/N_0$ değerlerinde SU verimleri Nosratinia ve diğ. (2010) alışmasından biraz daha kötüyken, PU verimleri aynı çalışmaya göre çok daha iyi elde edilmiştir.



2. TELSİZ İLETİŞİM KANALLARININ ÖZELLİKLERİ VE OTOMATİK YİNELEME İSTEME MEKANİZMASI

Bu bölümde telsiz iletişim kanallarının özelliklerinden bahsedilip, işbirlikli iletişim ile ilgili bilgiler verilecektir. Sonrasında telsiz iletişim kanallarında kullanılan hata kontrol mekanizması olan otomatik yinemele isteme yöntemi anlatılacaktır.

2.1 Telsiz İletişim Kanalları

Son yıllarda iletişim endüstrisindeki en önemli araştırma alanlarından biri de telsiz iletişimidir. Önceleri uydu haberleşmelerinde ve karasal yayınlarda kullanılan telsiz iletişim, günümüzde çoğunlukla hücresel iletişim ağlarında ve kişisel iletişim sistemlerinde kullanılmaktadır.

Telsiz ağların tasarımı, doğası gereği kablolu ağların tasarımına kıyasla daha farklıdır. İlk olarak, fazla sayıdaki farklı uygulamalar ve sistemler için kullanılan spektrum kısıtlıdır. Bunun için gerek bölgesel gerekse küresel olarak farklı spektrum kullanma ve yönetme teknikleri geliştirilmektedir. Temelde telsiz iletişim sistemleri alıcı verici yapılarından oluşmaktadır. Alıcı ile vericiyi birlikte içine alan ortam ise kanal olarak adlandırılmaktadır.

Denklem (2.1)'de bütün iletim kanallarında işaret-gürültü oranı ($SNR = S/N$) eşit kabul edildiğinde, alıcı ve verici düğümlerinden oluşan herhangi bir iletim ortamında i alıcı düğümü ile j verici düğümü arasındaki kanalda, kanal sönmleme katsayısına (h_{ij}) bağlı ve W band genişliği ile normalize edilmiş olan maksimum kanal kapasitesi C [bit/sn/Hz],

$$C(h_{ij}) = \log_2\left(1 + |h_{ij}|^2 \frac{S}{N}\right) \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir [11].

Kanal sönümlenme katsayılarının karmaşık Gauss dağılımlı olduğu varsayımı altında kanal sönümlenme katsayılarının genliğinin karesi ($|h_{ij}|^2$), λ_{ij} parametresi ile üstel dağılımlıdır. Buna göre $|h_{ij}|^2$ 'nin PDF'si (*Probability Density Function*)

$$f(x) = \lambda_{ij}e^{-\lambda_{ij}x}, \quad x > 0 \quad (2.2)$$

denklem (2.2)'deki hesaplanır [11].

i alıcı düğümü ile j verici düğümü arasındaki istenen hız R [bit/sn/Hz] ile gösterilirse, R_{ij} 'nin maksimum erişilebilir hızın üzerine çıkması servis kesilmesi olarak adlandırılır. Buna göre servis kesilme olasılığı denklem (2.3)'teki gibi,

$$\begin{aligned} P_{out} &= Pr(C(h_{ij}) < R) \\ &= Pr(|h_{ij}|^2 < \frac{2^R - 1}{S/N}) \\ &= \int_0^{\frac{2^R - 1}{S/N}} \lambda_{ij}e^{-\lambda_{ij}x} dx \\ &= -e^{\lambda_{ij}x} \Big|_0^{\frac{2^R - 1}{S/N}} \\ &= 1 - \exp\left(-\lambda_{ij} \frac{2^R - 1}{S/N}\right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

olarak gösterilir.

Güvenilir ve kaliteli bir iletişim için telsiz kanalların ayırt edici özelliklerini bilmek ve anlamak gereklidir. Telsiz iletişim kanalları yol kaybı (*path loss*), gölgeleme (*shadowing*), sönümlenme (*fading*) gibi bozucu etkilere maruz kalmaktadır [12].

2.1.1 Yol kaybı

Yol kaybı, verici ve alıcı arasındaki mesafeye bağlı olarak verici tarafındaki işaretin gücünün dağılmasıdır [13]. d_0 verilen bir referans uzaklık ve $P_r(d_0)$ alınan işaretin d_0 uzaklığındaki gücü olmak üzere d uzaklığında alınan işaretin gücü $P_r(d)$

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right)^v \quad (2.4)$$

denklem (2.4)'te olduğu gibi yazılmaktadır [13].

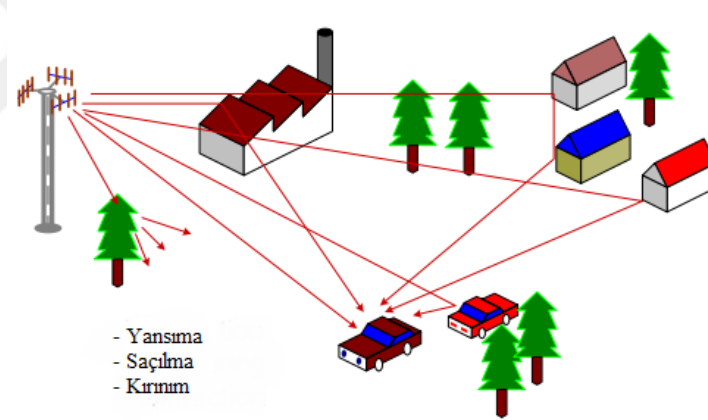
Çizelge 2.1 : Farklı ortamlar için yol kaybı sabitleri.

Ortam	Yol kaybı sabiti, ν
Boş uzay	2
Kentsel alan	2.7-3.5
İç mekan	4-6

Burada ν yol kaybı sabitidir. ν kanalın özelliklerine göre değişim göstermektedir. Çizelge 2.1’de farklı ortamlar için yol kaybı sabitleri gösterilmektedir [12]. Ortam yoğunluğu arttıkça yol kaybı artmaktadır. Böylece işaretin alıcı tarafa ulaşması güçleşmektedir.

2.1.2 Gölgeleme

Gölgeleme, verici ile alıcı arasındaki engeller yüzünden işaret gücünün yansıma (*reflection*), saçılma (*scattering*) ve kırınım (*diffraction*) gibi bozucu etkiler yüzünden zayıflamasıdır [13].



Şekil 2.1 : Alıcı ve verici arasındaki çok yollu yayılım.

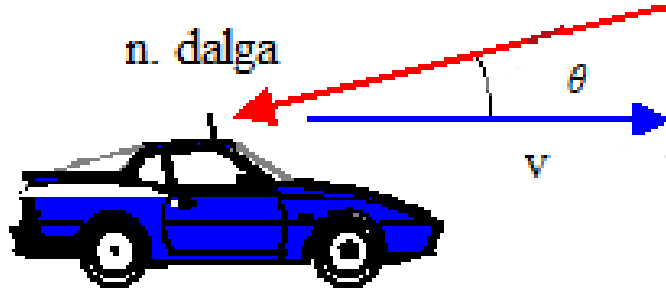
Şekil 2.1’de alıcı ve verici arasındaki farklı yollar gösterilmektedir. Vericiden gönderilen işaret hiçbir engelle takılmadan doğrudan görüş hattı (*Line-of-Sight-LoS*) yolu ile alıcı tarafa ulaşabildiği gibi, işaretin dalga boyundan çok daha büyük cisimlere çarpıp yansırarak, işaretin dalga boyundan küçük cisimlere ya da pürüzlü yüzeylere çarpıp saçılarak veya keskin yüzeylere çarpıp kırılarak alıcı tarafa ulaşabilmektedir. Bu durum çok yollu yayılım (*multipath propagation*) olarak adlandırılmaktadır [13]. $r(t)$ alıcı taraftaki işaretin zamana bağlı ifadesi olmak üzere, bu işaret yol kaybı ve gölgeleme etkisi altındayken matematiksel olarak

$$r(t) = A_0g(t)s(t) \quad (2.5)$$

denklem (2.5)'teki gibi modellenmektedir [11]. Burada, A_0 ortalama yol kaybını göstermekte olup, $s(t)$ gönderilen işareti ve $g(t)$ de gölgeleme etkisini gösteren rastgele süreçlerdir.

2.1.3 Sönümlenme

Vericinin gönderdiği işaret, çok yollu yayılım sonucunda genliğinde ve fazında kaymalar oluşmuş şekilde alıcıda elde edilmektedir. Bu durumda alıcıdaki işaretle çok yollu sönümlenme olarak adlandırılan dalgalanmalar oluşturmaktadır [11]. Çok yollu yayılım gecikme yayılımı (*delay spread*) ve Doppler yayılımı (*Doppler spread*) olmak üzere iki farklı şekilde oluşmaktadır. Çoklu yol yayılımı sonucunda gönderilen işaretin alıcıya ulaşabilmesi için gereken zaman artar. İşaretin böyle bir gecikmeye maruz kalması da gecikme yayılımı olarak adlandırılmaktadır. Alıcı ya da vericinin hareketi alınan işaretin frekansında ötelenmelere neden olur.



Şekil 2.2 : Doppler kayması.

Doppler kayması olarak adlandırılan bu durum Şekil 2.2'de gösterilmektedir. v hızı ile hareket eden araca gelen n . dalganın frekansında kayma meydana gelir. f_d Doppler frekansı, θ işaretin gelme açısı ve λ işaretin dalga boyu olmak üzere,

$$f_d = v \left(\frac{\cos \theta}{\lambda} \right) \quad (2.6)$$

denklem (2.6)'daki gibi hesaplanmaktadır [13].

2.2 İşbirlikli Çeşitleme

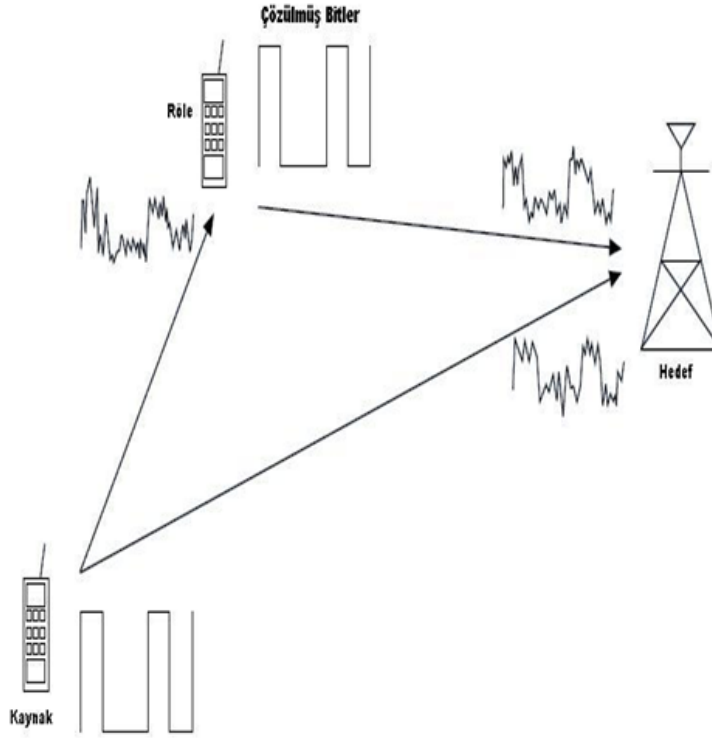
Telsiz iletişimde bir önceki bölümde anlatılan kanalın bozucu etkilerini azaltmak için kullanılan en önemli tekniklerden biri işbirlikli çeşitlemedir. İşbirlikli çeşitlemede alıcı ve verici düğümleri arasında röle olarak adlandırılan komşu düğümlerin olması telsiz ağların doğasında olan anten çeşitlemesini sağlamaktadır. Böylece düğümlerde fiziksel anten kullanmak yerine röle kullanarak anten çeşitleme kazancı elde edilir. İşbirlikli çeşitlemeden ilk olarak Laneman vd. çalışmasında bahsedilmiştir [14]. İşbirlikli çeşitlemede gönderilen işaretin doğrudan ve bir veya birden fazla röle üzerinden alıcıya ulaşması sonucu verici çeşitlemesi sağlanmaktadır [14, 15]. Cover ve El Gamal'ın röleli kanalların sığıası üzerine olan çalışmaları işbirlikli çeşitlemenin temelini oluşturmaktadır [16]. Laneman ve vd. farklı tekniklerle röle kullanımını incelemiş ve farklı algoritmalar kullanarak başarımlarını analizlerini gerçekleştirmiştir [17, 18]. Janani vd. çalışmalarında kodlama yoluyla işbirlikli çeşitleme kavramından bahsetmişlerdir [19]. Ahlswede vd. ise ağ kodlamasının işbirlikli iletişimdeki önemi vurgulanmıştır [20].

Çeşitleme, aynı işaretin birden fazla bağımsız sönümlenmeli kanaldan iletilmesi durumunda, tüm kanallarda derin sönümlenmeye uğrama olasılığının düşük olacağı ilkesine dayanmaktadır. İşbirlikli çeşitlemede rölenin aldığı paketi hedefe iletilmesine bağlı olarak iki temel işbirlikli çeşitleme tekniği vardır: Çöz-ve-aktar (*Decode and Forward-DF*) ile kuvvetlendir-ve-aktar (*Amplify and Forward-AF*).

2.2.1 Çöz-ve-aktar

DF tekniğinde, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi röle vericiden gelen işareti önce çözüp sonra yeniden kodlayıp alıcıya göndermektedir. Sadece fiziksel katmanda iş yapıldığı için AF tekniğine göre maliyeti ve karmaşıklığı daha azdır. Laneman vd. çalışmalarında DF tekniğinin başarımlarını analizleri yapılmıştır [14, 17]. Bir başka çalışmada ise Rayleigh sönümlenmeli ve iki atlamalı sistemde düşük $SNR = P_p/N_0$ değerlerinde DF tekniğinin başarımlarının daha iyi olduğunu gösterilmiştir [21]. Şekil 2.3'te gösterilen kaynaktan aktarılan işaret olmak üzere x_s , rölede

$$y_r = h_{sr}x_s + n_r \quad (2.7)$$



Şekil 2.3 : Çöz-ve-aktar tekniği ile işaretin iletimi.

denklem (2.7) ile gösterilen işaret alınır. Burada h_{sr} kaynak ile röle arasındaki sönuMLEME katsayısı ve n_r röledeki toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) terimidir. Buna göre DF tekniğiyle çalışan rölede

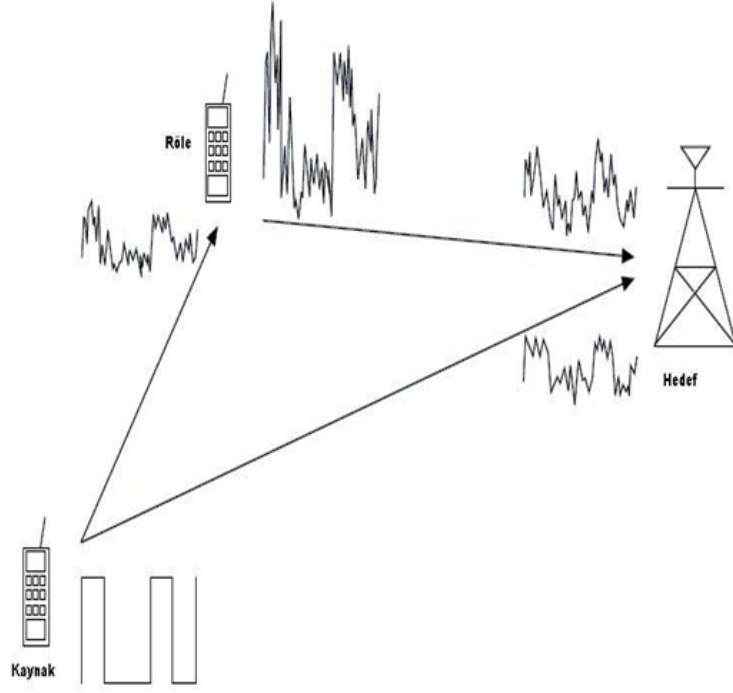
$$\hat{x} = \underset{x_s}{\operatorname{argmin}} \left| y_r - h_{sr} x_s \right|^2 \quad (2.8)$$

denklem (2.8)'deki gibi karar verilmektedir. Karar verilen işaret \hat{x} hedefe gönderilir.

DF tekniğinde paket kodlanarak gönderildiği için daha güvenli bir iletimdir ancak gönderilen işarettten gürültü ve girişim temizlendiği için AF tekniğine göre daha yavaştır.

2.2.2 Kuvvetlendir-ve-aktar

AF tekniğinde Şekil 2.4'te iki alıcı ve verici düğümünden ile bir röleden oluşan ağ yapısı gösterilmiştir. Röle vericiden gelen işareti çözmeksizin, kuvvetlendirerek doğrudan alıcıya iletmektedir [17]. Bu durumda işaretin gürültüsünün de yükseltilmesi bir dezavantajdır. DF tekniğine göre daha hızlı olduğu için gecikmenin göz ardı edilemez olduğu durumlarda AF tekniği kullanılır.



Şekil 2.4 : Kuvvetlendir-ve-aktar tekniği ile işaretin iletimi.

Kanal boyunca zayıflayan işaret röleye ulaştığında tekrar iletilmeden önce kuvvetlendirilmektedir. x_s kaynaktan röleye gelen işaret olmak üzere, röleye gelen işaretin gücü

$$\begin{aligned} E[|y_r|^2] &= E[|h_{sr}|^2]E[|x_s|^2] + E[|n_r|^2] \\ &= |h_{sr}|^2 P + N_0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

denklem (2.9)'daki gibi yazılabilir. h_{sr} kaynak ile röle arasındaki kanal katsayısı, n_r röledeki gürültü terimi ve $E[.]$ beklenen değer operatörüdür. Rölede bir karar mekanizması yoktur ve tipik olarak denklem (2.10)'daki

$$G = \sqrt{\frac{P}{P|h_{sr}|^2 + N_0}} \quad (2.10)$$

gücü ile kaynaktan aldığı işareti hedefe iletir. Burada P alınan işaretin gücüdür. AF protokolünün kullanıldığı bazı çalışmalarda kanal durum bilgisine (Channel State Information-CSI) bağlı denklem (2.10)'daki gibi bir kuvvetlendirme kazancı kullanılıp sistem başarımı analiz edilmiştir [21–23]. Bir başka çalışmada ise sistem

karmaşıklığının daha az olduğu sabit kuvvetlendirme kazancı kullanılarak sistem başarımı incelenmiştir [24].

2.3 Otomatik Yineleme İsteme

Otomatik yineleme isteme (*Automatic Repeat Request-ARQ*) hatalı alınmış bir paketin tekrar iletiminden sorumlu olan bir hata denetim algoritmasıdır [13]. Alıcı gelen paketin bir ya da daha fazla bitinde hata sezerse bu paketi göz ardı edip, vericiyi aynı paketi tekrar iletmesi için bilgilendirmektedir. Alıcı eğer paketi başarılı alırsa alındı onayı (ACK) ve hatalı alırsa da alındı reddi (NACK) geri bildirimleri ile vericiyi bilgilendirir. ARQ, bilişsel radyo ağlarında sıkça kullanılan bir protokoldür [3,4,6,10,25]. Yaygın olarak kullanılan üç farklı ARQ modelinden söz edilebilir:

- Dur ve Bekle (Stop and Wait)
- N 'ye Geri Dön (Go-Back N)
- Seçmeli Yeniden İletim (Selective Repeat)

Dur ve Bekle ARQ modellerinde verici bir paket gönderir ve ACK almak için bir zamanlayıcı başlatır. Paket başarılı iletildiyse, alıcı ACK gönderir ve verici ikinci paketi gönderir. Eğer paket hatalı iletildiyse alıcı ACK göndermez. Vericinin ACK beklemek için başlattığı zaman dolunca verici paketin başarılı iletmediğini anlar ve aynı paketi yeniden gönderir.

N 'ye Geri Dön ARQ modelinde ise vericinin göndereceği paket sayısı bellidir. Birinci gönderdiği paket alıcıda hatasız alınırsa, alıcı ACK gönderir. Bu süreç alıcıda başarısız alınan bir paket olana kadar devam eder. N . paket başarısız alınırsa o paket ve devamındaki paketler göz ardı edilip süreç tamamlanır. Sonrasında N . pakete geri dönülüp N . paket ve devamındaki paketlerin yeniden iletimi yapılır.

Yüksek hata oranlarına sahip kanallarda N 'ye Geri Dön ARQ modelini kullanmak dezavantajlıdır. Çünkü hatalı paket ve devamındaki paketlerin yeniden iletimi söz konusudur. Seçmeli Yeniden İletim ARQ modeli hata oranı yüksek kanallarda kullanılmak için idealdir. Alıcıda başarılı olan her paketten sonra ACK gönderilirken, sadece başarısız olan paketler için NACK gönderilir. Verici NACK aldığı anda aynı

paketi yeniden iletir ve süreç devam eder. Seçmeli Yeniden İletim ARQ yeniden göndermeyi azalttığı için diğer modellere göre daha avantajlıdır ancak alıcı ve vericide karmaşık yapılar gerektirmektedir.

Bu çalışmada alıcı ve verici düğümler arasındaki paket iletimini denetlemek için Dur ve Bekle ARQ kullanılmıştır. Başarısız alınan her paket için alıcı NACK göndermiş ve paketin yeniden iletimini beklemiştir. Farklı yeniden iletim sayılarında önerilen protokollerin çalışması gözlenmiş ve vericiye ulaşan ACK ve NACK oranlarına bağlı olarak verim analizleri yapılmıştır.

Verim, iki düğüm arasındaki kanalın servis kesilme olasılığı ve her yeniden iletim durumunda başarılı iletilen paketlerin toplam iletilen paketlere oranı olmak üzere

$$\eta = (1 - P_{out}) \frac{L_s}{L} \quad (2.11)$$

denklem (2.11)'deki gibi ifade edilebilir. Burada P_{out} kanalın servis kesilme olasılığı, L_s alıcıdan gönderilen ACK sayısı ve L alıcıdan gönderilen toplam ACK ve NACK sayısıdır.



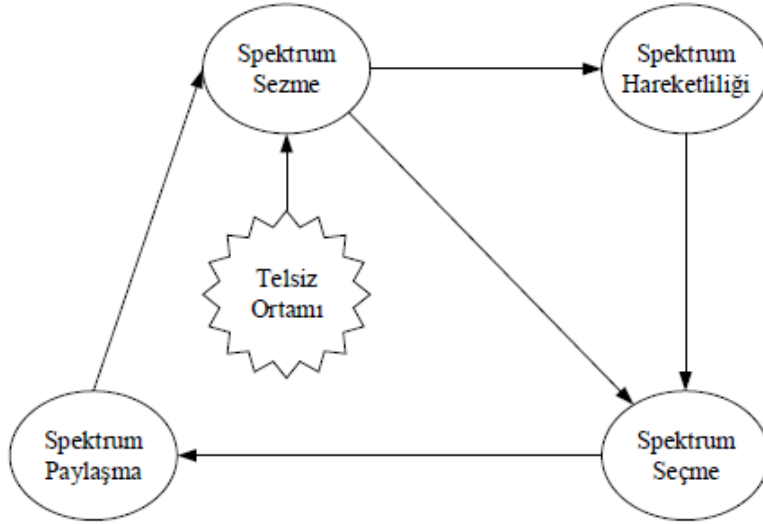
3. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI

Bu bölümde bilişsel radyo kavramı açıklanacak ve bilişsel radyo ağlarının temeli ve günümüze kadar olan çalışmalar hakkında bilgi verilecektir.

Son yıllarda gerek askeri gerekse kamusal alanda telsiz iletişim sistemlerinin kullanımında artış gözlenmektedir. Telsiz uygulamalara olan gereksinim ve buna bağlı olarak artan kullanıcı sayısı mevcut frekans spektrumunun yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Ancak yapılan araştırmalar bu sorunun frekans spektrumunun yetersizliğinden değil spektrumun verimli kullanılmamasından dolayı olduğunu göstermektedir [26]. Spektrumun dinamik olarak sezilmesini ve var olan spektrumun daha verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla Bilişsel Radyo (*Cognitive Radyo-CR*) kavramı geliştirilmiştir.

Bilişsel radyo ağları birincil ağ (*primary network*) ve ikincil ağlardan (*secondary network*) oluşmaktadır. Birincil ağa ait olan birincil kullanıcılar (*primary users-PU*) spektrum bantlarına erişim için lisansa sahipken, ikincil ağa ait olan ikincil kullanıcıların (*secondary users-SU*) lisansı yoktur. Bu nedenle ikincil kullanıcılar spektrumunu kullanabilmek için Şekil 3.1'deki bilişsel çevrimde (*cognitive cycle*) gösterildiği gibi spectrum sezme (*spectrum sensing*), spectrum seçme (*spectrum decision*), spectrum paylaşma (*spectrum sharing*) ve spectrum hareketliliği (*spectrum mobility*) işlevlerine ihtiyaç duymaktadır.

Bilişsel çevrim spectrum sezme süreci ile başlamaktadır. İkincil kullanıcı spectrum boşlukları olarak adlandırılan uygun spectrum bantlarını sezer. Birden fazla sezilen spectrum boşlukları arasından servis kalitesine göre uygun olana karar verir. Buna spectrum seçme denir. Birden fazla ikincil kullanıcının aynı spectrumu kullanmaya çalışması sonucu oluşan çakışma spectrum paylaşma ile önlenir. PU bir spectrum boşluğunu kullanmaya başladığında SU uygun olan başka bir boşluk sezer ve oraya hareket eder. Buna da spectrum hareketliliği denir.

