

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİLİŞSEL TELSİZ İLETİŞİMDE OTOMATİK YİNELEME İSTEMELİ
KARMA AKTARIM PROTOKOLLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat BARAN

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Programı

HAZİRAN 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİLİŞSEL TELSİZ İLETİŞİMDE OTOMATİK YİNELEME İSTEMELİ
KARMA AKTARIM PROTOKOLLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Murat BARAN
514121017**

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ

HAZİRAN 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 514121017 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Murat BARAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BİLİŞSEL TELSİZ İLETİŞİMDE OTOMATİK YİNELEME İSTEMELİ KARMA AKTARIM PROTOKOLLERİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. M. Ertuğrul ÇELEBİ**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hacı İLHAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2017**

Savunma Tarihi : **05 Haziran 2017**





Eşime,



ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, çıkmaza girdiğim noktalarda sabırla bana yol gösteren, en önemlisi yüksek lisans eğitimime başlama kararımı verme konusunda bana ilham olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ'ne en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca akademik eğilimlerimi sıcak tutma konusunda her daim yanımda olan; maddi, manevi hiçbir desteği esirgemeyen eşim Melike BARAN'a minnettarım. Son olarak gösterdikleri her türlü destek için annem Yaşar BARAN, babam Necip BARAN ve kardeşim Nazif BARAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2017

Murat BARAN
Telekomünikasyon Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. TELSİZ İLETİŞİM KANALLARI	5
2.1 Telsiz İletişim Kanallarının Bileşen Tanımları, Sınıflandırılması ve Modelleri	5
2.1.1 Kanal bileşenlerinin tanımları	6
2.1.1.1 Çok yönlü yayılım.....	6
2.1.1.2 Doppler yayılımı	6
2.1.1.3 Uyum band genişliği	7
2.1.1.4 Uyum zamanı	7
2.1.2 Sönümlemeli kanalların sınıflandırılması	8
2.1.2.1 Düz sönümleme.....	8
2.1.2.2 Frekans seçici sönümleme.....	9
2.1.2.3 Yavaş sönümleme	9
2.1.2.4 Hızlı sönümleme	9
2.1.3 Sönümlemeli kanal modelleri	10
2.1.3.1 Rayleigh dağılımı	10
2.1.3.2 Ricean dağılımı	11
2.2 Kanal Sığıması, Servis Kesilme Olasılığı, Etkin Veri Hızı ve Verim	12
2.2.1 Kanal sığıması	12
2.2.2 Servis kesilme olasılığı	13
2.2.3 Etkin veri hızı ve verim.....	15
2.3 Otomatik Yineleme İsteme.....	16
3. TELSİZ İLETİŞİMDE İŞBİRLİĞİ	19
3.1 İşbirliği Yöntemleri	20
3.1.1 Kuvvetlendir-ve-aktar yöntemi	20
3.1.2 Çöz-ve-aktar yöntemi.....	21
3.2 Yarı-Çift Yönlü Aktarım ve Tam-Çift Yönlü Aktarım	22
3.2.1 Yarı-çift yönlü aktarım.....	23
3.2.2 Tam-çift yönlü aktarım	25
3.2.3 Kuramsal ve benzetim sonuçlarının karşılaştırması.....	26
4. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI.....	29
4.1 Araya Serme Yöntemi	30
4.2 Üstüne Serme Yöntemi	31
4.3 Altına Serme Yöntemi.....	33

5. OTOMATİK YİNELEME İSTEMELİ YENİ AKTARIM PROTOKOLLERİ35

5.1 Protokol 1	37
5.1.1 Protokol 1-HD	37
5.1.2 Protokol 1-XD	39
5.1.3 Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD'nin karşılaştırılması	41
5.2 Protokol 2	44
5.2.1 Protokol 2-HD	44
5.2.2 Protokol 2-XD	46
5.2.3 Protokol 2-HD ve Protokol 2-XD'nin karşılaştırılması	49
5.3 Protokol 3	50
5.3.1 Protokol 3-HD	50
5.3.2 Protokol 3-XD	52
5.3.3 Protokol 3-HD ve Protokol 3-XD'nin karşılaştırılması	55
5.4 Protokol 4	57
5.4.1 Protokol 4-HD	58
5.4.2 Protokol 4-XD	60
5.4.3 Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'nin karşılaştırılması	63
6. OTOMATİK YİNELEME İSTEMELİ KARMA AKTARIM PROTOKOLÜNÜN ALTINA SERMELİ BİLİŞSEL RADYOYA UYGULANMASI	67
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	81

KISALTMALAR

AF	: Kuvvetlendir-ve-Aktar	Amplify-and-Forward
ARQ	: Otomatik Yineleme İsteme	Automatic Repeat Request
CSI	: Kanal Durum Bilgisi	Channel State Information
DF	: Çöz-ve-Aktar	Decode-and-Forward
FDR	: Tam-Çift Yönlü Aktarım	Full-Duplex Relaying
HD	: Yarı-Çift Yönlü Aktarım	Half-Duplex Relaying
ISI	: Simgelerarası Girişim	Intersymbol Interference
LoS	: Görüş çizgisi	Line of Sight
PU	: Birincil Kullanıcı	Primary User
SI	: Öz-Girişim	Self-Interference
SINR	: İşaret-Girişim-ve-Gürültü Oranı	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SNR	: İşaret-Gürültü Oranı	Signal-to-Noise Ratio
SU	: İkincil Kullanıcı	Secondary User
XD	: Karma Aktarım	Hybrid Relaying