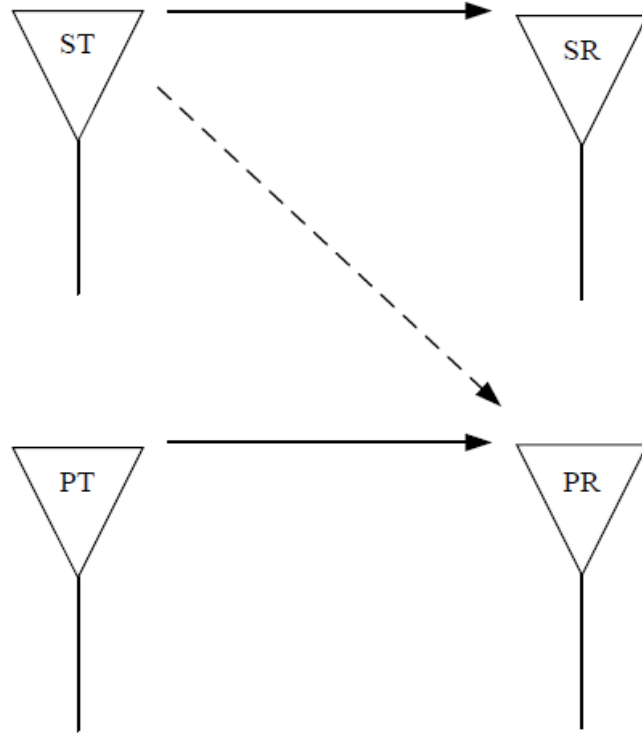


Şekil 3.1 : Bilişsel çevrim.

Bilişsel radyo uygulamalarında birincil ve ikincil kullanıcılar telsiz bir ağdaki aynı spektrumu kullanırlar. Birincil kullanıcı hücreli (*cellular*) ya da geçici (*ad hoc*) olabilirken, ikincil kullanıcı genellikle geçicidir. Bilişsel radyo ağlarında ikincil kullanıcılar spektruma erişmek için üç farklı yaklaşım kullanabilir: altına serme (*underlay*), üstüne serme (*overlay*), araya yerleştirme (*interweave*) [13].

3.1 Altına Serme Yaklaşımı

Şekil 3.2’de gösterilen altına sermeli bilişsel radyo ağ modelinde, PT ve ST sırasıyla PU ve SU’nun verici düğümlerini gösterirken, PR ve SR ise alıcı düğümlerini göstermektedir. Düz çizgiler bu düğümler arası iletimi, kesikli çizgi ise ST’nin iletiminin PR’de oluşturduğu girişimi belirtmektedir. PU ile SU’nun aynı anda spektrumu kullanması sonucu SU, PU’da girişim oluşturmaktadır. Altına sermeli bilişsel radyolarda SU’nun girişimi belli bir eşik değerin altında olacak şekilde PU ve SU aynı anda iletim yapmaktadırlar. Girişim eşik değerini belirlemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri olan yayılmış spektrum tekniği ile SU’nun işareti, geniş bir band aralığına yayılsın ve böylece zayıflasın diye bir yayılma kodu ile çoğullanmaktadır. Böylece SU’nun işaretinin birikimli dağılım yoğunluğu (*cumulative distribution function-CDF*) PU’nun gürültü CDF’sinin altında olur ve gürültü belli bir eşik değerin altında kaldığı sürece PU’nun iletimi girişimden etkilenmez. Aynı yayılma kodunun ikincil kullanıcının alıcısı tarafından kullanılması ile gönderilen



Şekil 3.2 : Altına serme yaklaşımı için bir model.

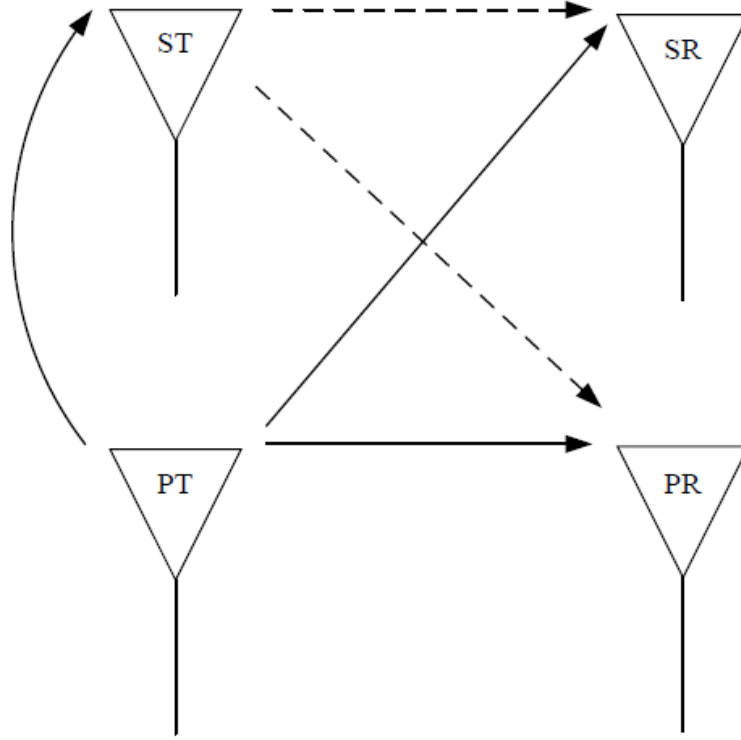
işaret elde edilir. Bir başka teknikte ise kısa mesafe iletişimi için SU'nun işaret gücünün ayarlanarak belli bir girişim eşik değerinin altında kalması sağlanır [27,28].

3.2 Üstüne Serme Yaklaşımı

Şekil 3.3'te birincil kullanıcı ve ikincil kullanıcı çiftlerinin oluşturduğu üstüne sermeli bilişsel radyo ağ modeli gösterilmektedir. Düğümler bir önceki bölümde belirtildiği gibidir. Üstüne sermeli bilişsel radyolarda SU, PU'dan gönderilen mesajları dinlemektedir. Bu mesajları ya PU'nun kendi alıcısında oluşturduğu girişimi önlemek için ya da PU'nun iletimine yardımcı olup servis kalitesini arttırmak amacıyla PU'nun alıcısına göndermek için kullanılmaktadır. İkinci durumda SU röle gibi davranarak gücünün bir kısmıyla kendi işaretini, kalanıyla da işbirliği yapıp PU'nun işaretini göndermektedir [29].

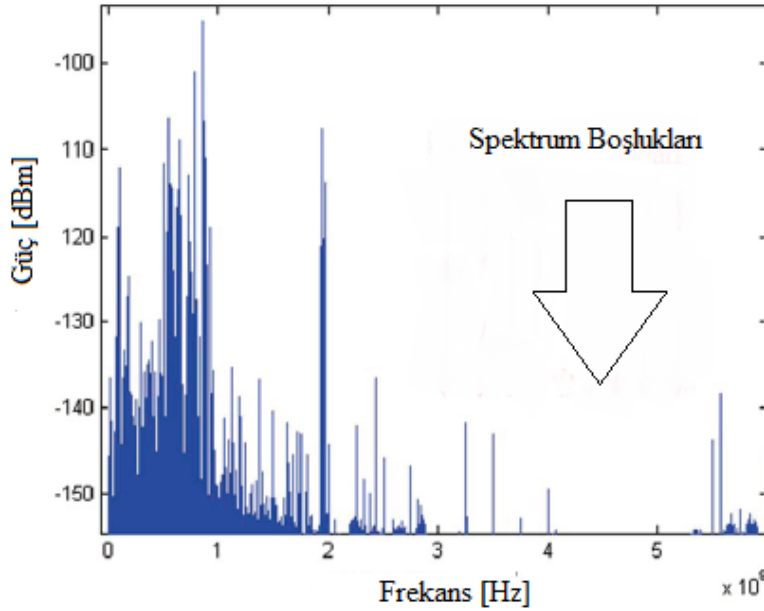
3.3 Araya Yerleştirme Yaklaşımı

Şekil 3.4 gün ortasında belli bir bölgeden alınan spektrum kullanım ölçümünü göstermektedir. Yoğunluğun az olduğu ve herhangi bir PU etkinliğinin olmadığı yerler



Şekil 3.3 : Üstüne serme yaklaşımı için bir model.

spektrum boşlukları olarak adlandırılmaktadır. Spektrum boşluklarının fazla olması spektrumun verimsiz kullanımına neden olmaktadır.



Şekil 3.4 : Spektral yoğunluk ölçümü [12].

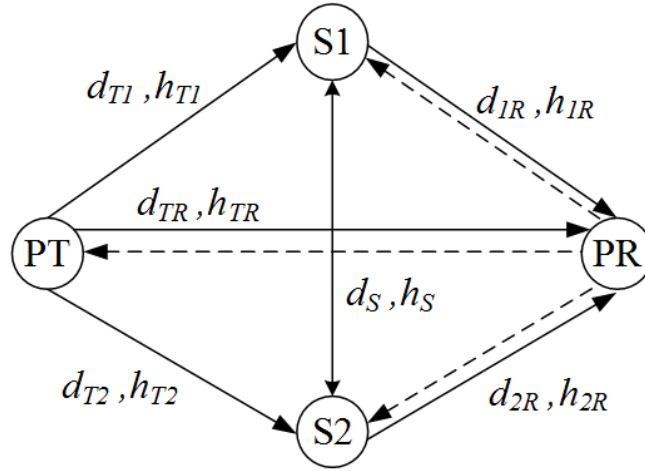
Bunun önüne geçmek için, araya yerleştirme yaklaşımında SU spektrumu periyodik olarak gözlemekte ve PU'nun zaman ve frekans bölgelerindeki etkinlikleri saptanmaktadır. Daha sonra PU'nun olmadığı durumda oluşan spektrum boşluklarını sezip bu boşluklara yerleşerek iletimi yapılmaktadır [30–32].





4. ALTINA SERMELİ BİLİŞSEL RADYO AĞ MODELİ

Bu bölümde, bu tezde ele alınan Otomatik Yineleme İsteme (ARQ) tabanlı PU ile çift yönlü iletişim kurabilen iki düğümden oluşan SU'nun oluşturduğu altına sermeli bilişsel radyonun sistem modeli tanıtılacaktır.



Şekil 4.1 : Ele alınan altına sermeli CRN modeli (Düz çizgiler düğümler arasındaki kanalları gösterirken kesikli çizgiler ACK/NACK geri bildirimlerini göstermektedir).

Şekil 4.1'de gösterilen bilişsel radyo ağ modeli, PT ve PR düğümlerinden oluşan ARQ tabanlı PU ile S1 ve S2 düğümlerinin oluşturduğu SU'dan oluşmaktadır. Bu modelde PT birincil kullanıcının verici düğümü, PR de birincil kullanıcının alıcı düğümüdür. S1 ve S2 düğümleri ise çift yönlü iletişim kurabilen ikincil kullanıcı düğümleridir. PT, PR, S1 ve S2 düğümlerinin her biri tek antenlidir. Şekil 4.1'de gösterilen bilişsel radyo ağ modeli kullanılarak önerilen altına sermeli bilişsel radyo protokollerinde PT'nin paketi üç farklı şekilde iletilebilmektedir. PT herhangi bir girişim olmadan paketini PR'ye iletir, PT paketini SU düğümlerinden birinin girişimi altında PR'ye iletir ya da PT'nin paketi S1/S2 düğümlerinin işbirliği ile PR'ye iletilir. PR düğümü de paketi başarılı alıp alamadığına bağlı olarak diğer düğümlere sırasıyla alındı onayı (ACK) ya da alındı reddi (NACK) mesajları göndermektedir.

Şekil 4.1'de gösterilen bilişsel radyo ağ modelinde $PT \rightarrow PR$, $PT \rightarrow S1$, $PT \rightarrow S2$, $S1 \rightarrow PR$, $S2 \rightarrow PR$ ve $S1 \leftrightarrow S2$ düğümleri arasındaki kanal sönmleme katsayıları

sırasıyla $h_{TR}, h_{T1}, h_{T2}, h_{1R}, h_{2R}, h_S$ ile gösterilmektedir. Kanal sönümlenme katsayıları istatistiksel bağımsız, sıfır ortalamalı ve sırasıyla $d_{TR}^{-\nu}, d_{T1}^{-\nu}, d_{T2}^{-\nu}, d_{1R}^{-\nu}, d_{2R}^{-\nu}, d_S^{-\nu}$ varyanslı karmaşık Gauss rastlantı değişkenleri ile modellenmektedir. $d_{TR}, d_{T1}, d_{T2}, d_{1R}, d_{2R}$ ve d_S değişkenleri düğümler arasındaki mesafeler olmak üzere, ν yol kaybı katsayısıdır. Kanal katsayılarının bir paket iletimi süresince değişmediği ve her kullanıcının kendisine ulaşan kanalların sönümlenme katsayılarını bildiği varsayılmaktadır.

$i = TR, T1, T2, 1R, 2R$ olmak üzere, kanal katsayısının genliğinin karesi $|h_i|^2$ kanal kazancıdır ve üstel dağılımlıdır. Kanal kazancının PDF'si (2.2)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

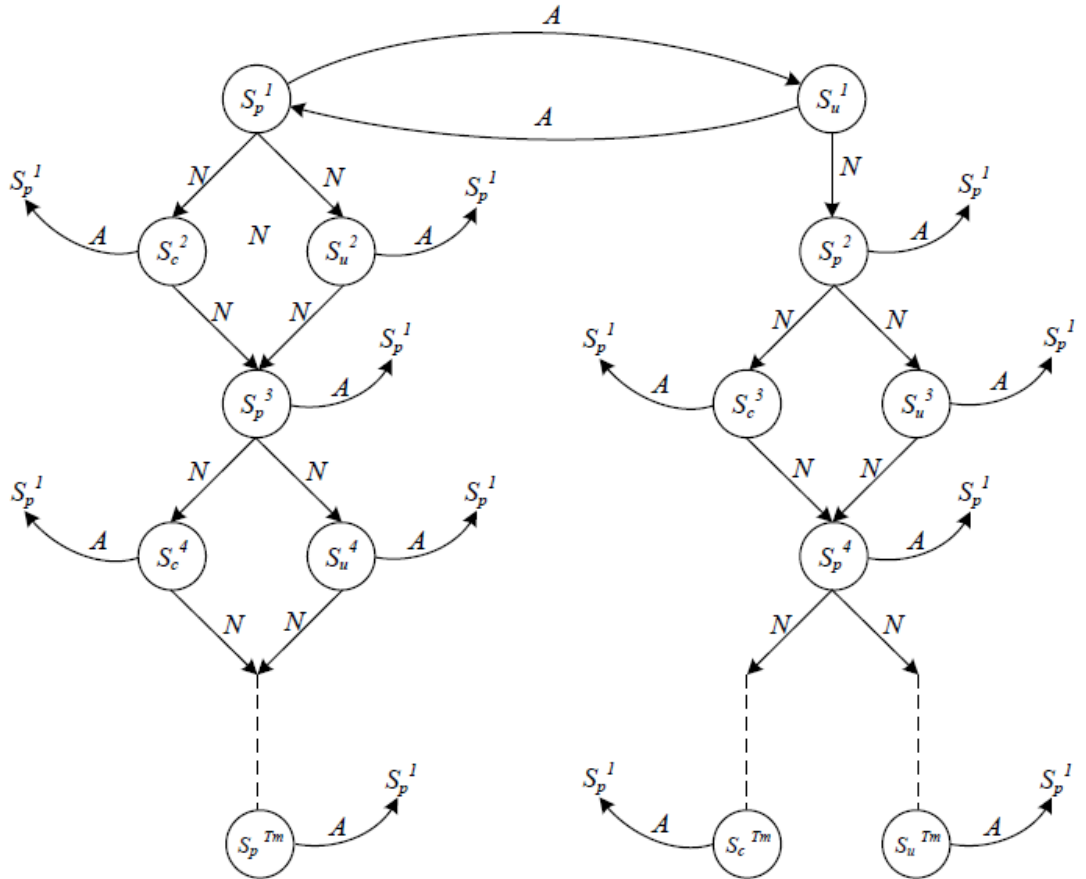
Bu çalışmada ayrıca PT'nin iletim gücü P_p , SU düğümlerinin her birinin iletim gücü ise P_s ile gösterilmektedir. Ayrıca PU için istenen hız R_p , SU için ise R_s 'dir. PR, S1 ve S2 alıcılarındaki gürültü örnekleri, sıfır ortalamalı ve N_0 varyanslı toplamsal Gauss gürültü örnekleridir (AGN).

Bu çalışmada işbirlikli iletim durumları için Şekil 4.1'de gösterilen altına sermeli bilişsel radyo ağı için çöz-ve-aktar ve kuvvetlendir-ve-aktar olmak üzere iki farklı aktarım yöntemi için iletim protokolleri önerilmiştir.

5. DF TEKNİĞİ İÇİN YENİ SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ

Bu bölümde, birincil kullanıcısı ARQ tabanlı, ikincil kullanıcısı DF tekniği ile işbirliği yapan altın sermeli bilişsel radyo ağı için yeni bir spektrum paylaşım protokolü önerilecektir. Birincil kullanıcının paketinin farklı yineleme sayıları ile iletildiği durumlar için birincil ve ikincil kullanıcıların servis kesilme olasılıkları ile verimleri hesaplanacak ve birincil kullanıcı için referans modellerle başarımlar karşılaştırmaları yapılacaktır.

5.1 DF Tekniği için Yeni Protokolün Tanımlanması



Şekil 5.1 : DF tekniği için önerilen yeni protokolün T_m yineleme sayısı için Markov zinciri.

T_m birincil kullanıcının paketinin başarılı iletimi için izin verilen maksimum yineleme sayısı olmak üzere, DF tekniği için önerilen protokolün $T \leq T_m$ yineleme sayısına

bağlı bağlı Markov zinciri Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Birincil kullanıcının paketi, tek başına PT’nin ilettiği durumda ($S_p^{T_m}$), altına sermeli durumda ($S_u^{T_m}$) ya da işbirlikli iletim durumunda ($S_c^{T_m}$) olmak üzere üç farklı durumda iletilmektedir. Tek başına PT’nin ilettiği durumlarda SU sessiz kalır ve PT’nin iletimini dinler. Altına sermeli durumda her bir kullanıcı spektrumu aynı anda kullanarak kendi paketlerini iletir. PU’nun servis kalitesini korumak amacıyla SU iletimini belli bir girişim eşiği altında yapar. İşbirlikli durumda ise PU susar ve S1 ya da S2 düğümü PU’nun başarısız olan paketini yeniden iletir. Şekil 5.1’deki Markov zincirinde $T = 1$ iken yeni paket iletilip, diğer durumlarda aynı paket tekrar iletilmektedir. Durumlar arasındaki A (ACK) ve N (NACK) geçişleri PR’den PT, S1 ve S2’ye iletilen sırasıyla onay ve negatif onay mesajlarını göstermektedir. DF tekniğinde, S_p^1 durumunda PT A mesajı alırsa bir sonraki zaman aralığında yeni durum S_u^1 olur ve PT altına sermeli durumda yeni bir paket iletir. Eğer, S_p^1 durumunda PT N mesajı alırsa bir sonraki zaman aralığında S1 ya da S2 düğümlerinden en az birinin paketi çözmesi ya da ikisinin de çözmemesine göre aynı paket sırasıyla ya işbirlikli durumda S1 veya S2 tarafından ya da altına sermeli durumda PT tarafından iletilir. İşbirlikli durumda sonraki durum S_c^T ile gösterilirken, altına sermeli durumda S_u^T ile gösterilmektedir. Bu durumlarda tekrar N mesajı gelirse bir sonraki durum S_p^{T+1} olur ve her N mesajı geldiğinde aynı paketin tekrar iletilmesi için $T = T_m$ oluncaya kadar akış aynı şekilde devam eder. Şekil 5.1’de gösterilen DF tekniğine dayalı protokolde eğer herhangi bir zaman aralığında S_p^T , S_u^T ve S_c^T durumlarında A mesajı gelirse, bir sonraki durum her zaman S_p^1 olur ve yeni bir paket iletilir.¹

a) $T_m = 2$ durumu:

Özel olarak $T_m = 2$ iken DF tekniği için iletim protokolü şu şekilde açıklanmaktadır: Birinci zaman aralığında PT paketini PR’ye iletirken S1 ve S2 düğümleri de PT’yi dinlemektedir. Buna göre birinci zaman aralığında PR, S1 ve S2 alıcılarında alınan paketler sırasıyla \mathbf{y}_{TR} , \mathbf{y}_{T1} ve \mathbf{y}_{T2} olmak üzere, denklem (5.1)’deki gibi gösterilmektedir. Burada P_p PT’nin gücü, \mathbf{x}_p PT’nin paketi iken, \mathbf{n}_{TR} , \mathbf{n}_{T1} ve \mathbf{n}_{T2} ise sırasıyla PR, S1 ve S2’de AWGN vektörleridir. Birinci zaman aralığında PR, PT’den gelen paketi başarılı çözemezse diğer üç düğüme NACK mesajı göndermektedir.

¹Yineleme sayısının PU ve SU’nun başarımına olan etkisini incelemek amacıyla $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ durumları için protokolün çalışması incelenmiştir. $T_m > 3$ için Markov modelindeki karışıklık arttığı için nümerik ve teorik analiz yapılmamıştır.

$$\begin{aligned}
\mathbf{y}_{TR} &= \sqrt{P_p} h_{TR} \mathbf{x}_p + \mathbf{n}_{TR}, \\
\mathbf{y}_{T1} &= \sqrt{P_p} h_{T1} \mathbf{x}_p + \mathbf{n}_{T1}, \\
\mathbf{y}_{T2} &= \sqrt{P_p} h_{T2} \mathbf{x}_p + \mathbf{n}_{T2}
\end{aligned} \tag{5.1}$$

Eğer aynı zaman aralığında PT'den gelen paketi S1 ya da S2'den en az biri başarılı çözmüşse $T_m = 2$ için, önerilen protokol işbirlikli durumda çalışır ve başarılı çözen düğüm pasif röle gibi davranıp ikinci zaman aralığında PT'nin paketini PR'ye iletir. Eğer ikisi de başarılı çözmüşse kanal kalitesi daha iyi olan üzerinden PT'nin paketi iletilir.

İşbirlikli durumda S1 düğümü denklem (5.2)'de

$$\hat{\mathbf{x}}_p = \underset{\mathbf{x}_p}{\operatorname{argmin}} \left| y_{T1} - \sqrt{P_p} h_{T1} \mathbf{x}_p \right|^2 \tag{5.2}$$

şeklinde karar vermektedir. $\hat{\mathbf{x}}_p$ işareti, S1 düğümünde karar verilmiş ve PR'ye iletilecek olan işarettir. Buna göre ikinci zaman aralığında S1 üzerinden PR'nin aldığı paket,

$$\mathbf{y}_{1R} = \sqrt{P_s} h_{1R} \hat{\mathbf{x}}_p + \mathbf{n}_{1R} \tag{5.3}$$

denklem (5.3)'teki gibi gösterilmektedir. Burada P_s SU'nun gücü ve \mathbf{n}_{1R} PR'de AWGN vektörüdür.² Eğer PT paketini PR'ye başarılı gönderemediğinde her iki röle de gelen paketi başarılı çözemezse önerilen protokol ikinci zaman aralığında altına sermeli durumda çalışır ve SU'nun girişimi altında iletim yapar. $T_m = 2$ iken önerilen protokol Çizelge 5.1'de gösterilen beş durum ile açıklanmaktadır:

Durum S₁: PT'nin yeni paket ilettiği durumdur. SU sessizken, PT kendi paketini tek başına iletir. Eğer PR'den, ACK alınırsa bir sonraki durum S_2 olur. PR'den NACK alınır ve en az bir SU düğümü PT'nin paketini çözerse bir sonraki durum S_3 olurken, PR'den NACK alınır ve her iki SU düğümü de paketi çözemezse bir sonraki durum S_4 olur.

²Formülde 1 indisi yerine 2 yazıldığında S2 üzerinden PR'nin aldığı paket elde edilir. Kolaylık açısından bundan sonra bütün formüller S1 için yazılacaktır. Aynı ifadeler S2 için de geçerli olacaktır.

Çizelge 5.1 : DF tekniği için önerilen protokolün durumları.

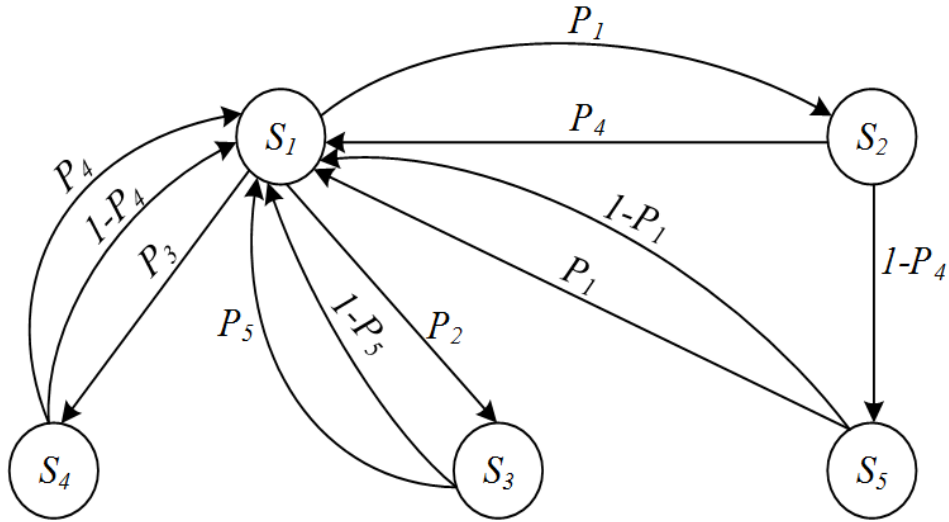
Durum	PU	SU
S_1	Yeni paket	Sessiz
S_2	Yeni paket	Kendi paketi
S_3	Sessiz	PU'nun paketi
S_4	Yeniden iletim	Kendi paketi
S_5	Yeniden iletim	Sessiz

Durum S_2 : Altına sermeli durumdur. Girişim etkisi altında, SU kendi paketini iletirken, PT yeni paket iletir. Eğer PR'den ACK alınırsa bir sonraki durum S_1 , NACK alınırsa S_5 olur.

Durum S_3 : İşbirlikli durumdur. PT sessizken SU düğümlerinden biri PT'nin başarısız olmuş paketini yeniden iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S_1 olur.

Durum S_4 : Altına sermeli durumdur. Girişim etkisi altında, PT başarısız olan paketini yeniden iletirken SU kendi paketini iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S_1 olur.

Durum S_5 : PT'nin tek başına iletmediği durumdur. SU sessizken, PT başarısız olan paketini yeniden iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S_1 olur.



Şekil 5.2 : DF tekniği için önerilen protokolün $T_m = 2$ iken Markov zinciri.

DF tekniği için önerilen protokolün $t = 2$ iken Markov zinciri, durum geçiş olasılıkları ile Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Burada durum geçiş olasılıkları şu şekilde tanımlanmaktadır:

P_1 : PT→PR kanalından paketin başarılı iletilmesi olasılığı,

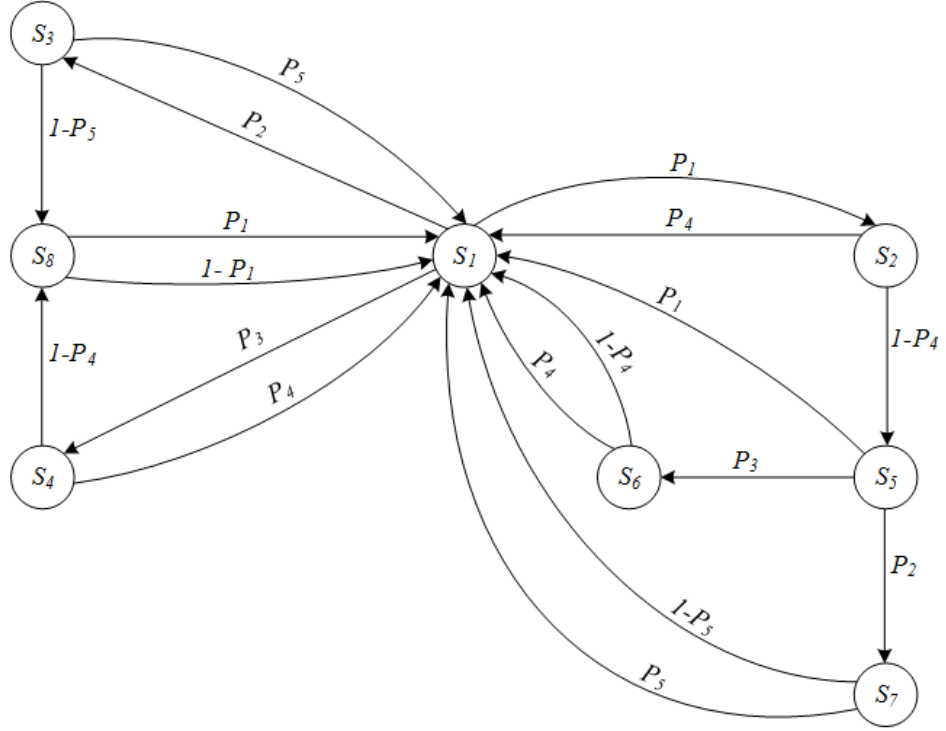
P_2 : PT→PR kanalından paketin iletilmemesi ve aynı paketin PT→S1, PT→S2 kanallarının en az biri üzerinden başarılı iletilmesi olasılığı,

P_3 : PT→PR, PT→S1 ve PT→S2 kanallarından paketin başarılı iletilmemesi olasılığı,

P_4 : S1→PR ya da S2→PR kanallarının oluşturduğu girişim altında PT→PR kanalından iletilen paketin başarılı olması olasılığı,

P_5 : İşbirlikli durumlarda, S1→PR ya da S2→PR kanallarından iletilen paketin başarılı olması olasılığı.³

b) $T_m = 3$ durumu:



Şekil 5.3 : DF tekniği için önerilen protokolün $T_m = 3$ iken Markov zinciri.

Benzer şekilde $T_m = 3$ iken DF tekniği için önerilen protokol sekiz durumla gösterilir. S_1 ve S_2 durumları $T_m = 2$ durumundakilerle aynıdır ve kalan durumlar şu şekilde tanımlanır:

Durum S_3 : İşbirlikli durumdur. PT sessizken SU düğümlerinden biri PT'nin başarısız olmuş paketini yeniden iletir. PR'den ACK gelirse bir sonraki durum S_1 olur. Eğer NACK gelirse bir sonraki durum S_8 olur ve PT paketi yeniden iletir.

³Şekil 5.2'de S_3 'den S_1 'e 1 olan geçiş olasılığı, P_5 başarılı paket iletimi ve $1 - P_5$ başarısız paket iletimi olasılıkları olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Bu durum S_4 ve S_5 durumları için de geçerlidir.

Durum S₄: Altına sermeli durumdur. Girişim etkisi altında, PT başarısız olan paketini yeniden iletirken SU kendi paketini iletir. PR'den ACK gelirse bir sonraki durum S₁ olur. Eğer NACK gelirse bir sonraki durum S₈ olur ve PT paketi yeniden iletir.

Durum S₅: PT'nin tek başına iletildiği durumdur. SU sessizken, PT başarısız olan paketini yeniden iletir. PR'den, ACK alınırsa bir sonraki durum S₁ olur. PR'den NACK alınır ve en az bir SU düğümü PT'nin paketini çözerse bir sonraki durum S₇ olurken, PR'den NACK alınır ve her iki SU düğümü de paketi çözemezse bir sonraki durum S₆ olur.

Durum S₆: Altına sermeli durumdur. Girişim etkisi altında, PT başarısız olan paketini yeniden iletirken SU kendi paketini iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S₁ olur.

Durum S₇: İşbirlikli durumdur. PT sessizken SU düğümlerinden biri PT'nin başarısız olmuş paketini yeniden iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S₁ olur.

Durum S₈: PT'nin tek başına iletildiği durumdur. SU sessizken, PT başarısız olan paketini yeniden iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S₁ olur.

DF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ iken verilen durum geçiş olasılıkları $T_m = 3$ iken Şekil 5.3'de verilen Markov zincirinde de aynen geçerlidir.

5.2 Servis Kesilme Olasılığı ve Verim Analizi

Bu alt bölümde DF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ iken birincil ve ikincil kullanıcıların ayrı ayrı servis kesilme olasılıkları hesaplanıp verim analizleri yapılacaktır.

Servis kesilme olasılığı kanalların erişilebilir hızlarının istenen hızın altına düşmesi olasılığı olarak tanımlanabilir. PT→PR, PT→S1, PT→S2 arasındaki kanallar için SU'nun girişimi yokken erişilebilir hızlar sırasıyla

$$\begin{aligned}
R_{TR} &= \log_2\left(1 + \frac{|h_{TR}|^2 P_p}{N_0}\right), \\
R_{T1} &= \log_2\left(1 + \frac{|h_{T1}|^2 P_p}{N_0}\right), \\
R_{T2} &= \log_2\left(1 + \frac{|h_{T2}|^2 P_p}{N_0}\right)
\end{aligned} \tag{5.4}$$

denklem (5.4)'teki gibi verilir. İşbirlikli durumlarda S1 ile PR arasındaki kanal için erişilebilir hız ise

$$R_{1R} = \log_2\left(1 + \frac{|h_{1R}|^2 P_s}{N_0}\right) \tag{5.5}$$

denklem (5.5) biçimindedir. SU'nun girişimi altında PT→PR arasındaki kanal için erişilebilir hız denklem (5.6) ile,

$$R_{TR}^I = \log_2\left(1 + \frac{|h_{TR}|^2 P_p}{|h_{iR}|^2 P_s + N_0}\right) \tag{5.6}$$

şeklinde ifade edilir. Burada $i = 1$ veya 2 'dir. Ayrıca P_p PT'nin gücü, P_s de S1 ve S2 düğümlerinin güçleridir.

Verim, iletim zaman aralığı başına başarılı olan paket sayısı olarak tanımlanmak üzere Şekil 4.1'de verilen sistem modelindeki PT→PR, PT→S1, PT→S2, S1→PR, S2→PR ve S1↔S2 kanallarının servis kesilme olasılıklarına bağlıdır. SU'nun PU'ya girişimi yokken PT→PR arasındaki kanal için servis kesilme olasılığı kanal katsayısı $|h_{TR}|^2$ 'ye bağlıdır. $|h_{TR}|^2$, λ_{TR} parametresi ile üstel dağılıma sahiptir. Bu durumda P_{TR} denklem (5.7)'deki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned}
P_{TR} &= Pr\left(\log_2\left(1 + \frac{|h_{TR}|^2 P_p}{N_0}\right) < R_p\right) \\
&= Pr\left(|h_{TR}|^2 < \frac{2^{R_p} - 1}{P_p/N_0}\right) \\
&= \int_0^{\frac{2^{R_p} - 1}{P_p/N_0}} \lambda_{TR} e^{-\lambda_{TR} x} dx \\
&= -e^{-\lambda_{TR} x} \Big|_0^{\frac{2^{R_p} - 1}{P_p/N_0}} \\
&= 1 - \exp\left(-\lambda_{TR} \rho_p\right).
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Burada $\rho_p = \frac{2^{R_p}-1}{P_p/N_0}$ ve $\lambda_{TR} = d_{TR}^v$ 'dir. R_p ise PU için istenen hızdır. Benzer şekilde (5.7)'den yola çıkarak SU'nun PU'ya ya da PU'nun SU'ya girişimi yokken $PT \rightarrow S1$, $PT \rightarrow S2$, $S1 \rightarrow PR$ ve $S2 \rightarrow PR$ kanallarının servis kesilme olasılıkları sırasıyla,

$$\begin{aligned}
P_{T1} &= Pr(\log_2(1 + \frac{|h_{T1}|^2 P_p}{N_0}) < R_p), \\
&= 1 - exp(-\lambda_{T1} \rho_p), \\
P_{T2} &= Pr(\log_2(1 + \frac{|h_{T2}|^2 P_p}{N_0}) < R_p), \\
&= 1 - exp(-\lambda_{T2} \rho_p), \\
P_{1R} &= Pr(\log_2(1 + \frac{|h_{1R}|^2 P_s}{N_0}) < R_s), \\
&= 1 - exp(-\lambda_{1R} \rho_s), \\
P_{2R} &= Pr(\log_2(1 + \frac{|h_{2R}|^2 P_s}{N_0}) < R_s) \\
&= 1 - exp(-\lambda_{2R} \rho_s)
\end{aligned} \tag{5.8}$$

denklem (5.8)'deki gibidir. Bu eşitliklerde $|h_{T1}|^2$, $|h_{T2}|^2$, $|h_{1R}|^2$ ve $|h_{2R}|^2$ sırasıyla $PT \rightarrow S1$, $PT \rightarrow S2$, $S1 \rightarrow PR$ ve $S2 \rightarrow PR$ kanalları arasındaki kanal sönümlenme katsayılarıdır ve $\lambda_{T1} = d_{T1}^v$, $\lambda_{T2} = d_{T2}^v$, $\lambda_{1R} = d_{1R}^v$ ve $\lambda_{2R} = d_{2R}^v$ parametreleri ile üstel dağılıma sahiptirler. Ayrıca bu eşitliklerde $\rho_s = \frac{2^{R_s}-1}{P_s/N_0}$ 'dir.

$S1$ 'in iletimi ile oluşan girişim altında $PT \rightarrow PR$ kanalının servis kesilme olasılığı $|h_{TR}|^2$ ile $|h_{1R}|^2$ değişkenlerine bağlıdır. Bu değişkenler sırasıyla λ_{TR} ve λ_{1R} parametreleri ile üstel dağılıma sahip oldukları için PDF'leri üzerinden ortalama alınıp $S1$ 'in iletimi ile oluşan girişim altında $PT \rightarrow PR$ kanalının servis kesilme olasılığı aşağıdaki şekilde hesaplanır. Burada $|h_{TR}|^2 = \alpha$ ve $|h_{1R}|^2 = \beta$ olmak üzere P_{TR}^I denklem (5.9)'da

$$\begin{aligned}
P_{TR}^I &= Pr\left(\log_2\left(1 + \frac{|h_{TR}|^2 P_p}{|h_{1R}|^2 P_s + N_0}\right) < R_p\right) \\
&= Pr\left(\log_2\left(1 + \frac{\alpha P_p}{\beta P_s + N_0}\right) < R_p\right) \\
&= Pr(\alpha < A) \\
&= \int_{\beta=0}^{\infty} \int_{\alpha=0}^A \lambda_{TR} \lambda_{1R} e^{-\alpha \lambda_{TR}} e^{-\beta \lambda_{1R}} d\alpha d\beta \\
&= \int_{\beta=0}^{\infty} \lambda_{1R} e^{-\beta \lambda_{1R}} \left(-e^{-\alpha \lambda_{TR}} \Big|_0^A\right) d\beta \\
&= \int_{\beta=0}^{\infty} \lambda_{1R} e^{-\beta \lambda_{1R}} (1 - e^{-A \lambda_{TR}}) d\beta \\
&= \int_{\beta=0}^{\infty} \lambda_{1R} e^{-\beta \lambda_{1R}} d\beta - \int_{\beta=0}^{\infty} \lambda_{1R} e^{-\beta \lambda_{1R} - A \lambda_{TR}} d\beta \\
&= T_1 - T_2 \\
&= 1 - \frac{\lambda_{1R}}{(\lambda_{TR} \rho_p P_s / N_0) + \lambda_{1R}} \exp(-\lambda_{TR} \rho_p)
\end{aligned} \tag{5.9}$$

olarak elde edilir. Burada

$$\begin{aligned}
T_1 &= \int_{\beta=0}^{\infty} \lambda_{1R} e^{-\beta \lambda_{1R}} d\beta \\
&= 1
\end{aligned} \tag{5.10}$$

ve

$$\begin{aligned}
T_2 &= \int_{\beta=0}^{\infty} \lambda_{1R} e^{-\beta \lambda_{1R} - A \lambda_{TR}} d\beta \\
&= \lambda_{1R} \int_{\beta=0}^{\infty} e^{-\beta(\lambda_{1R} + \frac{\rho_p \lambda_{TR} P_s}{N_0}) - \rho_p \lambda_{TR}} d\beta \\
&= \lambda_{1R} e^{-\rho_p \lambda_{TR}} \int_{\beta=0}^{\infty} e^{-\beta(\lambda_{1R} + \frac{\rho_p \lambda_{TR} P_s}{N_0})} d\beta \\
&= - \frac{\lambda_{1R}}{(\lambda_{TR} \rho_p P_s / N_0) + \lambda_{1R}} \exp(-\lambda_{TR} \rho_p)
\end{aligned} \tag{5.11}$$

olarak hesaplanır. $A = (\beta P_s + N_0) \frac{2^{R_p} - 1}{P_p}$ olarak alınmıştır. (5.9)'da 1 yerine 2 yazılarak S2 düğümünün iletimi ile oluşan girişim altında PT→PR kanalının servis kesilme olasılığı bulunmaktadır. Bu eşitliklerde $\rho_p = \frac{2^{R_p} - 1}{P_p / N_0}$ ve $\rho_s = \frac{2^{R_s} - 1}{P_s / N_0}$ iken $\lambda_{TR} = d_{TR}^v$, $\lambda_{1R} = d_{1R}^v$ 'dir.

5.2.1 Birincil kullanıcı

Burada bir önceki alt bölümde anlatılan açıklamalar ışığında PU için $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ iken verim analizi yapılacaktır.

a) $T_m = 2$ durumu:

Şekil 5.2'de $T_m = 2$ için ve Şekil 5.3'te $T_m = 3$ için verilen Markov modellerinden kararlı durum geçiş olasılıkları denklem (5.12)'deki gibi,

$$\begin{aligned} P_1 &= 1 - P_{TR}, \\ P_2 &= P_{TR}(1 - P_{T1})P_{T2} + P_{TR}P_{T1}(1 - P_{T2}) + P_{TR}(1 - P_{T1})(1 - P_{T2}) \\ &= P_{TR} - P_{TR}P_{T1}P_{T2}, \\ P_3 &= P_{TR}P_{T1}P_{T2}, \\ P_4 &= 1 - P_{TR}^I, \\ P_5 &= 1 - P_{1R} \end{aligned} \tag{5.12}$$

bulunur. Burada $P_{1R} = P_{2R}$ olduğu için $P_5 = 1 - P_{2R}$ şeklinde de yazabilmek mümkündür. Bu eşitliklerin sağ tarafları denklem (5.8) ve denklem (5.9)'da verilmektedir.

Şekil 5.2'de $T_m = 2$ iken önerilen protokolün Markov zinciri yardımıyla kararlı durum olasılıkları,

$$\begin{aligned} P(S_1) &= P_4P(S_2) + P(S_3) + P(S_4) + P(S_5), \\ P(S_2) &= P_1P(S_1), \\ P(S_3) &= P_2P(S_1), \\ P(S_4) &= P_3P(S_1), \\ P(S_5) &= (1 - P_4)P(S_2), \\ P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) + P(S_4) + P(S_5) &= 1 \end{aligned} \tag{5.13}$$

denklem (5.13)'ten yararlanarak

$$\begin{aligned}
P(S_1) &= 1/D, \\
P(S_2) &= P_1/D, \\
P(S_3) &= P_2/D, \\
P(S_4) &= P_3/D, \\
P(S_5) &= P_1(1 - P_4)/D
\end{aligned} \tag{5.14}$$

denklem (5.14)'teki gibi hesaplanır. Bu eşitliklerde $D = 1 + 2P_1 + P_2 + P_3 - P_1P_4$ 'tür.

Her bir zaman aralığında başarılı iletilen paketler PU'nun verimini arttırmaktadır. PU'nun paketinin S_1 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_1 , S_2 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_2 , S_3 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_3 , S_4 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_4 ve S_5 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_1 'dir. Buna göre DF tekniği için önerilen protokolde PU'nun verimi denklem (5.15)'teki gibi,

$$\begin{aligned}
\eta_{PD} &= P_1P(S_1) + P_2P(S_2) + P_3P(S_3) + P_4P(S_4) + P_1P(S_5) \\
&= \frac{P_1 + P_1P_4 + P_2P_2 + P_3P_3 + P_1^2 - P_1^2P_4}{1 + 2P_1 + P_2 + P_3 - P_1P_4}
\end{aligned} \tag{5.15}$$

olarak bulunur.

b) $T_m = 3$ durumu:

Benzer şekilde $T_m = 3$ iken Şekil 5.3'te verilen Markov zinciri yardımıyla kararlı durum olasılıkları,

$$\begin{aligned}
P(S_1) &= P_4P(S_2) + P_5P(S_3) + P_4P(S_4) + P_1P(S_5) + P(S_6) + P(S_7) + P(S_8), \\
P(S_2) &= P_1P(S_1), \\
P(S_3) &= P_2P(S_1), \\
P(S_4) &= P_3P(S_1), \\
P(S_5) &= (1 - P_4)P(S_2), \\
P(S_6) &= P_3P(S_5), \\
P(S_7) &= P_2P(S_5), \\
P(S_8) &= (1 - P_5)P(S_3) + (1 - P_4)P(S_4), \\
P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) + P(S_4) + P(S_5) + P(S_6) + P(S_7) + P(S_8) &= 1 \quad (5.16)
\end{aligned}$$

denklem (5.16)'dan faydalanarak

$$\begin{aligned}
P(S_1) &= 1/D, \\
P(S_2) &= P_1/D, \\
P(S_3) &= P_2/D, \\
P(S_4) &= P_3/D, \\
P(S_5) &= P_1(1 - P_4)/D, \\
P(S_6) &= P_1P_3(1 - P_4)/D, \\
P(S_7) &= P_1P_2(1 - P_4)/D, \\
P(S_8) &= P_2(1 - P_5) + P_3(1 - P_4)/D \quad (5.17)
\end{aligned}$$

denklem (5.17) gibi hesaplanır. Bu eşitliklerde $D = 1 + P_1(2 + P_2 + P_3 - P_4 - P_2P_4 - P_3P_4) + P_2(2 - P_5) + P_3(2 - P_4)$ 'tür.

PU'nun paketinin S_1 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_1 , S_2 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_4 , S_3 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_5 , S_4 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_4 ve S_5 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_1 , S_6 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_4 , S_7 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_5 ve S_8 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_1 'dir. Buna göre DF tekniği için önerilen protokolde PU'nun verimi,

$$\begin{aligned}\eta_{P_D} &= P_1P(S_1) + P_4P(S_2) + P_5P(S_3) + P_4P(S_4) + P_1P(S_5) + P_4P(S_6) + P_5P(S_7) + P_1P(S_8) \\ &= \frac{P_1(1 + P_1 + P_2 + P_3) + P_1P_4(1 - P_1 - P_3P_4 - P_2P_5) + P_2P_5 + P_3P_4}{D}\end{aligned}\quad (5.18)$$

denklem (5.18)'deki gibi hesaplanır. Burada $D = 1 + P_1(2 + P_2 + P_3 - P_4 - P_2P_4 - P_3P_4) + P_2(2 - P_5) + P_3(2 - P_4)$ 'tür.

5.2.2 İkincil kullanıcı

Burada önceki alt bölümlerde açıklananlar ışığında ikincil kullanıcı için $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ iken verim analizi yapılacaktır.

DF tekniğinde, SU sadece altına sermeli durumlarda kendi paketini iletmektedir. Diğer durumlarda ya PT'nin paketini iletmekte ya da sessiz kalmaktadır. Altına sermeli durumlarda eğer alıcı düğümden NACK mesajı alırsa aynı paketi yeniden iletme şansı yoktur. Dördüncü bölümde önerilen sistem modelinde, S1 ve S2 düğümleri arasında çift yönlü iletişim kurabilen SU, PT→S1 ve PT→S2 kanallarının oluşturduğu girişim altında iletim yapmaktadır. Buna göre, PU'nun girişimi altında S1↔S2 kanalının servis kesilme olasılığı (5.9)'dakine benzer biçimde,

$$\begin{aligned}P_S^I &= Pr\left(\log_2\left(1 + \frac{|h_S|^2 P_s}{|h_{T1}|^2 P_p + N_0}\right) < R_s\right) \\ &= 1 - \frac{\lambda_{T1}}{(\lambda_s \rho_s P_p / N_0) + \lambda_{T1}} \exp(-\lambda_s \rho_s)\end{aligned}\quad (5.19)$$

denklem (5.19)'daki gibi hesaplanır. Burada $\lambda_{T1} = d_{T1}^v$, $\lambda_s = d_s^v$, $\rho_s = \frac{2^{R_s} - 1}{P_s / N_0}$ ve $|h_S|^2$ ile $|h_{T1}|^2$ sırasıyla S1↔S2 ve PT→S1 arasındaki kanalların sönmleme katsayılarıdır. Denklemlerde 1 yerine 2 koyulduğunda S2→S1 kanalının servis kesilme olasılığı elde edilir.

a) $T_m = 2$ durumu:

Özel olarak DF tekniğinde $T_m = 2$ için SU'nun iletimi şu şekilde anlatılabilir: PR birinci zaman aralığında gelen paketi başarılı çözerse, ikinci zaman aralığında PT→PR'ye SU'nun girişimi altında iletim yaparken, S1→S2'ye ya da S2→S1'e PU'nun girişimi altında iletim yapmaktadır. Birinci zaman aralığında PR ile birlikte

S1 ve S2 düğümleri gelen paketi başarılı çözemezse, ikinci zaman aralığında önerilen protokol yine altına sermeli durumda çalışır ve PU'nun girişimi altında SU paketini iletir. Altına sermeli durumda S1'in S2'ye ya da S2'nin S1'e gönderdiği paketler sırasıyla, denklem (5.20)'de

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{12} &= \sqrt{P_s} h_{S1} \mathbf{x}_{S1} + \mathbf{n}_{12}, \\ \mathbf{y}_{21} &= \sqrt{P_s} h_{S2} \mathbf{x}_{S2} + \mathbf{n}_{21} \end{aligned} \quad (5.20)$$

olarak alınmaktadır. Burada P_s SU'nun iletim gücü, \mathbf{x}_{S1} ve \mathbf{x}_{S2} sırasıyla S1 ve S2'nin paketidir. \mathbf{n}_{12} ve \mathbf{n}_{21} ise sırasıyla S2 ve S1'deki AWGN vektörleridir.

SU sadece altına sermeli durumlarda kendi paketini ilettiğine göre, SU'nun paketinin bu durumlarda başarılı iletilmesi olasılığı $1 - P_S^I$ 'dir. Buna göre DF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ iken SU sadece S_2 ve S_4 durumlarında paketini iletmektedir. Denklem (5.21)'de, önerilen protokolde SU'nun verimi Şekil 5.2'deki Markov zinciri ve (5.19) yardımıyla,

$$\begin{aligned} \eta_S &= (1 - P_S^I) (P(S_2) + P(S_4)) \\ &= \frac{(1 - P_S^I) (P_1 + P_3)}{D} \end{aligned} \quad (5.21)$$

şeklinde hesaplanır. Burada $D = 1 + 2P_1 + P_2 + P_3 - P_1P_4$ 'tür.

b) $T_m = 3$ durumu:

Benzer şekilde $T_m = 3$ iken SU sadece S_2 , S_4 ve S_6 durumlarında paketini iletmektedir. Denklem (5.22)'de, önerilen protokolde SU'nun verimi Şekil 5.3'teki Markov zinciri ve (5.19) yardımıyla,

$$\begin{aligned} \eta_S &= (1 - P_S^I) (P(S_2) + P(S_4) + P(S_6)) \\ &= \frac{(1 - P_S^I) (P_1 + P_3 + P_1P_3 - P_1P_3P_4)}{D} \end{aligned} \quad (5.22)$$

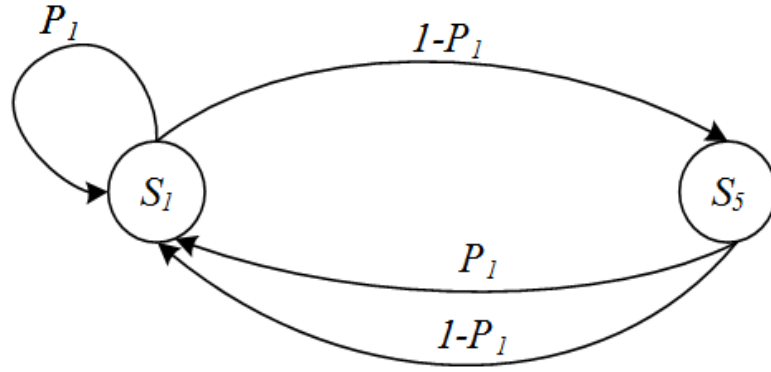
şeklinde hesaplanır. Burada $D = 1 + P_1(2 + P_2 + P_3 - P_4 - P_2P_4 - P_3P_4) + P_2(2 - P_5) + P_3(2 - P_4)$ 'tür.

5.3 Referans Modeller

DF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ iken karşılaştırma yapabilmek için PU'ya klasik model, yalnız işbirlikli model ve yalnız altına sermeli model olmak üzere 3 farklı referans model oluşturulmuştur. Referans modellerdeki maksimum yineleme sayısı $T_m = 2$ 'dir ve bu modellerdeki bütün durumlar ve kararlı durum geçiş olasılıkları Alt Bölüm 5.1'de anlatıldığı gibidir.

Bu alt bölümde üç farklı referans model için iletim protokolleri anlatılacak ve her biri için verim analizi yapılacaktır.

5.3.1 Klasik model



Şekil 5.4 : DF tekniğinde klasik model için Markov zinciri.

DF tekniğinde klasik model Şekil 5.4'teki Markov zinciri ile gösterilmektedir. Klasik modelde SU olmaksızın, yalnızca PT ve PR düğümlerinden oluşan PU vardır. PT paketini PR'ye en fazla iki yineleme sayısında iletmektedir. Birinci zaman aralığında paket başarısız olursa ikinci zaman aralığında aynı paketi iletme hakkına sahiptir. DF tekniğinde klasik modelin iletim protokolü iki durum ile açıklanmaktadır:

Durum S₁: PT yeni paketini PR'ye iletir. Eğer PR ACK gönderirse bir sonraki durum yine S₁ olurken, NACK gönderirse bir sonraki durum S₅ olur.

Durum S₅: PT birinci zaman aralığında başarısız olmuş paketini yeniden iletir. PR'den gelen ACK ya da NACK mesajlarından bağımsız olarak bir sonraki durum S₁ olur.

Şekil 5.4'te Markov zinciri ile gösterilen klasik modelde durum geçiş olasılığı tektir ve şu şekilde tanımlanmaktadır:

P_1 : PT→PR kanalından paketin başarılı iletilmesi olasılığı.

DF tekniğinde klasik model için Şekil 5.4'teki Markov zinciri yardımıyla kararlı durum olasılıkları,

$$\begin{aligned}
 P(S_1) &= P_1 P(S_1) + P(S_5), \\
 P(S_5) &= (1 - P_1) P(S_1), \\
 P(S_1) + P(S_5) &= 1
 \end{aligned}
 \tag{5.23}$$

denklem (5.23)'ten faydalanarak

$$\begin{aligned}
 P(S_1) &= 1 / (2 - P_1), \\
 P(S_5) &= (1 - P_1) / (2 - P_1)
 \end{aligned}
 \tag{5.24}$$

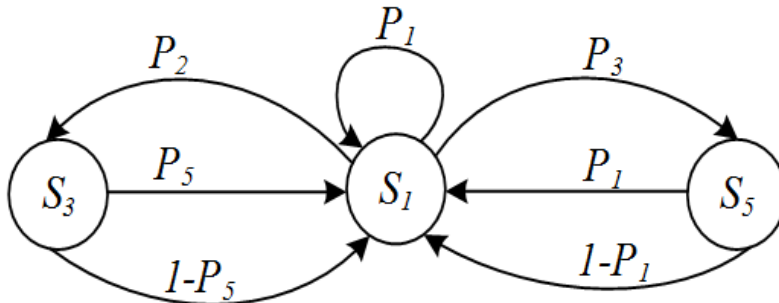
denklem (5.24)'teki gibi hesaplanır.

PU'nun paketinin S_1 ve S_5 durumlarında başarılı iletilmesi olasılığı P_1 'dir. Buna göre denklem (5.25)'te klasik model için PU'nun verimi,

$$\begin{aligned}
 \eta_{P_n} &= P_1 P(S_1) + P_1 P(S_5) \\
 &= P_1
 \end{aligned}
 \tag{5.25}$$

olarak hesaplanır.

5.3.2 Yalnız işbirlikli model



Şekil 5.5 : DF tekniğinde yalnız işbirlikli model için Markov zinciri.

DF tekniğinde yalnız işbirlikli model Şekil 5.5'teki Markov zinciriyle gösterilmektedir. Yalnız işbirlikli modelde, S_1 ve S_2 düğümlerinden oluşan SU ile PT ve PR

düğümlelerinden oluşan PU vardır. S1 ve S2 düğümleri kendi paketlerini iletmeyip pasif röle gibi davranırken, PT paketini PR'ye en fazla iki yineleme sayısı ile iletmektedir. Eğer birinci zaman aralığında PT'nin paketi başarısız olur ve S1 ya da S2 düğümlerinden en az biri PT'nin paketini çözerse ikinci zaman aralığında bu düğüm PU ile işbirliği yaparak PT'nin paketini iletir. Eğer her ikisi de çözemezse PT paketini yeniden iletir. DF tekniğinde yalnız işbirlikli modelin iletim protokolü üç durum ile açıklanmaktadır:

Durum S₁: PT birinci zaman aralığında PR'den, ACK mesajı alınırsa bir sonraki durum S₁ olur. Eğer NACK mesajı alınır ve en az bir SU düğümü PU'nun paketini çözerse bir sonraki durum S₃ olur. NACK mesajı alınır ve her iki SU düğümü de paketi çözemezse bir sonraki durum S₅ olur.

Durum S₃: PU sessizken SU düğümlerinden biri PU'nun başarısız olmuş paketini yeniden iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S₁ olur.

Durum S₅: SU düğümleri, PT'nin paketini çözemediği için sessizken, PT başarısız olan paketini yeniden iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S₁ olur.

Şekil 5.5'te Markov zinciri ile gösterilen yalnız işbirlikli modelde durum geçiş olasılıkları şu şekilde tanımlanmaktadır:

P_1 : PT→PR kanalından paketin başarılı iletilmesi olasılığı,

P_2 : PT→PR kanalından paketin başarılı iletilmemesi ve aynı paketin PT→S1, PT→S2 kanallarının en az biri üzerinden başarılı iletilmesi olasılığı,

P_3 : PT→PR, PT→S1 ve PT→S2 kanallarında paketin başarılı iletilmemesi olasılığı,

P_5 : S1→PR ya da S2→PR kanallarından iletilen paketin başarılı olması olasılığı.

DF tekniğinde yalnız işbirlikli model için Şekil 5.5'te Markov zinciri yardımıyla kararlı durum olasılıkları,

$$\begin{aligned}
P(S_1) &= P_1 P(S_1) + P(S_3) + P(S_5), \\
P(S_3) &= P_2 P(S_1), \\
P(S_5) &= P_3 P(S_1), \\
P(S_1) + P(S_3) + P(S_5) &= 1
\end{aligned} \tag{5.26}$$

denklem (5.26)'dan

$$\begin{aligned}
P(S_1) &= 1 / (1 + P_2 + P_3), \\
P(S_3) &= P_2 / (1 + P_2 + P_3), \\
P(S_5) &= P_3 / (1 + P_2 + P_3)
\end{aligned} \tag{5.27}$$

denklem (5.27) olarak hesaplanır.

PU'nun paketinin S_1 ve S_5 durumlarında başarılı iletilmesi olasılığı P_1 , S_3 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_5 'dir. Buna göre denklem (5.28)'de DF tekniğinde yalnız işbirlikli model için PU'nun verimi,

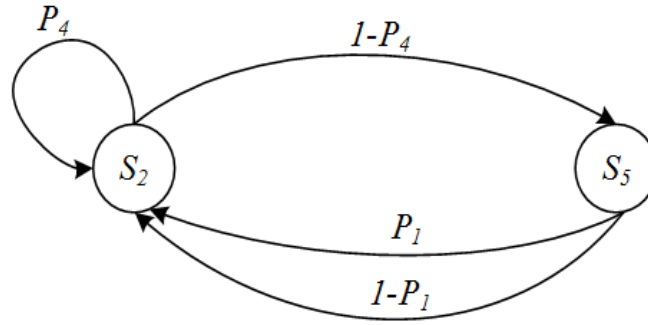
$$\begin{aligned}
\eta_{P_c} &= P_1 P(S_1) + P_5 P(S_3) + P_1 P(S_5) \\
&= \frac{P_1 (1 + P_3) + P_2 P_5}{1 + P_2 + P_3}
\end{aligned} \tag{5.28}$$

olarak hesaplanır.

5.3.3 Yalnız altına sermeli model

DF tekniğinde yalnız altına sermeli model Şekil 5.6'daki Markov zinciriyle gösterilmektedir. Yalnız altına sermeli modelde S_1 ve S_2 düğümlerinden oluşan SU ile PT ve PR düğümlerinden oluşan PU vardır. PU kendi paketini en fazla iki yineleme sayısında iletirken SU, PU ile aynı anda spektrumu kullanarak sadece kendi paketini en fazla bir yineleme sayısında iletmektedir. Birinci zaman aralığında PT paketini SU'nun girişimi altında iletmediğinde başarısız olursa, ikinci zaman aralığında tek başına iletmektedir.

Yalnız altına sermeli modelin iletim protokolü iki durum ile açıklanmaktadır:



Şekil 5.6 : DF tekniğinde yalnız altına sermeli model için Markov zinciri.

Durum S_2 : Girişim etkisi altında, SU kendi paketini iletirken, PU yeni paket iletir. Eğer PR'den ACK mesajı alınırsa bir sonraki durum S_1 , NACK mesajı alınırsa S_5 olur.

Durum S_5 : PT girişim etkisi altında başarısız olan paketini yeniden iletirken SU sessiz kalır. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S_1 olur.

Şekil 5.6'da Markov zinciri ile gösterilen yalnız altına sermeli modelde durum geçiş olasılıkları şu şekilde tanımlanmaktadır:

P_1 : PT→PR kanalından paketin başarılı iletilmesi olasılığı,

P_4 : S_1 →PR ya da S_2 →PR kanalının oluşturduğu girişim altında PT→PR kanalından iletilen paketin başarılı olması olasılığı.

Yalnız altına sermeli model için Şekil 5.6'da Markov zinciri yardımıyla kararlı durum olasılıkları,

$$\begin{aligned}
 P(S_2) &= P_4 P(S_2) + P(S_5), \\
 P(S_5) &= (1 - P_4) P(S_2), \\
 P(S_2) + P(S_5) &= 1
 \end{aligned} \tag{5.29}$$

denklem (5.29) yardımıyla

$$\begin{aligned}
 P(S_2) &= 1 / (2 - P_4), \\
 P(S_5) &= (1 - P_4) / (2 - P_4)
 \end{aligned} \tag{5.30}$$

denklem (5.30)'deki gibi hesaplanır.

PU'nun paketinin S_2 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_4 , S_5 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_1 'dir. Buna göre denklem (5.31)'de DF tekniğinde yalnız altına sermeli model için PU'nun verimi,

$$\begin{aligned}\eta_{P_u} &= P_4 P(S_2) + P_1 P(S_5) \\ &= \frac{P_1 + P_4 - P_1 P_4}{2 - P_4}\end{aligned}\quad (5.31)$$

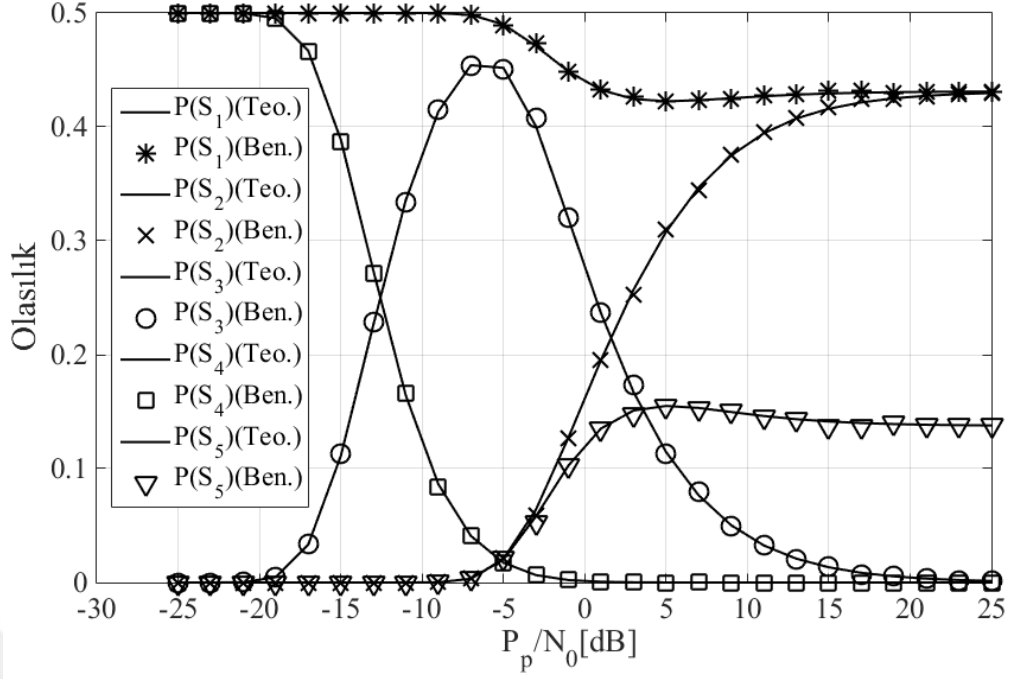
olarak hesaplanır.

5.4 Başarım Değerlendirmesi

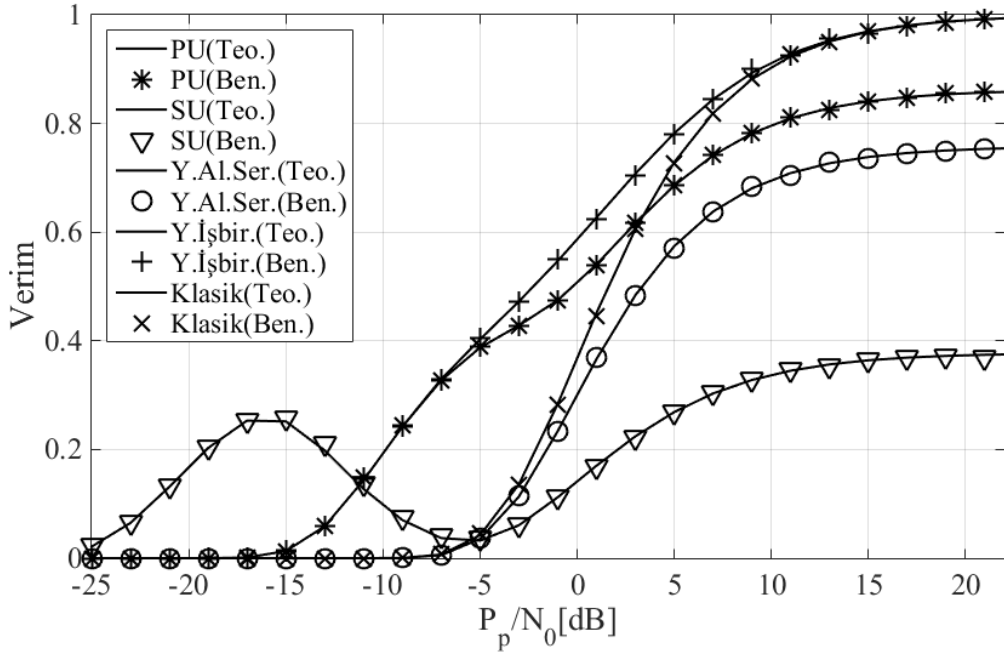
Bu alt bölümde, DF tekniği için önerilen protokol ve referans modeller için önceki bölümlerdeki kuramsal verim analizlerinin sonuçları bilgisayar benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır.

Başarım değerlendirmelerinde DF tekniği için önerilen protokolde ve referans modellerde PT→PR ve S1↔S2 kanalları arasındaki uzaklıklar sırasıyla $d_{TR} = 1$ ve $d_S = 0.2$ varsayılmaktadır. Benzer şekilde, yol kaybı katsayısı $\nu = 4$, AGN örneklerinin varyansı $N_0 = 1$ ve istenen hızlar $R_p = 1$, $R_s = 0.25$ olarak kabul edilmektedir. DF tekniği için önerilen protokolün $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ iken altına sermeli durumları ile verilen referans modeller içinde yalnız altına serme modelinde, PU'nun servis kalitesini korumak için girişim eşiği olarak $P_s/N_0 = P_p/N_0 - 15$ dB alınmıştır. Farklı olarak, önerilen protokolün işbirlikli çalışma durumları ile tek başına PT'nin iletim yaptığı durumlarda ve diğer referans modellerde ise $P_s/N_0 = P_p/N_0$ kabul edilmektedir.

Şekil 5.7, (5.14)'te hesaplanan kararlı durum olasılıklarının $\text{SNR} = P_p/N_0$ 'a göre değişimini göstermektedir. Çok düşük SNR değerlerinde, PR ile S1 ve S2 düğümlerinin PT'nin paketini çözmemesi nedeniyle önerilen protokol $T_m = 2$ iken S_4 ile gösterilen altına sermeli durumda çalışmaktadır. Artan SNR değerleriyle S1 ya da S2 düğümlerinin pasif röle gibi davranıp PU'nun paketini iletmesi ile S_3 ile gösterilen işbirlikli durumda çalışmaktadır. SNR değeri biraz daha atarken PR birinci zaman aralığında gelen paketi başarılı çözmektedir ve önerilen protokol ikinci zaman aralığında S_2 ile gösterilen altına sermeli durumda çalışmaktadır.

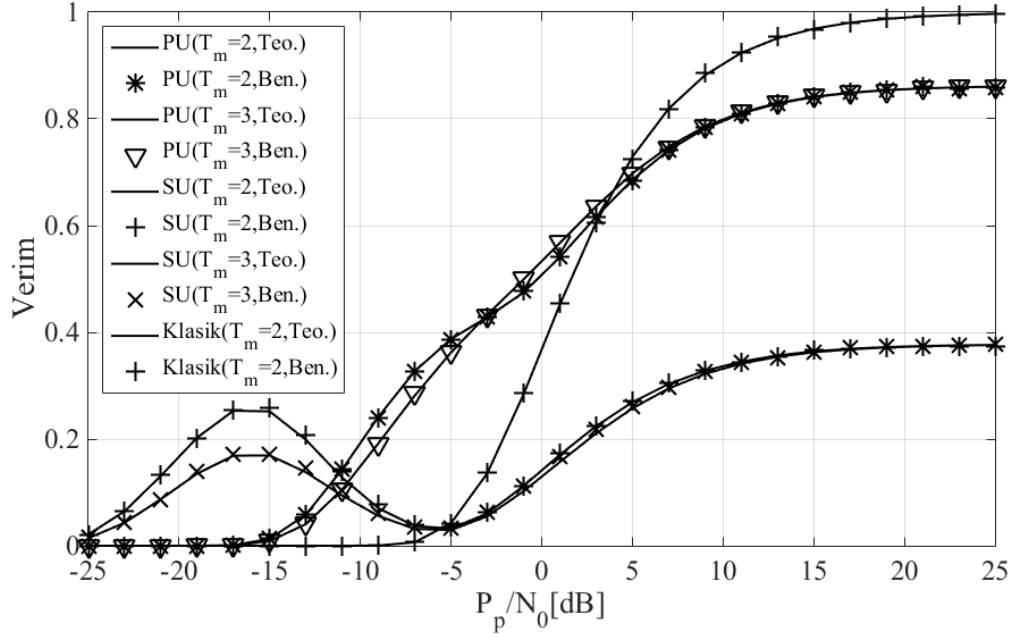


Şekil 5.7 : DF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ için kararlı durum olasılıkları.



Şekil 5.8 : DF tekniği için önerilen protokolün PU ve SU verimi ile referans modellerin PU verimlerinin karşılaştırılması ($T_m = 2$).

DF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ iken PU ve SU verimleri ile referans modeller için PU verimi Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Yalnız işbirlikli model en iyi başarıma sahipken, yalnız altına sermeli model en kötü başarıma sahiptir. Beklenildiği gibi, önerilen protokolde PU'nun verimi bu iki model arasında kalmaktadır. Düşük SNR değerlerinde, S1 ve S2 düğümlerinin işbirliği sayesinde önerilen protokolün verimi klasik modelin verimine göre oldukça yüksektir.



Şekil 5.9 : DF tekniği için önerilen protokolün PU ve SU verimleri ($T_m = 2$ ve $T_m = 3$ için).

Ayrıca, Şekil 5.7'den görüldüğü gibi PU'nun veriminin sıfır olduğu çok düşük SNR değerlerinde, önerilen protokolün S_4 durumunda çalışması sonucu SU'nun verimi 0.3'e yaklaşmaktadır. Artan SNR değerleriyle birlikte başlangıçta SU'nun işbirlikli durumda kendi paketini iletememesi sonucu verimi azalırken, sonrasında önerilen protokolün altına sermeli durumda çalışması ile kendi paketini iletip verimini 0.4'e kadar çıkarmaktadır. Yüksek SNR değerlerinde, önerilen protokolün ikinci zaman aralığında altına sermeli durumda çalışması sonucunda PU'nun verimi 0.85'e ulaşmaktadır. Ancak PU'nun verimindeki bu göz ardı edilebilir azalma, SU'nun veriminin sıfıra doğru azalmasını önleyip 0.4 civarında sabit kalmasını sağlamaktadır.

Şekil 5.9 DF tekniği için önerilen protokolün $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ için PU ve SU verimlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Her iki maksimum yineleme sayısı için de yüksek SNR'lerde verim aynı değerde iken, maksimum yineleme sayısının artması düşük SNR değerlerinde PU'nun veriminde azalmaya neden olmaktadır. Benzer şekilde maksimum yineleme sayısının artması SU'nun kendi paketini ilettiği altına sermeli durumlarda SU'nun veriminde de bir miktar azalmaya neden olmaktadır. Ancak Şekil 5.9'da görüldüğü gibi maksimum yineleme sayısındaki artış protokolün çalışmasını göz ardı edilebilecek seviyede kötüleştirmiş ve düşük SNR değerlerinde klasik modelden daha iyi başarımlar göstermesini engellemiştir.

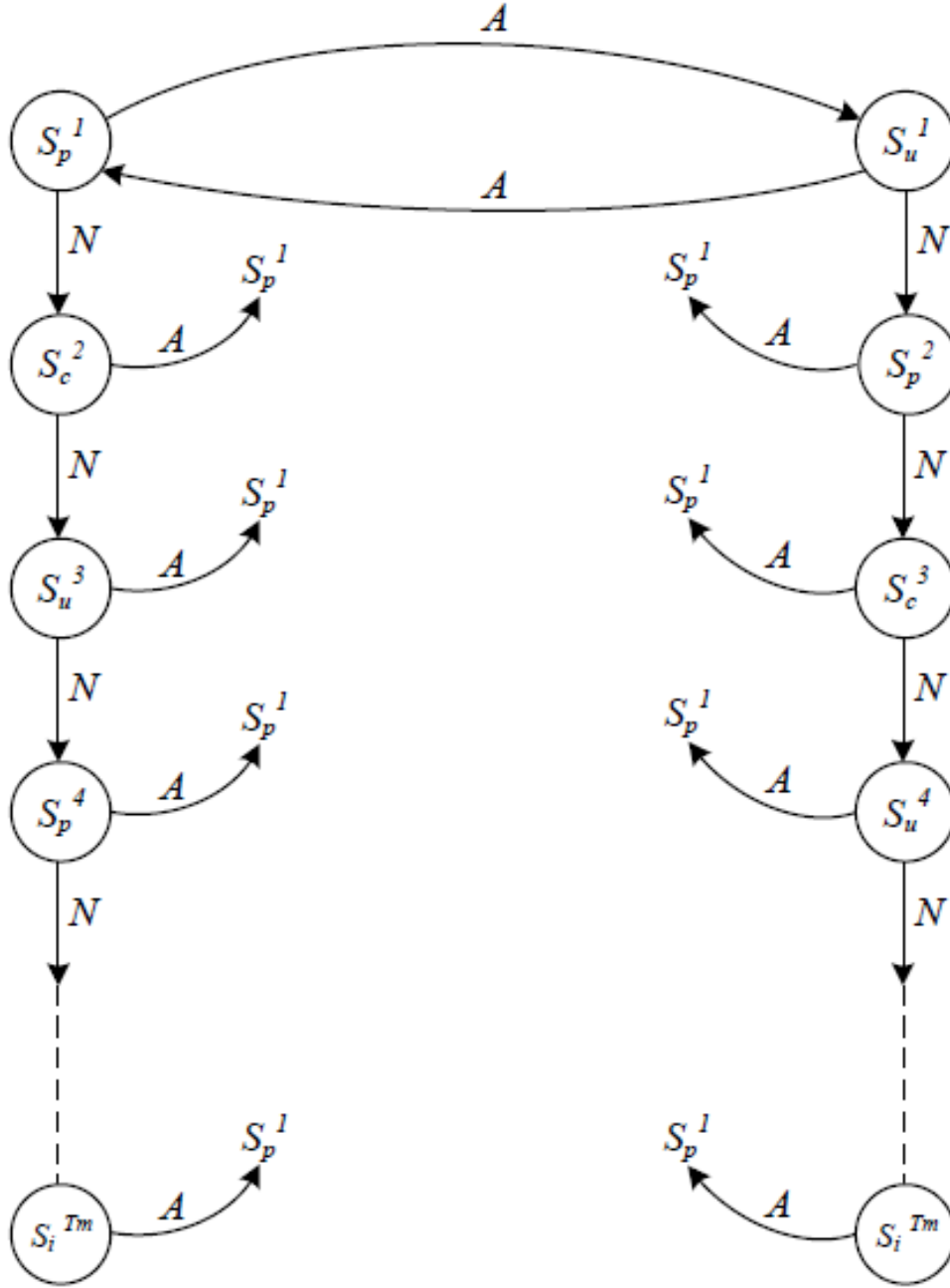
6. AF TEKNİĞİ İÇİN YENİ SPEKTRUM PAYLAŞIM PROTOKOLÜ

Bu bölümde, birincil kullanıcısı ARQ tabanlı, ikincil kullanıcısı AF tekniği ile işbirliği yapan altına sermeli bilişsel radyo ağı için yeni bir spektrum paylaşım protokolü önerilecektir. PU ve SU'nun servis kesilme olasılıkları ile verimleri hesaplanacak ve PU'ya önerilen referans modellerle başarımlar karşılaştırmaları yapılacaktır.

6.1 AF Tekniği için Yeni Protokolün Tanımlanması

T_m PU'nun paketi için izin verilen maksimum yineleme sayısı olmak üzere, AF tekniğinde önerilen protokolün $T \leq T_m$ için Markov zinciri Şekil 6.1'de gösterilmektedir. PU'nun paketi, tek başına PT'nin iletilmesi durumunda ($S_p^{T_m}$), altına sermeli durumunda ($S_u^{T_m}$) ya da işbirlikli durumunda ($S_c^{T_m}$) olmak üzere üç farklı şekilde iletilmektedir. Şekil 6.1'de $T = 1$ 'de yeni paket iletilirken, diğer durumlarda aynı paket yeniden iletilmektedir. Durumlar arasındaki A (ACK) ve N (NACK) geçişleri sırasıyla onay ve negatif onay mesajlarını göstermektedir. AF tekniğinde, S_p^1 durumunda PT A mesajı alırsa bir sonraki zaman aralığında yeni durum S_u^1 olur ve PT altına sermeli durumda yeni bir paket iletir. S_u^1 durumunda eğer PT N alırsa bir sonraki durumda paketi tek başına iletir. AF tekniğinde, S_p^T durumunda PT N mesajı alırsa bir sonraki zaman aralığında yeni durum S_c^{T+1} olur ve S1 ya da S2, PT'nin paketini kuvvetlendirip PR'ye iletir. AF tekniğinde T 'nin maksimum yineleme sayısı için durumlar sırasıyla $S_c^T \rightarrow S_u^{T+1} \rightarrow S_p^{T+2} \rightarrow S_c^{T+3} \rightarrow S_u^{T+4} \dots$ şeklinde $T = T_m$ oluncaya kadar ilerlemektedir. Şekil 6.1'de gösterilen AF tekniğine dayalı protokolde eğer herhangi bir zaman aralığında S_p^T , S_u^T ve S_c^T durumlarında A mesajı gelirse, bir sonraki durum her zaman S_p^1 olur ve yeni bir paket iletilir.

Bölüm 5'te anlatıldığı gibi, $T_m > 3$ için AF tekniği için önerilen protokolde de Markov zincirinin karmaşıklığı artmaktadır. Burada yalnızca $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ için analiz yapılacaktır.



Şekil 6.1 : AF tekniği için önerilen yeni protokolün T_m yineleme sayısı için Markov zinciri.

a) $T_m = 2$ durumu:

Özel olarak $T_m = 2$ iken AF tekniği için önerilen protokol şu şekilde açıklanmaktadır: Birinci zaman aralığında PT paketini PR'ye iletirken S1 ve S2 düğümleri PT'yi dinlemektedir. Buna göre x_p PT'den P_p gücü ile iletilen paket olmak üzere, birinci zaman aralığında her bir düğümde alınan paket DF tekniğindeki denklem (5.1) ile aynı olarak denklem (6.1)'de

$$\begin{aligned}
\mathbf{y}_{TR} &= \sqrt{P_p} h_{TR} \mathbf{x}_p + \mathbf{n}_{TR}, \\
\mathbf{y}_{T1} &= \sqrt{P_p} h_{T1} \mathbf{x}_p + \mathbf{n}_{T1}, \\
\mathbf{y}_{T2} &= \sqrt{P_p} h_{T2} \mathbf{x}_p + \mathbf{n}_{T2}
\end{aligned} \tag{6.1}$$

verilebilir. Burada h_{TR} , h_{T1} , h_{T2} sırasıyla PT→PR, T→S1 ve T→S2 kanalları arasındaki katsayılardır. Birinci zaman aralığında PT'den gönderilen paket PR'de başarılı alınmışsa, ikinci zaman aralığında önerilen protokol altına sermeli durumda çalışır ve SU'nun girişimi altında PT yeni paketini iletir. Eğer birinci zaman aralığının sonunda PR gelen paketi başarılı çözemezse diğer üç düğüme NACK mesajı göndermektedir. AF tekniğinde PT'den gönderilen paket ikinci zaman aralığında S1→PR ya da S2→PR kanallarının kalitesine göre S1 ya da S2'nin üzerinden işbirlikli durumda iletilir. İkinci zaman aralığında işbirlikli durumda iletim yapacak olan düğüm pasif röle gibi davranıp PT'nin paketini kuvvetlendirip PR'ye iletir.

Aşağıdaki denklemlerde PT'nin paketinin S1 düğümü üzerinden kuvvetlendirilip aktarıldığı varsayılmaktadır. Denklemlerde 1 indisi 2 olarak değiştirilirse S2 düğümü üzerinden kuvvetlendirilip aktarıldığı durumdaki sonuçlar elde edilmektedir. P_p PT'nin P_s de S1 ve S2 düğümlerinin iletim gücü olduğuna göre kuvvetlendirme kazancı,

$$G = \sqrt{\frac{P_s}{P_p |h_{T1}|^2 + N_0}} \tag{6.2}$$

denklem (6.2)'deki gibi olmaktadır. İşbirlikli durumda PR'de alınann işaret denklem (6.3)'te

$$\mathbf{y}_{1R} = G h_{1R} \mathbf{y}_{T1} + \mathbf{n}_R \tag{6.3}$$

şeklinde gösterilmektedir. Denklem (6.4)'te S1 düğümü üzerinden gelen paket PR'de,

$$\mathbf{y}_{1R} = \sqrt{\frac{P_s}{P_p |h_{T1}|^2 + N_0}} \sqrt{P_p} h_{T1} h_{1R} \mathbf{x}_p + \sqrt{\frac{P_s}{P_p |h_{T1}|^2 + N_0}} h_{1R} \mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_R \tag{6.4}$$

şeklinde alınmaktadır. \mathbf{n}_1 ve \mathbf{n}_R sırasıyla S1 ve PR düğümlerindeki AWGN vektörleridir.

AF tekniği için önerilen protokol $T_m = 2$ iken Çizelge 6.1'de gösterilen dört durum ile açıklanmaktadır.

Çizelge 6.1 : AF tekniği için önerilen protokolün durumları.

Durum	PU	SU
S_1	Yeni paket	Sessiz
S_2	Yeni paket	Kendi paketi
S_3	Yeniden iletim	Sessiz
S_4	Sessiz	PU'nun paketi

Durum S_1 : PT'nin yeni paket ilettiği durumdur. SU sessizken, PT kendi paketini tek başına iletir. Eğer PR'den, ACK mesajı alınırsa bir sonraki durum S_2 , NACK mesajı alınırsa bir sonraki durum S_4 olur.

Durum S_2 : Altına sermeli durumdur. Girişim etkisi altında, SU kendi paketini iletirken, PT yeni paket iletir. Eğer PR'den ACK mesajı alınırsa bir sonraki durum S_1 , NACK mesajı alınırsa S_5 olur.

Durum S_3 : PT'nin tek başına ilettiği durumdur. SU sessizken, PT başarısız olan paketini yeniden iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S_1 olur.

Durum S_4 : İşbirlikli durumdur. PT sessizken SU düğümlelerinden biri PT'nin başarısız olmuş paketini kuvvetlendirip yeniden iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S_1 olur.

AF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ iken Markov zinciri, durum geçiş olasılıkları ile Şekil 6.2'de gösterilmektedir. Burada durum geçiş olasılıkları şu şekilde tanımlanmaktadır:

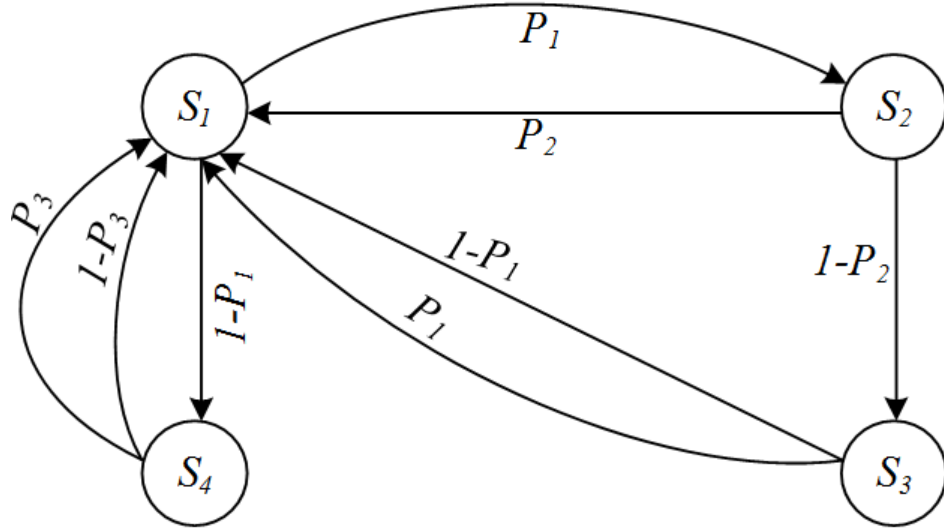
P_1 : PT→PR kanalından paketin başarılı iletilmesi olasılığı,

P_2 : S_1 →PR ya da S_2 →PR kanallarının oluşturduğu girişim altında PT→PR kanalından iletilen paketin başarılı olması olasılığı,

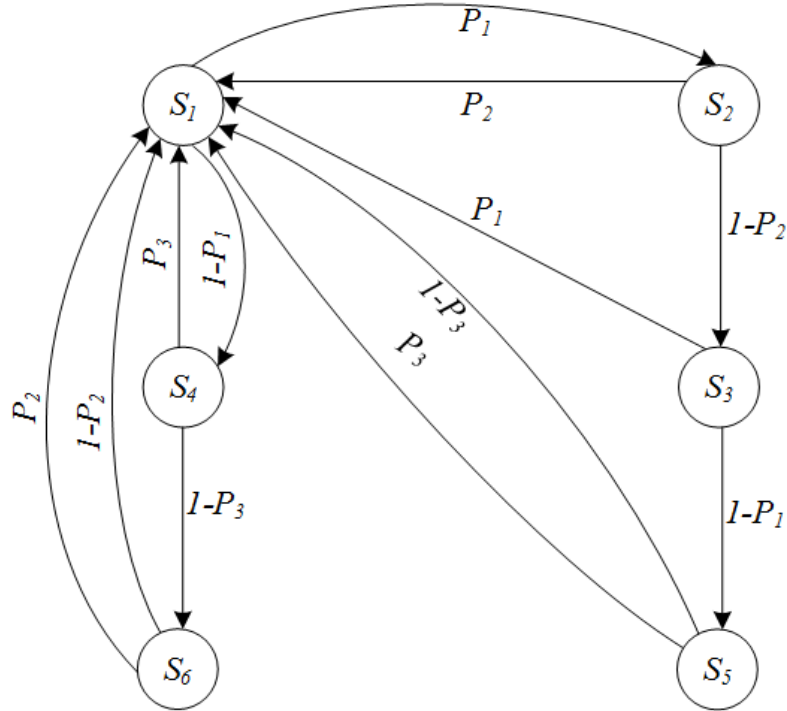
P_3 : PT→PR kanalından paketin iletilememesi ve aynı paketin S_1 ya da S_2 düğümleri üzerinden kuvvetlendirilip iletilmesi olasılığı.

b) $T_m = 3$ durumu:

Benzer şekilde $T_m = 3$ iken AF tekniğinde önerilen protokol altı durumla gösterilir. S_1 ve S_2 durumları $T_m = 2$ ile aynıdır ve kalan durumlar şu şekilde açıklanır:



Şekil 6.2 : AF tekniği için önerilen protokolün $T_m = 2$ iken Markov zinciri.



Şekil 6.3 : AF tekniği için önerilen protokolün $T_m = 3$ iken Markov zinciri.

Durum S_3 : PT'nin yeni paket ilettiği durumdur. SU sessizken, PT kendi paketini tek başına iletir. PR'den ACK gelirse bir sonraki durum S_1 olur. Eğer NACK gelirse bir sonraki durum S_5 olur ve PT'nin paketi S_1 ya da S_2 düğümleri üzerinde kuvvetlendirilip yeniden iletilir.

Durum S_4 : İşbirlikli durumdur. PT sessizken SU düğümlerinden biri PT'nin başarısız olmuş paketini kuvvetlendirip yeniden iletir. PR'den ACK gelirse bir sonraki durum S_1 olur. Eğer NACK gelirse bir sonraki durum S_6 olur.

Durum S₅: İşbirlikli durumdur. PT sessizken SU düğümlerinden biri PT'nin başarısız olmuş paketini kuvvetlendirip yeniden iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S₁ olur.

Durum S₆: Altına sermeli durumdur. Girişim etkisi altında, PT başarısız olan paketini yeniden iletirken SU kendi paketini iletir. PR'den gelen ACK/NACK geri bildirimlerinden bağımsız olarak bir sonraki durum S₁ olur.

AF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ iken tanımlanan durum geçiş olasılıkları $T_m = 3$ iken Şekil 6.3'te verilen Markov zincirinde de aynen geçerlidir.

6.2 Servis Kesilme Olasılığı ve Verim Analizi

Bu alt bölümde AF tekniğinde $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ için birincil ve ikincil kullanıcıların ayrı ayrı servis kesilme olasılıkları hesaplanıp verim analizleri yapılacaktır.

AF tekniğinde SU'nun girişimi altında ve SU'nun girişimi yokken kanallar için erişilebilir hız DF tekniğinde sırasıyla elde edilen denklem (5.4) ve denklem (5.6) ifadelerinden hesaplanır. PT→S1→PR arasındaki kanallar denklem (6.4)'ten de görüldüğü üzere Rayleigh sönümlenmeli olarak modellenemez. Bu nedenle denklem (6.5)'te PR'nin çıkışındaki anlık SNR değeri

$$SNR_{PR} = \frac{\frac{P_p|h_{T1}|^2}{N_0} \frac{P_s|h_{1R}|^2}{N_0}}{\frac{P_p|h_{T1}|^2}{N_0} + \frac{P_s|h_{1R}|^2}{N_0} + 1} \quad (6.5)$$

olarak hesaplanabilir [33]. PR'nin kanal katsayılarını bildiği ve kanal katsayılarının genliklerinin karelerinin üstel dağılımlı olduğu bilindiğine göre AF tekniğinde işbirlikli durumlarda S1 düğümü üzerinden PT→PR'ye olan kanal için erişilebilir hız,

$$\begin{aligned} R_{AF} &= \log_2 \left(1 + \frac{\frac{P_p|h_{T1}|^2}{N_0} \frac{P_s|h_{1R}|^2}{N_0}}{\frac{P_p|h_{T1}|^2}{N_0} + \frac{P_s|h_{1R}|^2}{N_0} + 1} \right) \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2 + 1} \right) \\ &= \log_2(1 + \gamma) \end{aligned} \quad (6.6)$$

denklem (6.6)'daki gibi hesaplanır. Burada $\gamma_1 = P_p|h_{T1}|^2/N_0$ ve $\gamma_2 = P_s|h_{1R}|^2/N_0$ olmak üzere γ fonksiyonu,

$$\gamma = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2 + 1} \quad (6.7)$$

denklem (6.7)'de tanımlanmaktadır.

Verim, iletim sayısı başına başarılı iletilen paket sayısı olarak tanımlanmak üzere sistem modelindeki $PT \rightarrow PR$, $PT \rightarrow S1$, $PT \rightarrow S2$, $S1 \rightarrow PR$, $S2 \rightarrow PR$ ve $S1 \leftrightarrow S2$ kanallarının servis kesilme olasılıklarına bağlıdır. SU'nun PU'ya ya da PU'nun SU'ya girişimi yokken bu kanalların servis kesilme olasılıkları, denklem (5.8)'de verilenlerle aynıdır. PU'nun verimi aynı zamanda işbirlikli durumlarda S1 ya da S2 üzerinden PT'den PR'ye doğru olan kanalların servis kesilme olasılıklarına bağlıdır. Buna göre denklem (6.8)'de bu kanalların servis kesilme olasılığı,

$$P_{AF} = Pr(R_{AF} < R_p) = Pr(\gamma < 2^{R_p} - 1) \quad (6.8)$$

olarak yazılır. γ_1 ve γ_2 sırasıyla $\frac{1}{\lambda_{\gamma_1}}$ ve $\frac{1}{\lambda_{\gamma_2}}$ parametreleri ile üstel dağılıma sahiptir. γ_1 ve γ_2 bağımsızken, $F_{\gamma_1 \gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2)$ olasılık dağılım işlevi (CDF) olmak üzere aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\begin{aligned} F_{\gamma}(\gamma_{th} | \frac{1}{\lambda_{\gamma_1}}, \frac{1}{\lambda_{\gamma_2}}) &= \int_0^{\infty} Pr(\frac{\gamma_1 z}{\gamma_1 + z + 1} \leq \gamma_{th}) f_{\gamma_2}(z) dz \\ &= \int_0^{\gamma_{th}} Pr(\gamma_1 \geq \frac{\gamma_{th} z + \gamma_{th}}{z - \gamma_{th}}) f_{\gamma_2}(z) dz + \int_{\gamma_{th}}^{\infty} Pr(\gamma_1 \leq \frac{\gamma_{th} z + \gamma_{th}}{z - \gamma_{th}}) f_{\gamma_2}(z) dz \\ &= I_1 + I_2. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Denklem (6.9)'dan yararlanarak, denklem (6.10)

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^{\gamma_{th}} Pr(\gamma_1 \geq \frac{\gamma_{th} z + \gamma_{th}}{z - \gamma_{th}}) f_{\gamma_2}(z) dz \\ &= \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(z) dz \\ &= 1 - e^{-\gamma_{th} \lambda_{\gamma_2}} \end{aligned} \quad (6.10)$$

ve denklem (6.11)

$$\begin{aligned}
I_2 &= \int_{\gamma_{th}}^{\infty} Pr(\gamma_1 \leq \frac{\gamma_{th}z + \gamma_{th}}{z - \gamma_{th}}) f_{\gamma_2}(z) dz \\
&= \lambda_{\gamma_2} \int_{\gamma_{th}}^{\infty} (1 - e^{-\lambda_{\gamma_1} \frac{\gamma_{th}z + \gamma_{th}}{z - \gamma_{th}}}) e^{-\gamma_{th} \lambda_{\gamma_2} z} dz \\
&= e^{-\gamma_{th} \lambda_{\gamma_2}} - \lambda_{\gamma_2} e^{-\gamma_{th}(\lambda_{\gamma_1} + \lambda_{\gamma_2})} \int_0^{\infty} e^{-(\frac{\lambda_{\gamma_1}(\gamma_{th}^2 + \gamma_{th})}{z} + z \lambda_{\gamma_2})} dz \\
&= e^{-\gamma_{th} \lambda_{\gamma_2}} - 2\sqrt{\lambda_{\gamma_1} \lambda_{\gamma_2} (\gamma_{th}^2 + \gamma_{th})} e^{-\gamma_{th}(\lambda_{\gamma_1} + \lambda_{\gamma_2})} K_1(2\sqrt{\lambda_{\gamma_1} \lambda_{\gamma_2} (\gamma_{th}^2 + \gamma_{th})}) \quad (6.11)
\end{aligned}$$

olarak elde edilir [23]. Burada $K_1(\cdot)$ ikinci tür birinci dereceden Bessel işlevidir. Buna göre γ 'nın olasılık dağılım işlevi denklem (6.12)'deki gibi,

$$F_{\gamma}(\gamma_{th} | \frac{1}{\lambda_{\gamma_1}}, \frac{1}{\lambda_{\gamma_2}}) = 1 - 2\sqrt{\lambda_{\gamma_1} \lambda_{\gamma_2} (\gamma_{th}^2 + \gamma_{th})} e^{-\gamma_{th}(\lambda_{\gamma_1} + \lambda_{\gamma_2})} K_1(2\sqrt{\lambda_{\gamma_1} \lambda_{\gamma_2} (\gamma_{th}^2 + \gamma_{th})}) \quad (6.12)$$

olup burada $\gamma_{th} = 2^{R_p} - 1$, $\lambda_{\gamma_1} = d_{\gamma_1}^V$ ve $\lambda_{\gamma_2} = d_{\gamma_2}^V$ olmak üzere $F_{\gamma}(\gamma_{th}) = P_{AF}$ olur.

6.2.1 Birincil kullanıcı

Bu bölümde bir önceki alt bölümde anlatılan açıklamalar ışığında birincil kullanıcı için $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ iken verim analizi yapılacaktır.

a) $T_m = 2$ durumu:

$T_m = 2$ için Şekil 6.2 ve $T_m = 3$ için Şekil 6.3'teki Markov zincirleri ile gösterilen protokollerin kararlı durum geçiş olasılıkları,

$$\begin{aligned}
P_1 &= 1 - P_{TR}, \\
P_2 &= 1 - P_{TR}^I, \\
P_3 &= 1 - P_{AF} \quad (6.13)
\end{aligned}$$

denklem (6.13)'teki gibi bulunur. Bu eşitliklerin sağ taraflarındaki P_{TR} , P_{TR}^I ve P_{AF} olasılıkları denklem (5.8), denklem (5.9) ve denklem (6.12)'de verilmektedir.

Önerilen protokolün Şekil 6.2'deki Markov zinciri yardımıyla kararlı durum olasılıkları,

$$\begin{aligned}
P(S_1) &= P_2P(S_2) + P(S_3) + P(S_4), \\
P(S_2) &= P_1P(S_1), \\
P(S_3) &= (1 - P_2)P(S_2), \\
P(S_4) &= (1 - P_1)P(S_1), \\
P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) + P(S_4) &= 1
\end{aligned} \tag{6.14}$$

denklem (6.14)'ten

$$\begin{aligned}
P(S_1) &= 1/D, \\
P(S_2) &= P_1/D, \\
P(S_3) &= P_1(1 - P_2)/D, \\
P(S_4) &= (1 - P_1)/D
\end{aligned} \tag{6.15}$$

denklem (6.15) olarak hesaplanır. Bu eşitliklerde $D = 2 + P_1 - P_1P_2$ 'dir.

PU'nun paketinin S_1 ve S_3 durumlarında başarılı iletilmesi olasılığı P_1 , S_2 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_2 ve S_4 durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_3 'tür. Buna göre AF tekniği için önerilen protokolde PU'nun verimi,

$$\begin{aligned}
\eta_{P_A} &= P_1P(S_1) + P_2P(S_2) + P_1P(S_3) + P_3P(S_4) \\
&= \frac{P_1(1 + P_2 + P_1 - P_1P_2) + P_3(1 - P_1)}{2 + P_1 - P_1P_2}
\end{aligned} \tag{6.16}$$

denklem (6.16)'daki gibi bulunur.

b) $T_m = 3$ durumu:

Benzer şekilde $T_m = 3$ iken Şekil 6.3'te gösterilen Markov zinciri yardımıyla kararlı durum olasılıkları

$$\begin{aligned}
P(S_1) &= P_2P(S_2) + P_1P(S_3) + P_3P(S_4) + P(S_5) + P(S_6), \\
P(S_2) &= P_1P(S_1), \\
P(S_3) &= (1 - P_2)P(S_2), \\
P(S_4) &= (1 - P_1)P(S_1), \\
P(S_5) &= (1 - P_1)P(S_3), \\
P(S_6) &= (1 - P_3)P(S_4), \\
P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) + P(S_4) + P(S_5) + P(S_6) &= 1 \tag{6.17}
\end{aligned}$$

denklem (6.17) yardımıyla

$$\begin{aligned}
P(S_1) &= 1/D, \\
P(S_2) &= P_1/D, \\
P(S_3) &= P_1(1 - P_2)/D, \\
P(S_4) &= (1 - P_1)/D, \\
P(S_5) &= P_1(1 - P_1)(1 - P_2)/D, \\
P(S_6) &= (1 - P_1)(1 - P_3)/D \tag{6.18}
\end{aligned}$$

denklem (6.18) olarak hesaplanır. Bu eşitliklerde $D = 3 - P_3 + P_1(1 - P_1 - 2P_2 + P_1P_2 + P_3)$ 'tür.

PU'nun paketinin S_1 ve S_3 durumlarında başarılı iletilmesi olasılığı P_1 , S_2 ve S_6 durumlarında başarılı iletilmesi olasılığı P_2 ve S_4 ve S_5 durumlarında başarılı iletilmesi olasılığı P_3 'tür. Buna göre denklem (6.19)'daki AF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 3$ iken PU'nun verimi,

$$\begin{aligned}
\eta_{P_A} &= P_1P(S_1) + P_2P(S_2) + P_1P(S_3) + P_3P(S_4) + P_3P(S_5) + P_2P(S_6) \\
&= \frac{P_1 + P_2 + P_3 - P_2P_3 + P_1^2(1 - P_2 - P_3 + P_2P_3)}{D} \tag{6.19}
\end{aligned}$$

şeklinde elde edilir. Burada $D = 3 - P_3 + P_1(1 - P_1 - 2P_2 + P_1P_2 + P_3)$ 'tür.

6.2.2 İkincil kullanıcı

Bu bölümde önceki alt bölümlerde açıklananlar ışığında ikincil kullanıcı için $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ iken verim analizi yapılacaktır.

AF tekniği için önerilen protokolde SU paketini DF tekniğinde olduğu gibi sadece altına sermeli durumlarda PU'nun girişimi altında iletmektedir. $S_1 \leftrightarrow S_2$ kanalının servis kesilme olasılığı P_S^I da DF tekniğinde (5.19)'da gösterildiği gibi hesaplanır.

a) $T_m = 2$ durumu:

SU sadece altına sermeli durumlarda kendi paketini ilettiğine göre, SU'nun paketinin bu durumlarda başarılı iletilmesi olasılığı $1 - P_S^I$ 'dir. Buna göre AF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ iken SU sadece S_2 durumunda paketini iletmektedir. Buna göre SU'nun verimi Şekil 5.2'deki Markov zinciri ve denklem (5.19) yardımıyla,

$$\begin{aligned}\eta_S &= (1 - P_S^I)P(S_2) \\ &= \frac{(1 - P_S^I)P_1}{D}\end{aligned}\quad (6.20)$$

denklem (6.20) şeklinde hesaplanır. Burada $D = 2 + P_1 - P_1P_2$ 'dir.

b) $T_m = 3$ durumu:

Benzer şekilde $T_m = 3$ iken SU sadece S_2 ve S_6 durumlarında paketini iletmektedir. Önerilen protokolde SU'nun verimi Şekil 5.3'teki Markov zinciri ve denklem (5.19) yardımıyla,

$$\begin{aligned}\eta_S &= (1 - P_S^I)(P(S_2) + P(S_6)) \\ &= \frac{(1 - P_S^I)(1 - P_3 + P_1P_3)}{D}\end{aligned}\quad (6.21)$$

denklem (6.21)'deki gibi bulunur. Burada $D = 3 - P_3 + P_1(1 - P_1 - 2P_2 + P_1P_2 + P_3)$ 'tür.

6.3 Referans Modeller

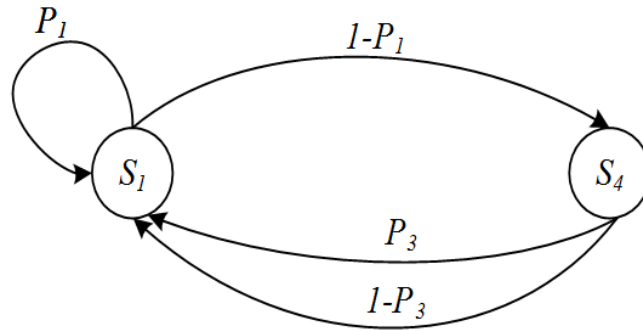
AF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ iken karşılaştırma yapabilmek için Bölüm 5'tekine benzer şekilde PU'ya klasik model, yalnız işbirlikli model ve yalnız altına sermeli model olmak üzere 3 farklı referans model oluşturulmuştur. Referans modellerdeki maksimum yinleme sayısı $T_m = 2$ 'dir ve bu modellerdeki bütün durumlar ve kararlı durum geçiş olasılıkları alt bölüm 5.1'de anlatıldığı gibidir.

Bu alt bölümde üç farklı referans model için iletim protokolleri anlatılacak ve her biri için verim analizi yapılacaktır. Sonuçlar AF tekniği için önerilen protokolle karşılaştırılacaktır.

6.3.1 Klasik model

AF tekniği için önerilen klasik model, DF tekniği için alt bölüm 5.3.1'de anlatılan klasik modelle aynıdır.

6.3.2 Yalnız işbirlikli model



Şekil 6.4 : AF tekniğinde yalnız işbirlikli model için Markov zinciri.

AF tekniğinde yalnız işbirlikli model Şekil 6.4'teki Markov zinciriyle gösterilmektedir. Yalnız işbirlikli modelde S1 ve S2 düğümlerinden oluşan SU ile PT ve PR düğümlerinden oluşan PU vardır. S1 ve S2 düğümleri kendi paketlerini iletmeyip pasif röle gibi davranırken, PT paketini PR'ye en fazla iki yinleme sayısı ile iletmektedir. Birinci zaman aralığında PT'nin paketi başarısız olursa, ikinci zaman aralığında S1 ya da S2 düğümü üzerinden PT'nin paketi kuvvetlendirilip PR'ye iletir. AF tekniğinde yalnız işbirlikli modelin iletim protokolü iki durum ile açıklanmaktadır:

Durum S1: PT paketini PR'ye iletir. Eğer PR ACK gönderirse bir sonraki durum yine S1 olurken, NACK gönderirse bir sonraki durum S4 olur.

Durum S₄: S₁ ya da S₂ düğümleri PT'nin birinci zaman aralığında başarısız olmuş paketini kuvvetlendirip yeniden iletir. PR'den gelen ACK ya da NACK mesajlarından bağımsız olarak bir sonraki durum S₁ olur.

Durum geçiş olasılıkları şu şekilde tanımlanmaktadır:

P_1 : PT→PR kanalından paketin başarılı iletilmesi olasılığı,

P_3 : PT→PR kanalından paketin iletilmemesi ve aynı paketin S₁ ya da S₂ düğümü üzerinden kuvvetlendirilip iletilmesi olasılığı.

AF tekniğinde yalnız işbirlikli model için Şekil 6.4'teki Markov zinciri yardımıyla kararlı durum olasılıkları

$$\begin{aligned} P(S_1) &= P_1 P(S_1) + P(S_4), \\ P(S_4) &= (1 - P_1) P(S_1), \\ P(S_1) + P(S_4) &= 1 \end{aligned} \quad (6.22)$$

denklem (6.22) yardımıyla

$$\begin{aligned} P(S_1) &= 1 / (2 - P_1), \\ P(S_4) &= (1 - P_1) / (2 - P_1) \end{aligned} \quad (6.23)$$

denklem (6.23) olarak hesaplanır.

PU'nun paketinin S₁ durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_1 , S₄ durumunda başarılı iletilmesi olasılığı P_3 'tür. Buna göre denklem (6.24)'te AF tekniği için önerilen protokolde yalnız işbirlikli model için PU'nun verimi,

$$\begin{aligned} \eta_{P_u} &= P_1 P(S_1) + P_3 P(S_4) \\ &= \frac{P_1 + P_3 - P_1 P_3}{2 - P_1} \end{aligned} \quad (6.24)$$

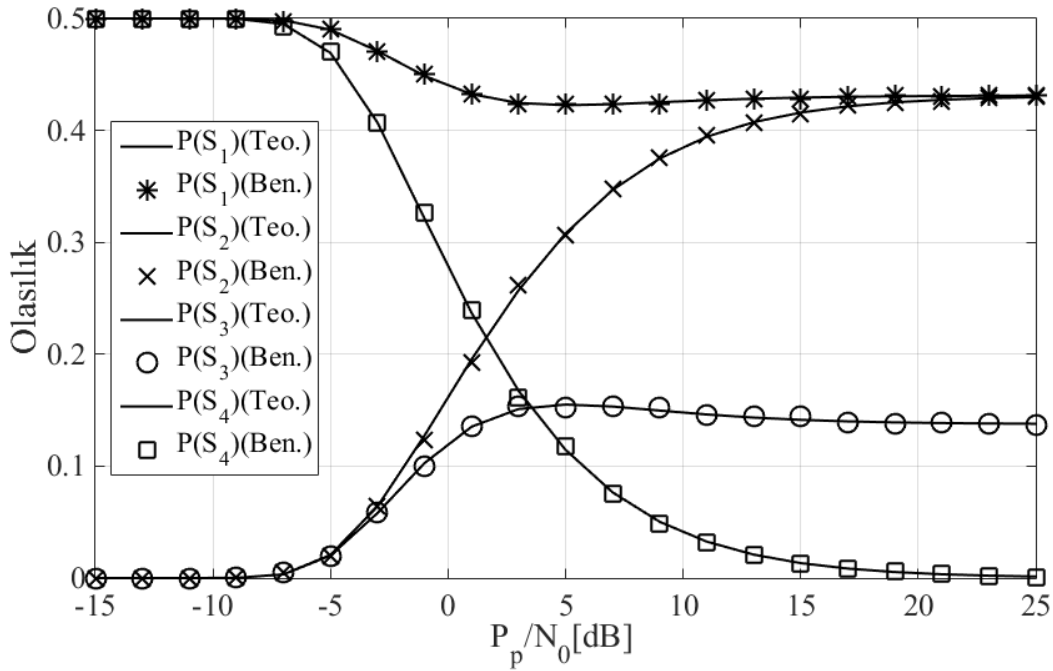
olarak hesaplanır.

6.3.3 Yalnız altına sermeli model

AF tekniği için önerilen yalnız altına sermeli model, Alt Bölüm 5.3.3'te DF tekniği için verilen yalnız altına sermeli modelle aynıdır.

6.4 Başarım Değerlendirmesi

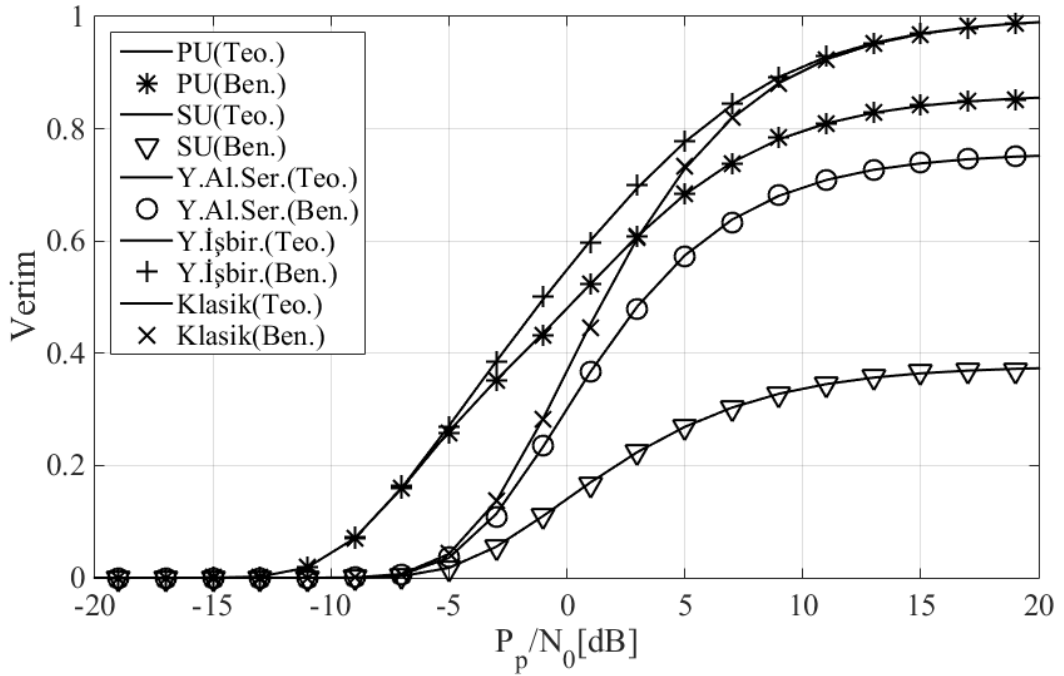
Bu alt bölümde, AF tekniği için önerilen protokol ve referans modeller için önceki bölümlerde yapılan verim analizlerinin kuramsal sonuçları ve bilgisayar benzetim sonuçları verilmektedir.



Şekil 6.5 : AF tekniği için önerilen protokolde kararlı durum olasılıkları.

Başarım değerlendirmelerinde AF tekniği için önerilen protokolde ve referans modellerde $PT \rightarrow PR$ ve $S1 \leftrightarrow S2$ kanalları arasındaki uzaklıklar sırasıyla $d_{TR} = 1$ ve $d_S = 0.2$ varsayılmaktadır. Benzer şekilde, yol kaybı katsayısı $\nu = 4$, AGN örneklerinin varyansı $N_0 = 1$ ve istenen hızlar $R_p = 1$, $R_s = 0.25$ olarak kabul edilmektedir. AF tekniğinde $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ için önerilen protokolün altına sermeli durumlarında ve verilen referans modeller içinden yalnız altına serme modelinde, PU'nun servis kalitesini korumak için girişim eşiği olarak $P_s = P_p - 15$ dB alınmıştır. Farklı olarak, önerilen protokolün işbirlikli durumlarında ve diğer referans modellerde ise $P_s = P_p$ kabul edilmektedir.

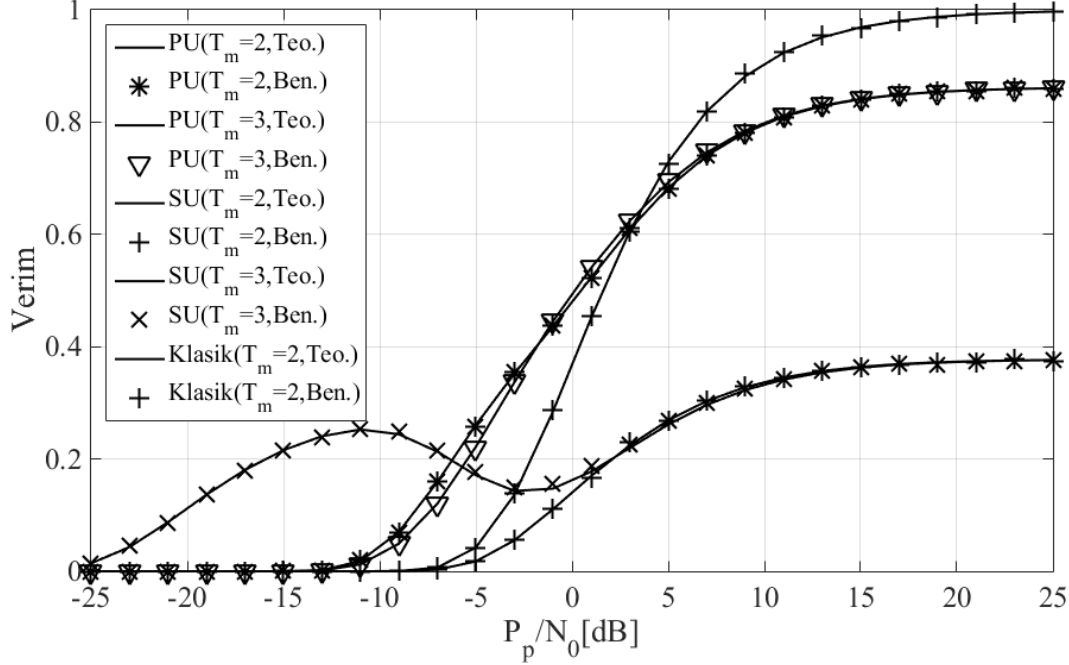
Şekil 6.5, (6.15)'te hesaplanan kararlı durum olasılıklarının $SNR = P_p/N_0$ 'a göre değişimini göstermektedir. Kendi içerisinde Bölüm 5'te incelenen DF tekniği için önerilen protokolle benzer sonuçlar göstermesine rağmen iki protokolün birlikte yapılan karşılaştırmalarında farklılıklar gözlenmektedir. Çok düşük SNR değerlerinde, PR ile S1 ve S2 düğümlerinin PT'nin paketini çözmemesi nedeniyle önerilen protokol altına sermeli durumda çalışmaktadır. Artan SNR değerleriyle S1 ya da S2 düğümlerinin pasif röle gibi davranıp PU'nun paketini kuvvetlendirip iletmesi ile protokol işbirlikli durumda çalışmaktadır. SNR değerinin biraz daha artmasıyla PR birinci zaman aralığında gelen paketi başarılı çözmesi ile protokol ikinci zaman aralığında yine altına sermeli durumda çalışmaktadır.



Şekil 6.6 : AF tekniği için önerilen protokolün PU ve SU verimi ile referans modellerin PU verimlerinin karşılaştırılması ($T_m = 2$).

AF tekniği için önerilen protokolde $T_m = 2$ iken PU ve SU verimleri ile referans modellerin PU verimi Şekil 6.6'da gösterilmektedir. Yalnız işbirlikli model en iyi başarıma sahipken, yalnız altına sermeli model en kötü başarıma sahiptir. Beklenildiği gibi, önerilen protokolde PU'nun verimi bu iki model arasında kalmaktadır. Düşük SNR değerlerinde, S1 ve S2 düğümlerinin işbirliği sayesinde önerilen protokolün verimi klasik modelin verimine göre oldukça yüksektir. Ayrıca, Şekil 6.5'ten görüldüğü gibi PU'nun veriminin sıfır olduğu çok düşük SNR değerlerinde, önerilen protokolün S_4 durumunda çalışması sonucu SU'nun verimi 0.3'e yaklaşmaktadır. Artan SNR değerleriyle birlikte başlangıçta SU'nun işbirlikli durumda kendi paketini

ilememesi sonucu verimi azalırken, sonrasında önerilen protokolün altına sermeli durumda çalışması ile kendi paketini iletip verimini 0.4'e kadar çıkarmaktadır. Yüksek SNR değerlerinde, önerilen protokolün ikinci zaman aralığında altına sermeli durumda çalışması sonucunda PU'nun verimi 0.85'e ulaşmaktadır.



Şekil 6.7 : AF tekniği için önerilen protokolün PU ve SU verimleri ($T_m = 2$ ve $T_m = 3$ için).

Ancak PU'nun verimindeki bu azalma SU'nun veriminin sıfıra doğru azalmasını önleyip 0.4 civarında sabit kalmasını sağlamıştır.

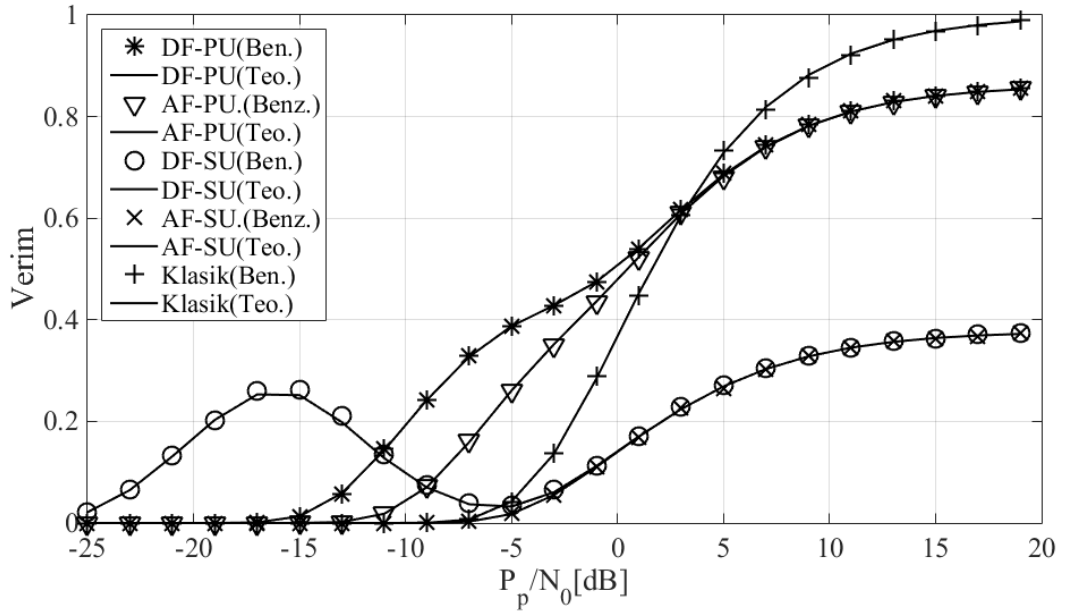
Şekil 6.7, AF tekniğinde önerilen protokolün $T_m = 2$ ve $T_m = 3$ için PU ve SU verimlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Her iki yinleme sayısı için de yüksek SNR'lerde verim aynı değerde iken, yinleme sayısının artması düşük SNR değerlerinde PU'nun veriminde çok düşük de olsa azalmaya neden olmaktadır. Yinleme sayısındaki artış önerilen protokole yeni altına sermeli durumlar oluşturduğu için çok düşük SNR değerlerinde SU'nun veriminde artış gözlenmektedir. Artan SNR değerleriyle birlikte SU'nun verimi her iki maksimum yinleme sayısı için de aynı değerdedir. Şekil 6.7'de görüldüğü gibi yinleme sayısındaki artış protokolün çalışmasını göz ardı edilebilecek seviyede kötüleştirilmiş ve düşük SNR değerlerinde klasik modelin üstünde verim elde etmeyi engellememiştir.

7. DF ve AF İÇİN ÖNERİLEN PROTOKOLLERİN BAŞARIM KARŞILAŞTIRMALARI

Bu bölümde, önceki bölümlerdeki DF ve AF teknikleri için önerilen protokollerde PU ve SU için verimler karşılaştırılacak ve literatürde var olan çalışmalardaki farklı modellerle başarımları karşılaştırılması yapılacaktır.

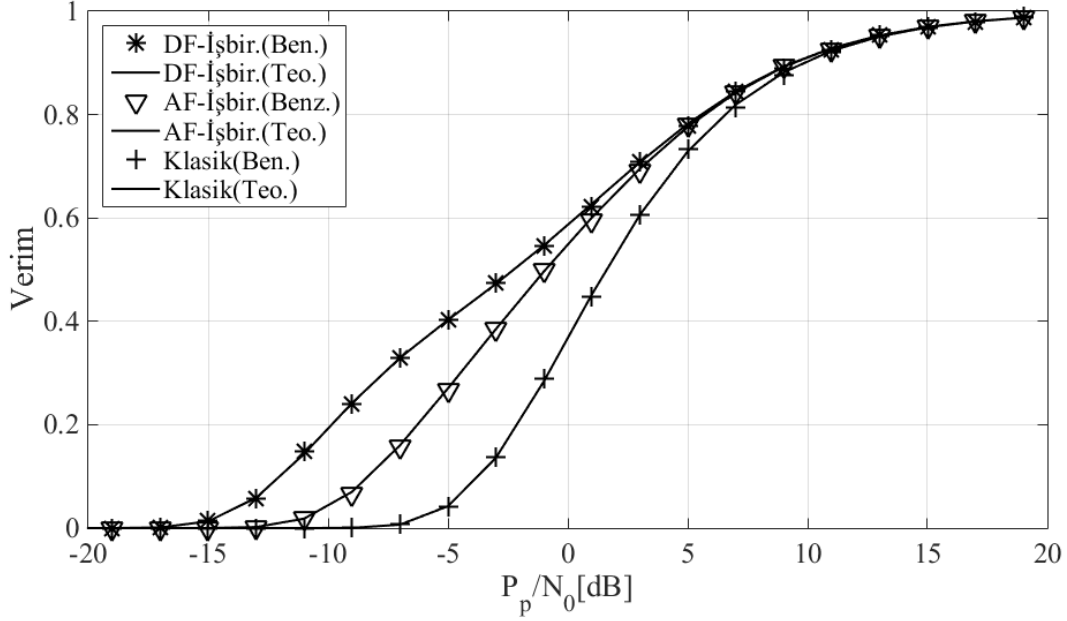
7.1 DF ve AF için Önerilen Protokollerin Başarım Karşılaştırması

Şekil 7.1'de $T_m = 2$ için DF ile AF teknikleri için önerilen protokollerde PU ve SU'nun verimleri gösterilmektedir. PT ve PR düğümleri arasındaki mesafe $d_{TR} = 1$, S1 ve S2 düğümleri arasındaki mesafe ise $d_S = 0.2$ iken PU için istenen hız $R_p = 1$, SU için istenen hız $R_s = 0.25$ alınmıştır. Önerilen protokollerin her ikisinde de altına sermeli durumlarda SU'nun gücü PU'nun gücünden 15 dB daha az iken; yalnız PU'nun iletim yaptığı ya da işbirlikli iletim yapılan durumlar için $P_s = P_p$ 'dir.



Şekil 7.1 : DF ve AF teknikleri için önerilen protokollerde PU ve SU verimleri. ($T_m = 2$)

DF tekniğine dayalı protokolde işbirlikli durumların olasılığı AF tekniğine dayalı protokole göre daha fazladır. Bu nedenle Şekil 7.1'den de görüldüğü gibi PU'nun verimi düşük $SNR = P_p/N_0$ değerlerinde DF tekniğine dayalı protokolde daha iyidir.



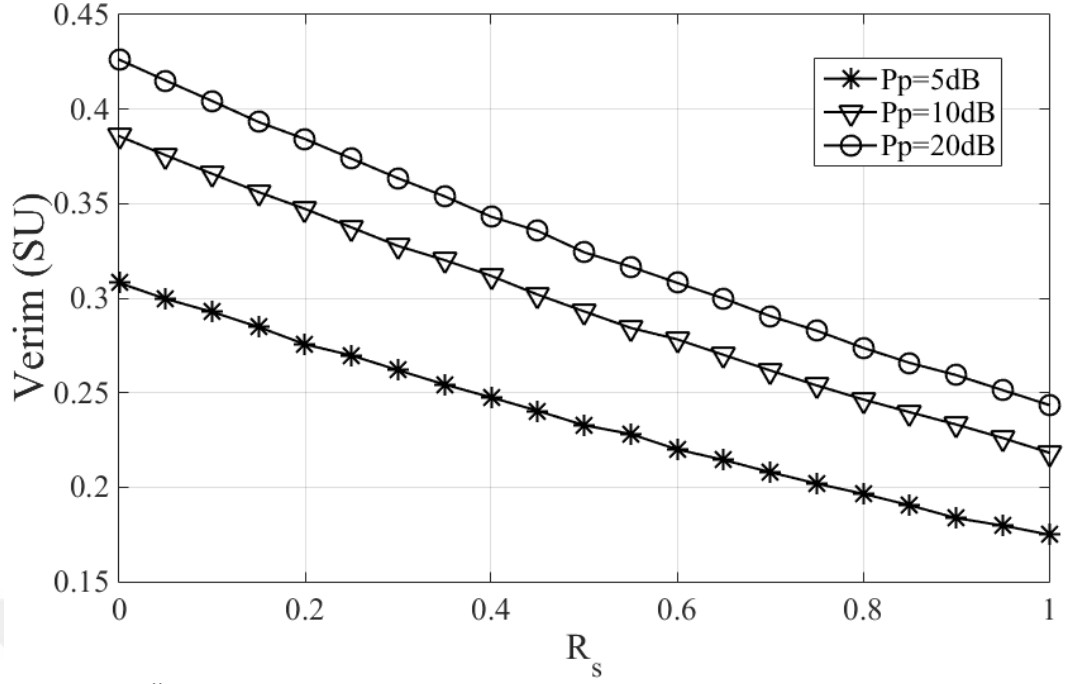
Şekil 7.2 : DF ve AF tekniklerinde yalnız işbirlikli modeller için PU'nun verimi.

Yüksek SNR değerlerinde her iki protokol de altına sermeli durumlarda çalışıldığı için verim aynıdır. Benzer şekilde her iki protokolde SU'nun verimi yüksek SNR'lerde aynı değerde kalırken, çok düşük SNR değerlerinde farklılık göstermektedir. DF tekniğine dayalı protokol çok düşük SNR'lerde altına sermeli durumda çalıştığı için SU'nun verimi sıfırdan farklı olmaktadır.

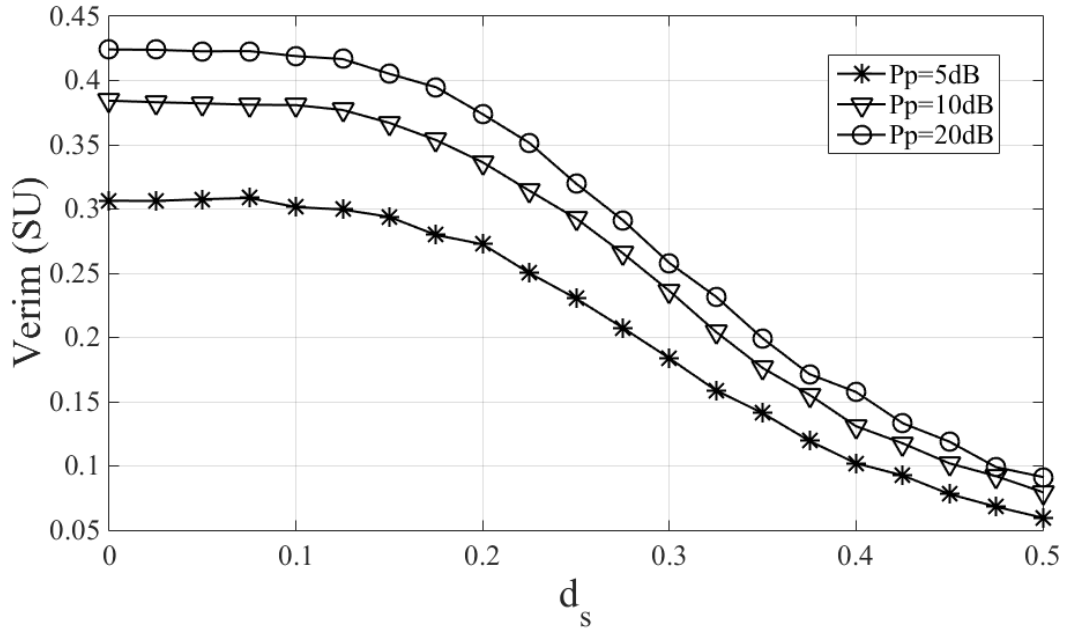
DF ve AF tekniklerine dayalı protokollerde PU'nun başarımlarını karşılaştırması için klasik model, yalnız altına sermeli model ve yalnız işbirlikli model olmak üzere 3 referans model göz önüne alınmıştır. Klasik model ve yalnız altına sermeli model için önceki bölümlerde anlatıldığı gibi her iki önerilen protokolde de aynı başarımların alınmasına rağmen yalnız işbirlikli modellerde elde edilen başarımlar farklıdır. Şekil 7.2, her iki protokolde de yalnız işbirlikli referans modellerin PU için verimlerini göstermektedir. Düşük SNR değerlerinde DF tekniğindeki referans model AF tekniğine göre ve klasik modele göre daha iyidir. Yüksek SNR'lerde PU verimi üç protokolde de aynıdır.

Bu tezde başarımların değerlendirilmesi yapılırken her iki protokol için de SU düğümleri arasındaki mesafe ve SU düğümlerinin istenilen hızı için belli sabit değerler alınmıştır. Bu değerlerin değişiminde PU'nun verimi etkilenmezken SU'nun verimi önemli derecede etkilenmektedir.

Şekil 7.3, Şekil 7.4 ve Şekil 7.5 hem DF için önerilen protokolde hem de AF için önerilen protokolde aynıdır. Şekil 7.3 ve Şekil 7.4, $R_p = 1$ ve $d_{TR} = 1$ iken SU'nun

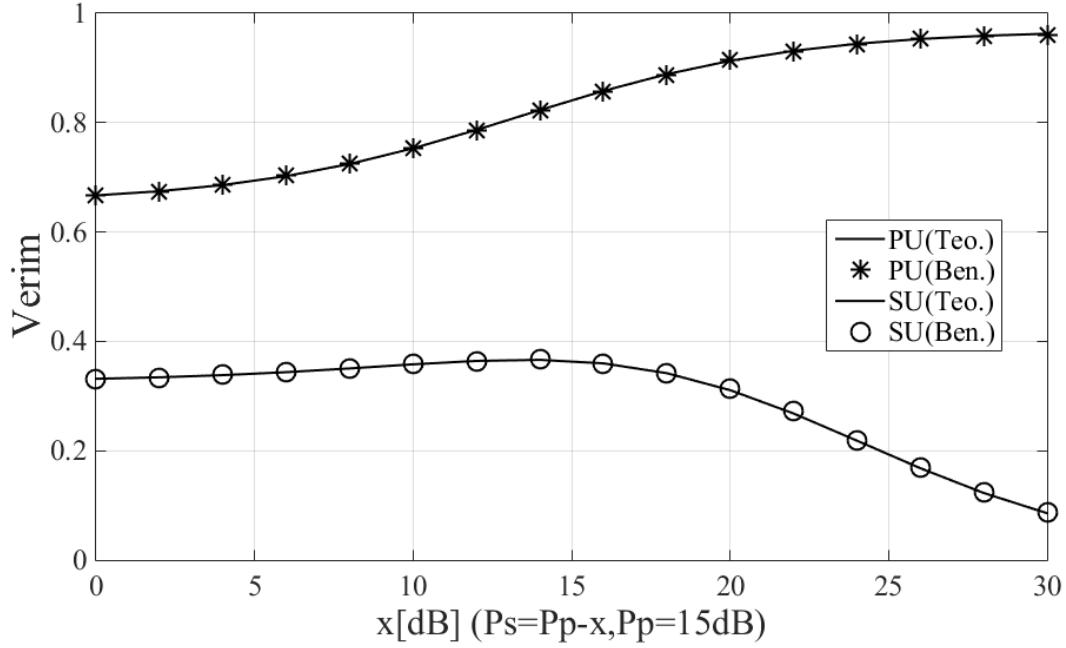


Şekil 7.3 : Önerilen protokollerde SU veriminin R_s 'ye göre değişimi ($R_p = 1$ iken).



Şekil 7.4 : Önerilen protokollerde SU'nun veriminin d_s 'ye göre değişimi.

veriminin sırasıyla SU'nun istenilen hızına (R_s) ve SU düğümleri arasındaki mesafeye (d_s) bağlı olarak değişimini göstermektedir. Şekil 7.3'ten de görüldüğü gibi farklı SNR değerlerinde R_s 1'e yaklaşırsa SU'nun başarımı kötüleşmektedir. Bu nedenle önerilen protokollerde $R_p = R_s = 1$ olması SU'nun veriminin azalmasına neden olmaktadır. SU'nun başarımında iyileşme sağlamak için R_s daha düşük bir değer alınmaktadır.



Şekil 7.5 : Önerilen protokollerde PU ve SU'nun veriminin girişim eşiğine göre değişimi.

Şekil 7.4'te ise farklı SNR'lerde artan d_S değeriyle SU'nun başarımı yaklaşık 0.2 değerinden sonra hızla kötüleşmektedir. Bu nedenle önerilen protokollerde SU düğümleri arasındaki mesafenin PU düğümleri arasındaki mesafe ile aynı olması SU'nun veriminin azalmasına neden olmaktadır. SU'nun başarımında iyileşme sağlamak için d_S daha düşük bir değer alınmalıdır.

Şekil 7.5, önerilen protokollerde $R_p = 1$, $R_s = 0.25$, $d_{TR} = 1$ ve $d_S = 0.2$ iken PU ve SU'nun verimlerinin altına sermeli durumlarda belirlenmiş olan girişim eşiğine göre değişimini göstermektedir. Her iki kullanıcının verimi girişim eşiği yaklaşık 15 dB seviyelerinde sabitken, artan girişim eşiği ile PU'nun verimi artmakta SU'nun verimi azalmaktadır. Bu nedenle PU'nun başarımında göz ardı edilebilir azalma ile SU'nun başarımındaki daha büyük azalmayı önlemek için girişim eşiği 15 dB seviyesinde belirlenebilir.

7.2 DF ve AF için Önerilen Protokollerin Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Başarım Karşılaştırması

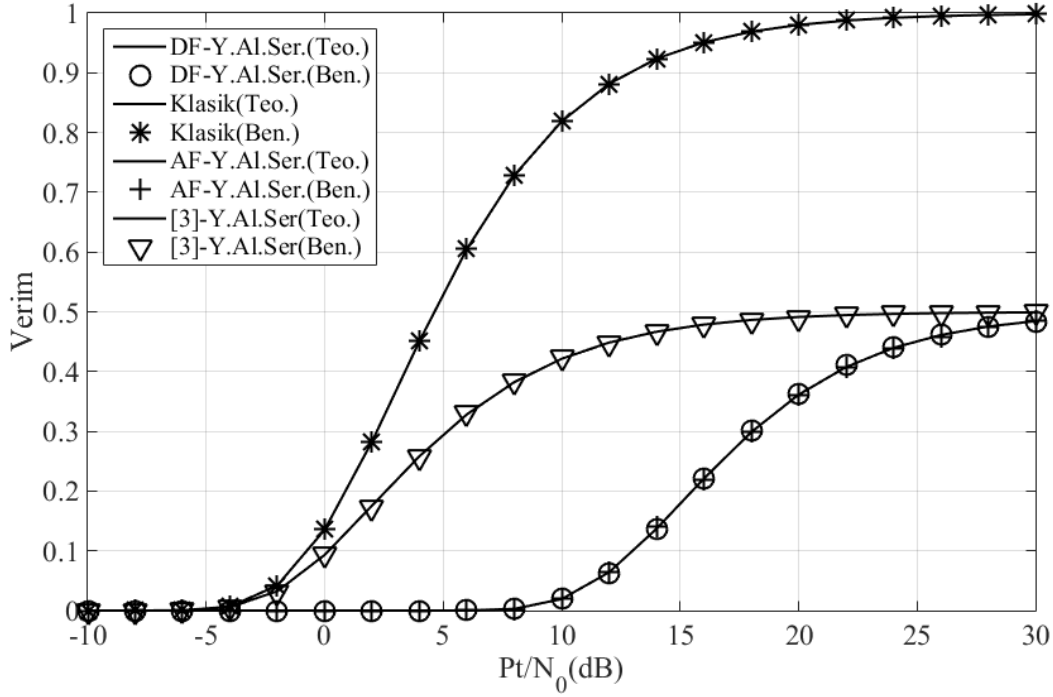
Bu bölümde Li ve diğ. (2012) çalışması ile DF ve AF tekniklerine dayalı protokollerin PU ve SU için verim analizleri yapılacaktır.

Li ve diğ. (2012) çalışmasında, ST verici düğümünden ve SR alıcı düğümünden oluşan SU ile ARQ tabanlı ve PT, PR düğümlerinden oluşan PU'nun oluşturduğu bilişsel radyo ağı üzerine çalışma yapılmış ve aktarım tekniği olarak DF kullanılmıştır. PT'nin başarısız olan paketi için maksimum iletim sayısı ≥ 2 için genelleştirilmiştir. Bu çalışmaya uygun olması açısından maksimum iletim sayısı 2 için olan sonuçlar kullanılmıştır. ST düğümü hem işbirlikli çalışarak PU'nun verimini arttırmak için PU'nun başarısız paketini iletirken; hem de PU'nun varlığında spektruma erişip PU'nun oluşturduğu girişimi yok ederek kendi paketini alıcısına iletebilmektedir. SU'nun işbirlikli ve erişim durumları diye adlandırılan iki modda çalışabilmesi SU için kredi/ceza modeline dayandırılmıştır. SU işbirlikli durumda çalışıp başarılı ilettiği her paket için kredi toplarken, erişim durumunda çalışıp kendi paketini ileterek ceza toplamaktadır. Kredi/ceza oranını hesaba katarak PU için verim, SU'nun olmadığı geleneksel durumdaki verim ile aynı tutulmaya çalışılmıştır. Li ve diğ. (2012) çalışmasında PT→PR, PT→ST, ST→PR, PT→SR ve ST→SR düğümleri arasındaki mesafeler sırasıyla, $d_1 = 1$, $d_2 = d_3 = 0.5$, $d_4 = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $d_5 = 0.5$ 'tir. Ayrıca PU ve SU için istenilen hızlar ile PU ve SU'nun güçleri sırasıyla $R_p = R_s = 1$ ve $P_p = P_s$ alınmaktadır.

DF ve AF tekniklerine dayalı olarak önerilen protokollerde ise düğümler arası mesafeler sırasıyla $d_{TR} = 1$, $d_{T1} = d_{T2} = d_{R1} = d_{R2} = 0.51$ ve $d_S = 0.2$ alınmıştır. Bunun yanında PU ve SU için istenen hızlar $R_p = 1$ ve $R_s = 0.25$ 'dir. Bu tezde DF ve AF teknikleri için önerilen protokollerde PU altına sermeli durumlarda SU'nun girişimi altında çalıştığı için bu girişim etkisini azaltabilmek adına girişim eşiği olarak PU ve SU'nun güçleri arasındaki fark 15 dB alınmıştır. Yalnız PU'nun ilettiği durumda ve işbirlikli durumlarda ise $P_p = P_s$ 'dir.

Karşılaştırma yapabilmek için önerilen protokollerde önce istenilen hızlar $R_p = R_s = 1$ iken sonrasında $R_p = R_s = 0.25$ iken sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca her iki modelde de kullanıcıların toplam güçleri üzerinden başarımların karşılaştırması yapılmıştır. P_t toplam güç olmak üzere her iki önerilen protokol için altına sermeli durumlarda PU ve SU güçleri arasındaki fark 15 dB iken diğer durumlarda güçler eşit kabul edilmiştir. Benzer şekilde Li ve diğ. (2012) çalışmasında da PU ve SU güçleri eşit olarak alınmıştır. Ayrıca her iki çalışma için artan $SNR = P_t/N_0$ değerlerinde verim analizi yapılmıştır.

Önerilen protokollerin yalnız altına sermeli durumlarının Li ve diğ. (2012) çalışmasındaki protokolün erişim durumu ile karşılaştırması Şekil 7.6’da verilmiştir.

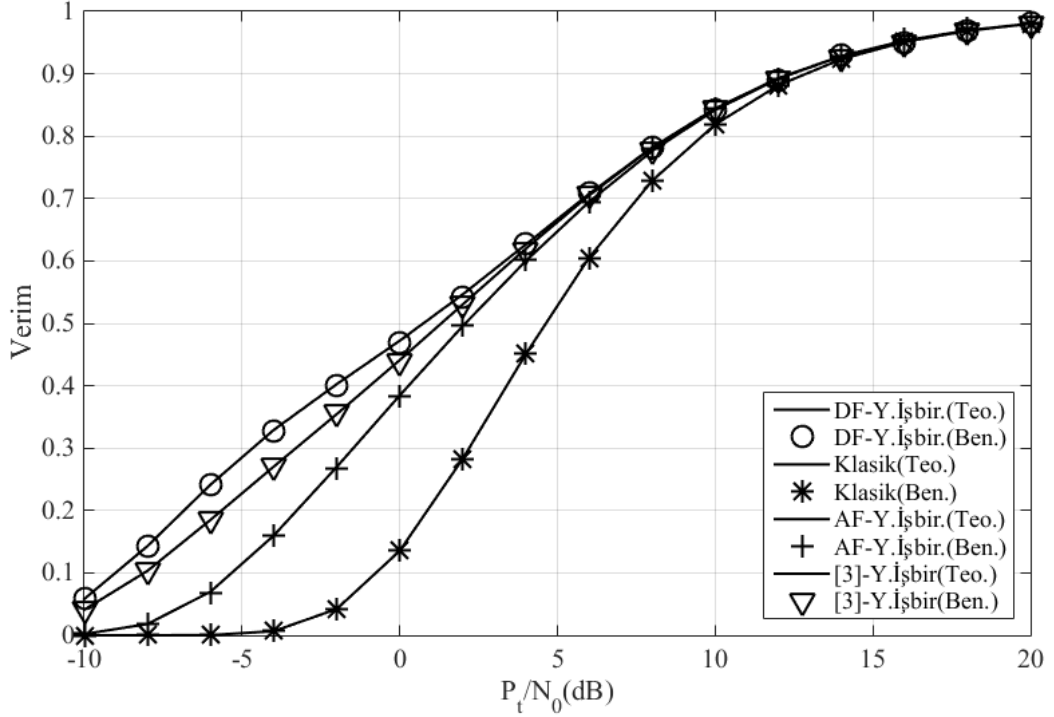


Şekil 7.6 : Önerilen protokoller için yalnız altına sermeli durumlarda ve [3] için erişim durumunda PU için verim analizi ($R_p = R_s = 1$).

Erişim durumunda SU tarafından PU etkisini azaltabilmek adına Li ve diğ. (2012) çalışmasında girişim yok etme yapılırken önerilen protokollerde SU'ya bir önceki bölümde anlatılan girişim eşiği uygulanmıştır. Şekil 7.6'dan da görüldüğü üzere gerek her iki önerilen protokolde gerekse Li ve diğ. (2012) çalışmasında yalnız altına sermeli durumlarda PU verimi klasik modeldeki PU veriminin altında kalmıştır. Düşük SNR değerlerinde önerilen protokollerin başarımı Li ve diğ. (2012) çalışmasındaki PU başarımından daha kötü olmasına rağmen yüksek SNR'lere gidildikçe PU başarımı aynı olmuştur.

Şekil 7.7'de önerilen protokollerin yalnız işbirlikli durumlarının Li ve diğ. (2012) çalışmasındaki protokolün işbirlikli durumu ile karşılaştırması verilmiştir.

Artan toplam güç ile birlikte Li ve diğ. (2012) çalışması ve her iki aktarım tekniği için önerilen protokollerde PU'nun başarımı klasik modelin verimine yaklaşmıştır. Düşük SNR değerlerinde en iyi başarım her iki SU düğümünün de işbirliği yaparak çalışması sonucu DF tekniği için önerilen protokolde alınırken, en kötü başarım klasik modelde elde edilmiştir. Li ve diğ. (2012) çalışmasında yalnız işbirlikli durumda PU'nun

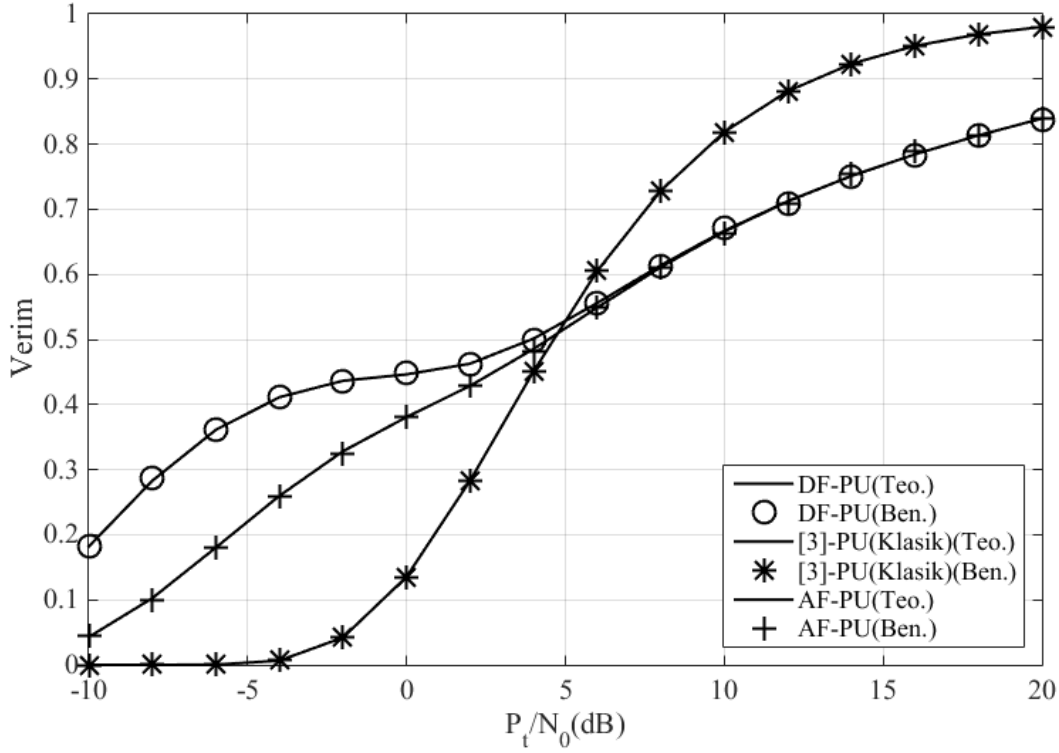


Şekil 7.7 : Önerilen protokoller ve [3] için yalnız işbirlikli durumlarda PU için verim analizi ($R_p = R_s = 1$).

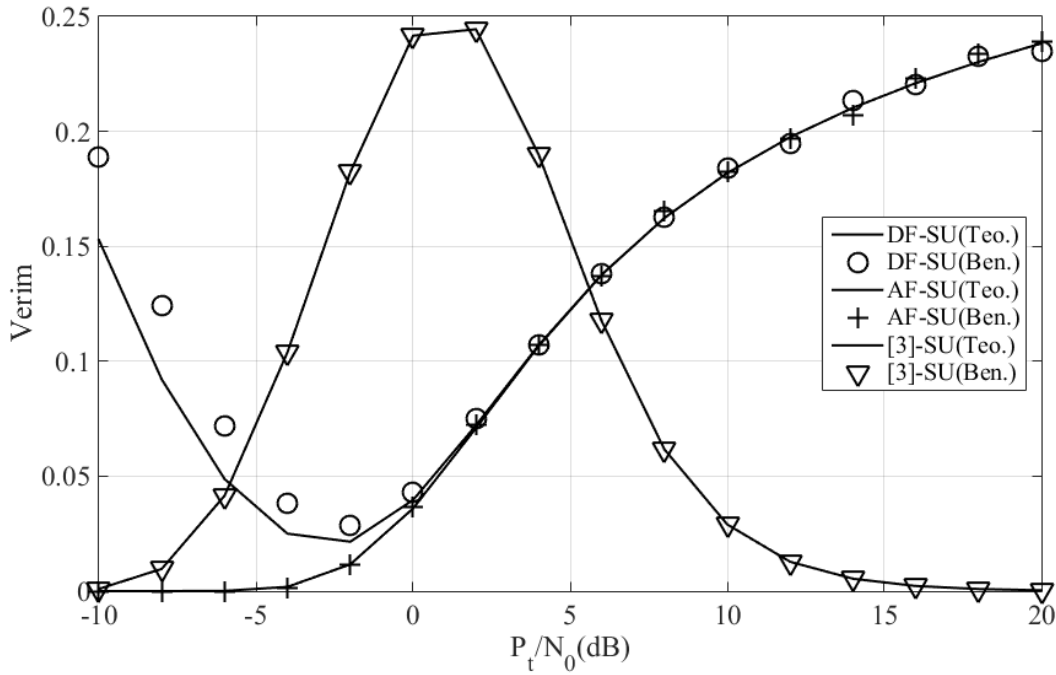
başarımı DF tekniği ile AF tekniği için önerilen protokollerin başarımı arasında kalmıştır. Li ve diğ. (2012) çalışmasında da aktarım tekniği olarak DF kullanılmasına rağmen önerilen protokollerde SU düğümlerinin çift yönlü haberleşebilmesi sonucu DF tekniği için önerilen protokolde başarım daha iyidir.

Şekil 7.8'de, önerilen protokoller ile Li ve diğ. (2012) çalışmasındaki protokolün PU için başarım karşılaştırması verilmiştir. Li ve diğ. (2012) çalışmasındaki protokolde PU'nun başarımı kredi/ceza yöntemi ile klasik modelin başarımına eşit olacak şekilde bir çalışma ilkesi vardır. Bu durumda Şekil 7.1'de de gösterildiği üzere düşük SNR'lerde PU'nun başarımı Li ve diğ. (2012) çalışmasında en kötüdür. DF aktarım tekniği için önerilen protokolde PU'nun başarımı ise Li ve diğ. (2012) çalışmasından ve AF aktarım tekniği için önerilen protokolden daha iyidir. SNR değeri yükseldikçe önerilen protokoller yalnız altına sermeli çalışmaktadır. Bu sebeple önerilen protokollerdeki PU'nun başarımı Li ve diğ. (2012) çalışmasına göre azalmıştır.

Şekil 7.9'da, önerilen protokollerde ve Li ve diğ. (2012) çalışmasındaki protokolde farklı SNR değerlerinde $R_s = 1$ için SU'nun başarımı verilmiştir. DF tekniği için önerilen protokol düşük SNR'lerde altına sermeli çalıştığı için SU başarımı



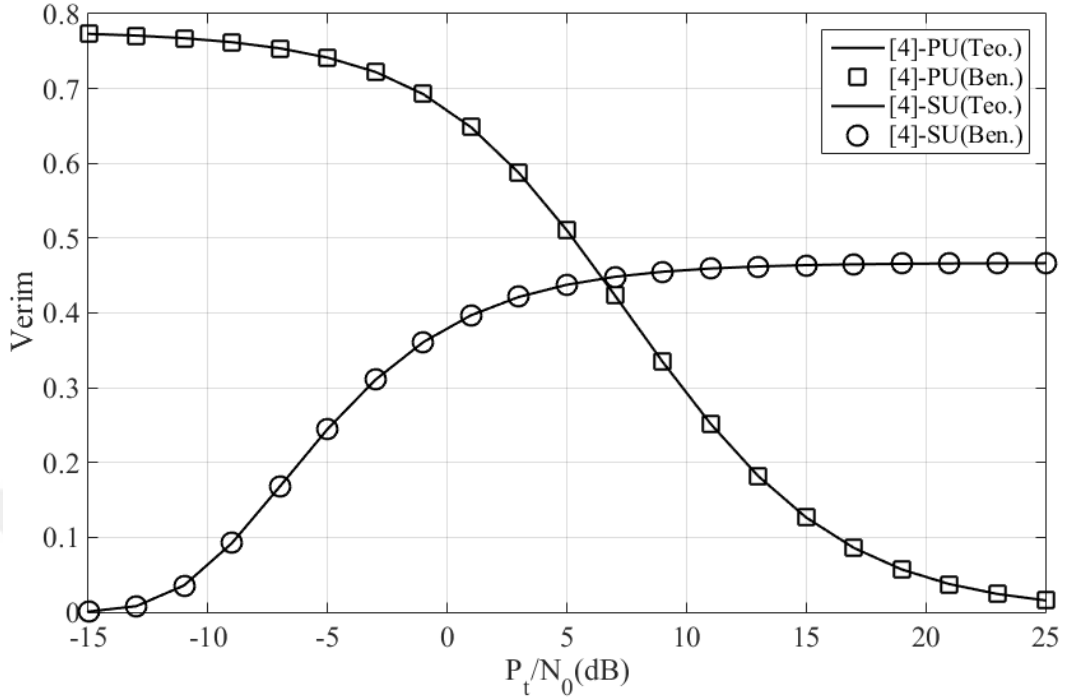
Şekil 7.8 : Önerilen protokoller ve [3]'te PU için verim analizi ($R_p = R_s = 1$).



Şekil 7.9 : Önerilen protokoller ve [3]'te SU için verim analizi ($R_p = R_s = 1$).

diğerlerinden daha iyidir. SNR değerlerinin biraz artması ile Li ve diğ. (2012) çalışmasındaki SU başarımı en iyi olmuştur. Ancak yüksek SNR'lere çıktıkça Li ve diğ. (2012) çalışmasında SU başarımı sıfıra düşerken, her iki önerilen protokolda da en iyi olmuştur. SNR yükseldikçe Şekil 7.8'de de görüldüğü gibi önerilen protokoller

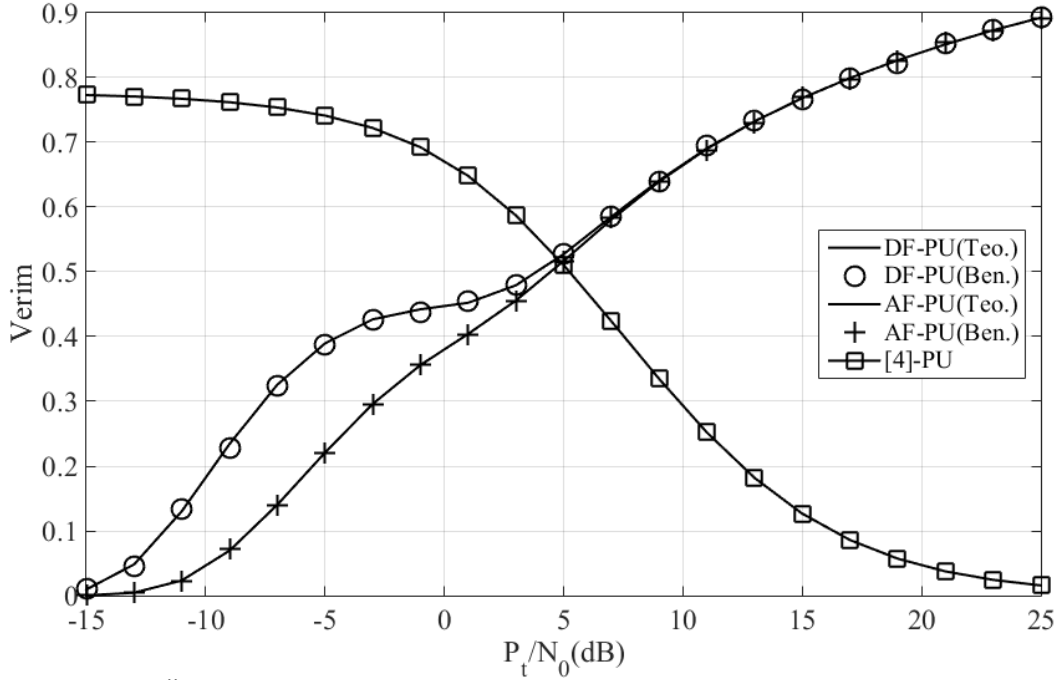
yalnız altına sermeli çalıştığı için bu SNR değerlerinde PU'nun başarımından biraz fedakarlık edip SU'nun başarımı iyileştirilmiştir.



Şekil 7.10 : [4]'te PU ve SU veriminin P_t/N_0 ile değişimi ($R_p = 1, R_s = 0.5$)

Benzer şekilde Nosratinia ve diğ. (2010) çalışması ile DF ve AF için önerilen protokollerde PU ve SU verimlerinin P_t/N_0 'a göre değişimi incelenmiştir. Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasında SR ve ST düğümlerinin oluşturduğu SU ile PT ve PR düğümlerinin oluşturduğu ARQ tabanlı PU'dan oluşan model incelenmiştir. SU, PT'yi dinlemekte ve PR'nin ACK/NACK geri bildirimlerine göre spektrumu kullanmaktadır. DF aktarım tekniğinin kullanıldığı bu çalışmada PU en fazla 2 yineleme sayısında paketini iletmektedir. Birinci zaman aralığının sonunda PT eğer NACK mesajı alırsa ikinci zaman aralığında aynı paketi yeniden iletir. İki zaman aralığı sonunda PR kendisine ulaşan paketleri birleştirip çözmektedir. PU'nun alıcısı ve vericisi arasındaki kanal ile SU'nun alıcısı ve vericisi arasındaki kanalların mesafeleriyle orantılı olan ortalama yol kayıpları ($d^{-\nu}$) ise PT→PR ve ST→SR için 4 seçilmiştir. ST'nin paket iletimi sırasında PR'de oluşturduğu girişim kanalı (ST→PR) için ortalama yol kaybı ise 1'dir. Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasındaki protokollede PU ve SU için iletim hızları sırasıyla $R_p = 1$ ve $R_s = 0.5$ varsayılmıştır. PU'nun gücü $P_p = 1$ alınıp SU'nun gücü P_s 'in değişimine göre verim analizi yapılmıştır. Bizim çalışmamızdaki DF ve AF için önerilen protokollerle karşılaştırma yapabilmek için $P_p = 1$ ve $P_s = P_t - 1$ olarak alınmış ve değişen P_t/N_0 değerlerinde PU ve SU için verimler elde edilmiştir. Önerilen

protokollerde ise altına sermeli durumlarda PU ve SU güçleri arasındaki fark 15 dB alınırken, işbirlikli durumlar ve yalnız PT'nin ilettiği durumlarda $P_p = P_s$ alınmıştır.

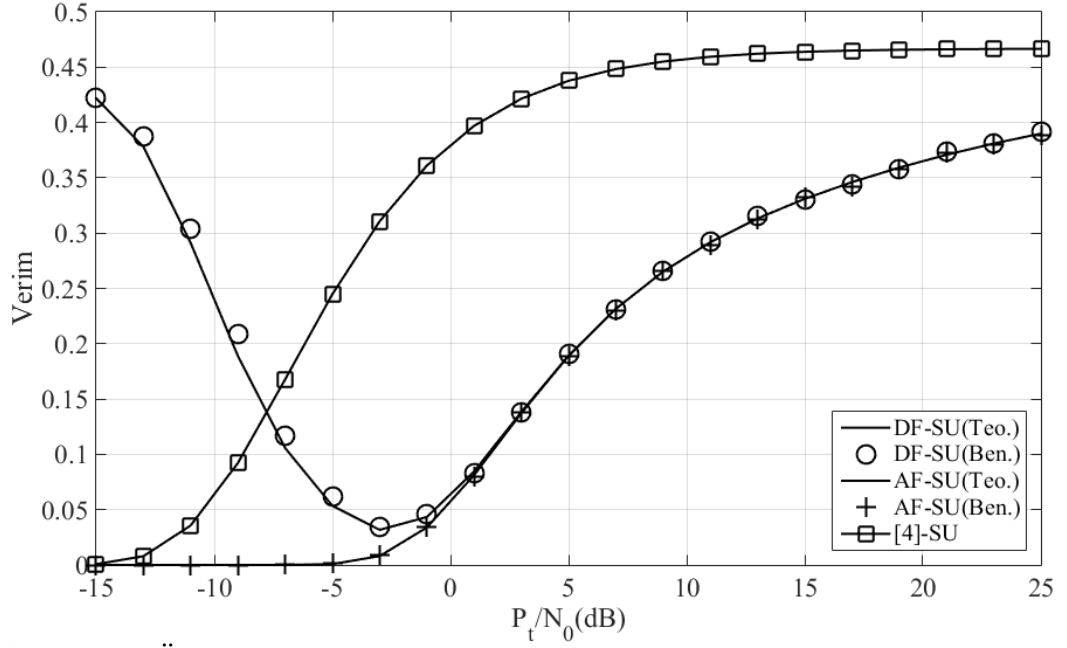


Şekil 7.11 : Önerilen protokoller ve [4]'te PU için verim analizi ($R_p = 1, R_s = 0.5$).

Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasındaki protokolde bir sönümlenme bloğu boyunca kanal katsayısının değişmediği varsayılmış ve buradan hareketle 4 farklı paket iletim seçeneği oluşturulmuştur. $SNR = P_t/N_0$ olmak üzere Şekil 7.10'de Nosratinia ve diğ. (2010) çalışması için farklı SNR değerlerinde PU ve SU verimlerinin değişimi gösterilmiştir. SNR değeri arttıkça SU'nun verimi iyileşirken PU'nun verimi kötüleşmiş ve sifıra düşmüştür.

Önerilen protokollerin Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasındaki protokol ile PU başarımları için karşılaştırılması Şekil 7.11'de verilmiştir. Düşük SNR'lerde DF için önerilen protokoldeki PU verimi AF için önerilen protokoldeki PU veriminden daha iyidir. Ancak Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasındaki PU'nun verimi düşük SNR'lerde en iyi iken artan SNR değerleriyle verimi azalmaktadır. Yüksek SNR değerlerinde PU verimi önerilen protokollerde en iyi iken, Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasında sifıra düşmüştür.

Önerilen protokollerdeki SU ile Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasındaki protokolün SU başarımlarının artan SNR değerleriyle değişimi Şekil 7.12'te verilmiştir. DF tekniği için önerilen protokol düşük SNR'lerde altına sermeli çalıştığı için SU başarımları neredeyse Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasına yakın çıkmıştır. AF için önerilen



Şekil 7.12 : Önerilen protokoller ve [4]'te SU için verim analizi ($R_p = 1, R_s = 0.5$).

protokoldeki SU başarımı ise bu aralıkta altına sermeli açışmadığı için sıfırdır. Yüksek SNR'lerde en iyi başarımlar Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasında elde edilirken önerilen protokollerde başarımlar aynı ve biraz daha kötüdür. Buna karşılık, Şekil 7.11'den de görüldüğü gibi PU başarımı önemli derecede iyileşmiştir.

Buna göre, DF tekniği ve AF için önerilen protokollerde SU başarımlarının PU'nun başarımının önemli olduğu Li ve diğ. (2012) çalışmasına göre daha iyi olması sağlanırken, SU'nun başarımının önemli olduğu Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasına göre ise önerilen protokollerde PU başarımlarının yüksek olduğu gözlenmiştir. Her iki protokollerde SU başarımları Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasına göre düşük iken, PU başarımları düşük SNR'lerde Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasından iyi, SNR'nin artması ile biraz kötüleşmektedir.



8. SONUÇ

Bu tezde, ilk olarak telsiz iletişim kanallarının özellikleri ve telsiz iletişim kanallarında işbirlikli çeşitleme teknikleri anlatılmıştır. Bir hata kontrol protokolü olan ARQ hakkında kısa bir bilgilendirmeden sonra bilişsel radyo kavramı tanıtılmış ve bilişsel radyo çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir.

ARQ tabanlı altına sermeli bilişsel radyo modeli tanıtılmış ve işbirlikli iletme dayalı iki yeni protokol önerilmiştir. İlk olarak DF tekniği için önerilen spektrum paylaşım protokolü ele alınmıştır. PU'nun paketinin iletimi için gereken yineleme sayısının iki farklı değerinde PU ve SU başarımları incelenmiştir. PU ve SU için servis kesilme olasılıkları elde edilmiş, verim analizleri yapılmış ve oluşturulan referans modellerle başarımlar karşılaştırmaları yapılmıştır. Bir sonraki bölümde AF tekniği için önerilen spektrum paylaşım protokolü ele alınmıştır. Benzer şekilde yine iki farklı yineleme sayısı için PU ve SU başarımları elde edilmiş ve oluşturulan referans modeller ile karşılaştırılması yapılmıştır. Ele alınan her iki protokolde de yineleme sayısındaki artış düşük $SNR = P_p/N_0$ değerlerinde az da olsa başarımları kötüleştirirken; SNR değerlerinin artmasıyla yineleme sayısındaki artış başarımları etkilememiştir. Daha sonra her iki protokol için de PU ve SU'nun verimleri karşılaştırılmış ve düşük SNR'lerde DF tekniği için önerilen protokolün PU için daha verimli çalıştığı gözlenmiştir. DF tekniği için ele alınan protokol çok düşük SNR değerlerinde altına sermeli çalıştığı için SU bu değerlerde yüksek başarı elde etmiştir. Ancak SNR değerlerinin artmasıyla işbirlikli çalıştığı durumlarda başarımları azalmıştır. SNR değerlerinin biraz daha artmasıyla önerilen protokol altına sermeli durumda çalışmaya başlamaktadır. Bu durum SU'nun başarımlarının yeniden artmasını sağlamıştır. AF tekniği için önerilen protokolün ise düşük SNR değerlerinde işbirlikli durumlarda çalışması sonucu SU başarımları kötü iken; artan SNR değerleriyle başarımları iyileşmiş ve DF için önerilen protokolle aynı olmuştur. Sonuçta her iki protokol için de düşük SNR değerlerinde PU'nun başarımları SU'nun olmadığı klasik modele göre daha iyi iken, yüksek SNR değerlerinde PU'nun başarımlarında yaklaşık %15 kayıp gözlenmiştir. Ancak bu

kayıp sayesinde düşük SNR değerlerinde yok denecek kadar az başarımlı olan SU yüksek SNR'lerde yaklaşık %40 başarımlı elde etmiştir. Her iki teknik için önerilen protokollerde PU ve SU başarımlarını etkileyen parametrelerin etkisi incelenmiştir. SU için istenen hızın (R_s) artması SU başarımlarını düşürüp PU'nun başarımlarını etkilememiştir. Benzer şekilde S1 ve S2 düğümleri arasındaki mesafenin (d_s) artması SU başarımlarını kötüleştirirken; PU'nun başarımlarına etkisi olmamıştır. Önerilen protokollerde altı sermeli durumlarda PU'nun başarımlarının SU'nun girişiminden en az etkilenmesi için SU'nun iletim gücü, PU'nun iletim gücünün belli bir değer altında alınmış ve bu değer girişim eşiği olarak adlandırılmıştır. Sonuçta girişim eşiğinin artması PU başarımlarını artırırken SU başarımlarını kötüleştirmiştir. Literatürde var olan iki farklı spektrum paylaşımli bilişsel radyo ağı modelleri ile DF ve AF için önerilen protokollerin PU ve SU için verimleri karşılaştırılmıştır. Li ve diğ. (2012) çalışmasında önerilen protokollerin PU için verimleri kıyaslandığında gözlenmiştir ki artan P_t/N_0 değerlerinde önerilen protokoller için PU verimi bu modelin biraz altında kalmıştır. Ancak yüksek P_t/N_0 değerlerinde Li ve diğ. (2012) çalışmasında SU'nun verimi sıfıra düşerken önerilen protokollerde 0.3 civarında sabitlenmiştir. Ayrıca Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasında ise SU'nun verimi yüksek P_t/N_0 değerlerinde AF ve DF teknikleri için önerilen protokollerdeki SU verimlerinden biraz daha iyiyken aynı P_t/N_0 değerlerinde önerilen protokollerde PU'nun verimi Nosratinia ve diğ. (2010) çalışmasına göre çok daha yüksek değerde gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Luo, L., Zhang, P., Zhang, G. ve Qin, J.** (2011). Outage Performance for Cognitive Relay Networks with Underlay Spectrum Sharing, *IEEE Communications Letters*, 15(7).
- [2] **Guo, Y., Kang, G., Zhang, N., Zhou, W. ve Zhang, P.** (2010). Outage Performance of Relay-assisted Cognitive Radio System Under Spectrum Sharing Constraints, *IEEE Electronics Letters*, 46(2).
- [3] **Li, Q., Ting, S.H. ve Pandharipande, A.** (2012). Cooperate-and-Access Spectrum Sharing with ARQ-Based Primary Systems, *IEEE Trans. Communications*, 60(10), 2861–2871.
- [4] **Li, J.C.F., Zhang, W., Nosratinia, A. ve Yuan, J.** (2010). Opportunistic Spectrum Sharing Based on Exploiting ARQ Retransmission in Cognitive Radio Networks, *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, Miami, FL.
- [5] **Levorato, M., Mitra, U. ve Zorzi, M.** (2012). Cognitive Interference Management in Retransmission-Based Wireless Networks, *IEEE Trans. Information Theory*, 58(5), 3023–3046.
- [6] **Harsini, J.S. ve Zorzi, M.** (2014). Transmission Strategy Design in Cognitive Radio Systems With Primary ARQ Control and QoS Provisioning, *IEEE Trans. Communications*, 62(6), 1790–1802.
- [7] **Michelusi, N., Popovski, P., Levorato, M., Simeone, O. ve Zorzi, M.** (2011). Cognitive Transmissions under a Primary ARQ process via Backward Interference Cancellation, *49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, Monticello, IL.
- [8] **Wang, D., Ren, P., Wang, Y., Du, Q. ve Sun, L.** (2015). Interference Cancellation based Transmission Strategy Using Primary ARQ for Cooperative CRNs, *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London.
- [9] **Cheng, S.M., Ao, W.C. ve Chen, K.C.** (2011). Efficiency of a Cognitive Radio Link with Opportunistic Interference Mitigation, *IEEE Trans. Wireless Communications*, 10(6), 1715–1720.
- [10] **Touati, S., Boujemaa, H. ve Abed, N.** (2013). Cooperative ARQ protocols for underlay cognitive radio networks, *Proceedings of the 21st Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Marrakech.

- [11] **Proakis, J.G. ve Salehi, M.** (2007). *Principles of Cognitive Radio*, McGraw-Hill Companies, New York, NY, 5. sürüm.
- [12] **Rappaport, T.S. ve Milstein, L.B.** (1992). Effects of Radio Propagation Path Loss on DS-CDMA Cellular Frequency Reuse Efficiency for the Reverse Channel, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, 41(3), 231–242.
- [13] **Biglieri, E., Goldsmith, A.J., Greenstein, L.J., Mandayam, N.B. ve Poor, H.V.** (2013). *Principles of Cognitive Radio*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1. sürüm.
- [14] **Laneman, J.N., Wornell, G.W. ve Tse, D.N.C.** (2001). An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks, *IEEE International Symposium on Information Theory*, Washington, DC.
- [15] **Nosratinia, A., Hunter, T.E. ve Hedayat, A.** (2004). Cooperative communication in wireless networks, *IEEE Communications Magazine*, 42(10), 74–80.
- [16] **Cover, T. ve Gamal, A.E.** (1979). Capacity theorems for the relay channel, *IEEE Trans. Information Theory*, 25(5), 572–584.
- [17] **Laneman, J.N., Tse, D.N.C. ve Wornell, G.W.** (2004). Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior, *IEEE Trans. Information Theory*, 50(12).
- [18] **Laneman, J.N. ve Wornell, G.W.** (2000). Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Chicago, IL.
- [19] **Janani, M., Hedayat, A., Hunter, T.E. ve Nosratinia, A.** (2004). Coded Cooperation in Wireless Communications: Space-Time Transmission and Iterative Decoding, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52(2).
- [20] **Ahlsvede, R., Cai, N. ve Li, S.** (2000). Network Information Flow, *IEEE Trans. Information Theory*, 46(4).
- [21] **Hasna, M.O. ve Alouini, M.S.** (2002). Performance Analysis of Two-Hop Relayed Transmissions over Rayleigh Fading Channels, *IEEE 56th Vehicular Technology Conference*, Vancouver.
- [22] **Anghel, P. ve Kaveh, M.** (2002). Analysis of two-hop transmission over Rayleigh fading channels, *IEEE Int. Symp. Advances in Wireless Communications*, Victoria, BC.
- [23] **Emamian, V., Anghel, P. ve Kaveh, M.** (2002). Outage probability of a multiuser spatial diversity system in a wireless networks, *IEEE Vehicular Technology Conf.*, Vancouver, BC.
- [24] **Hasna, M.O. ve Alouini, M.S.** (2004). A Performance Study of Dual-Hop Transmissions With Fixed Gain Relays, *IEEE Trans. Wireless Communications*, 3(6).

- [25] **Tannious, R.A. ve Nosratinia, A.** (2010). Cognitive Radio Protocols Based on Exploiting Hybrid ARQ Retransmissions, *IEEE Trans. Wireless Communications*, 9(9), 2833–2841.
- [26] **Engelman, R., Abrokwhah, K., Dillon, G., Foster, G., Godfrey, G., Hanbury, T., Lagerwerff, C., Leighton, W., Marcus, M., Noel, R., Payton, J., Tomchin, J., Williams, J. ve Yang, A.** (200). Report of the Spectrum Efficiency Working Group, **Teknik Rapor**, Federal Communications Commission Spectrum Policy Task Force, https://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFinalReport_1.pdf.
- [27] **Hong, H., Xiao, L., Yan, Y., Xu, X. ve Wang, J.** (2014). Outage Performance for Cognitive Two-Way Relaying Networks with Underlay Spectrum Sharing, *Proceedings of the IEEE 79th Vehicular Technology Conference*, Seoul.
- [28] **Khoshkholgh, M.G., Navaie, K. ve Yanikomeroglu, H.** (2010). Access Strategies for Spectrum Sharing in Fading Environment: Overlay, Underlay, and Mixed, *IEEE Trans. Mobile Computing*, 9(12), 1780–1793.
- [29] **Han, Y., Pandharipande, A. ve Ting, S.H.** (2009). Cooperative Decode-and-Forward Relaying for Secondary Spectrum Access, *IEEE Trans. Wireless Communications*, 8(10), 4945–490.
- [30] **Lee, W.Y. ve Akyildiz, I.F.** (2008). Optimal Spectrum Sensing Framework for Cognitive Radio Networks, *IEEE Trans. Wireless Communications*, 7(10), 3845–3857.
- [31] **Quan, Z., Cui, S. ve Sayed, A.H.** (2008). Optimal Linear Cooperation for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2(1), 28–40.
- [32] **Ghasemi, A. ve Sousa, E.S.** (2008). Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs, *IEEE Communications Magazine*, 46(4), 32–39.
- [33] **Zhang, P., Yuan, J., Chen, J., Wang, J. ve Yang, J.** (2009). Analyzing Amplify-and-Forward and Decode-and-Forward Cooperative Strategies in Wyner’s Channel Model, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Pudapest.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Sema Saraç
Doğum Tarihi ve Yeri : 19.01.1991, Kocaeli
E-Posta : saracse@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** İstanbul Teknik Üniversitesi
- **Y. Lisans:** İstanbul Teknik Üniversitesi

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Sarac, S., Aygolu U.: An ARQ-Based Cooperative Spectrum Sharing in Underlay Cognitive Radio Networks *4th IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking*, June 6-9, 2016 Varna, Bulgaria.
- Sarac, S., Aygolu U.: Altına Sermeli Bilişsel Radyoda İşbirlikli Spektrum Paylaşımı için ARQ Tabanlı Bir Protokol 24. *IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, 16-19 Mayıs, 2016 Zonguldak, Türkiye.