SEMBOLLER

$E[.]$: Beklenen Değer Operatörü
$\int. d.$: İntegral İşlevi
$I_0(.)$: 0. Derece 1. Çeşit Bessel İşlevi
$\log(.)$: Logaritma İşlevi
$\Sigma.$: Dizi Toplam Operatörü
t	: Zaman
$\sin.$: Sinüs İşlevi
$\cos.$: Kosinüs İşlevi
e	: Euler Sayısı
$. $: Mutlak Değer İşlevi



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Verici ve alıcı arasında bulunan olası yollar.....	5
Şekil 3.1: Verici, alıcı ve bir adet röleden oluşan işbirlikli iletişim sistem modeli. ..	19
Şekil 3.2: Kuvvetlendir-ve-aktar sistem modeli.....	20
Şekil 3.3: Çöz-ve-aktar sistem modeli.	22
Şekil 3.4: Yarı-çift yönlü röleli işbirlikli sistem modeli.	24
Şekil 3.5: Tam-çift yönlü röleli işbirlikli sistem modeli.	25
Şekil 3.6: Tek yönlü HD ve FD röleli sistemlerin verimlerinin karşılaştırılması.	27
Şekil 4.1: Olası radyo spektrum boşlukları.	30
Şekil 4.2: Üstüne serme yöntemi.	31
Şekil 4.3: Birincil kullanıcının veri iletim hızının değişen girişim sınırına göre değişimi.	34
Şekil 5.1: HD röleli protokollerin sistem modeli.	35
Şekil 5.2: XD röleli protokollerin sistem modeli.	36
Şekil 5.3: Protokol 1-HD için Markov zinciri.....	38
Şekil 5.4: Protokol 1-XD için Markov zinciri.....	40
Şekil 5.5: Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD paket verimliliği karşılaştırması.	42
Şekil 5.6: Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD Verim Karşılaştırması.	43
Şekil 5.7: Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD etkin veri hızı karşılaştırması.	43
Şekil 5.8: Protokol 2-HD için Markov zinciri.....	45
Şekil 5.9: Protokol 2-XD için Markov zinciri.....	47
Şekil 5.10: Protokol 1-HD, Protokol 1-XD, Protokol 2-HD ve Protokol 2XD paket verimliliği karşılaştırması.....	50
Şekil 5.11: Protokol 3-HD için Markov zinciri.....	51
Şekil 5.12: Protokol 3-XD için Markov zinciri.....	54
Şekil 5.13: Protokol 2-HD, Protokol 2-XD, Protokol 3-HD ve Protokol 3-XD verimlerinin karşılaştırılması.....	56
Şekil 5.14: Protokol 2-HD, Protokol 2-XD, Protokol 3-HD ve Protokol 3-XD etkin veri hızları karşılaştırması.	57
Şekil 5.15: Protokol 4-HD için Markov zinciri.....	58
Şekil 5.16: Protokol 4-XD için Markov zinciri.....	62
Şekil 5.17: Protokol 1-HD, Protokol 1-XD, Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD paket verimliliği karşılaştırması.....	65
Şekil 5.18: Protokol 1-HD, Protokol 1-XD, Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD etkin veri hızı karşılaştırması.	66
Şekil 6.1: İkincil kullanıcılarında Protokol 4-HD'yi uygulayan altına sermeli bilişsel radyo sistem modeli.....	67
Şekil 6.2: İkincil kullanıcılarında Protokol 4-XD'yi uygulayan altına sermeli bilişsel radyo sistem modeli.....	70
Şekil 6.3: Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'nin bilişsel radyoda verimlerinin değişen sistem veri hızı için karşılaştırılması-1.....	71

Şekil 6.4: Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'nin bilişsel radyoda verimlerinin değişen sistem veri hızı için karşılaştırılması-2.	72
Şekil 6.5: Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'nin bilişsel radyoda verimlerinin değişen girişim üst sınırı için karşılaştırılması.....	73



BİLİŞSEL TELSİZ İLETİŞİMDE OTOMATİK YİNELEME İSTEMELİ KARMA AKTARIM PROTOKOLLERİ

ÖZET

Telsiz iletişim teknolojilerindeki gelişmeler sonucunda daha karmaşık, daha güvenilir ve daha hızlı telsiz iletişim sistemleri boyutça küçülmüş ve maliyetleri azalmıştır. Bunun yanında telsiz iletişim sistemlerinin başarımlarının tel ile bağlı iletişim sistemlerinin başarımlarına yaklaşması telsiz iletişim sistemlerine olan kullanıcı talebini hızla artırmıştır. Bilindiği gibi telsiz iletişim sistemleri radyo spektrumunu paylaşarak iletişim kurarlar. Bu nedenle radyo spektrumu belli telsiz iletişim tekniklerinde kullanılmak üzere bölgelere ayrılmış, bu radyo spektrum bölgeleri de ihtiyaca göre servis sağlayıcıların kullanımına ayrılmıştır. Ancak kullanıcı sayısındaki hızlı artış, söz konusu radyo spektrum bölgelerinin daha etkin kullanılması gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Bu amaçla literatürde, belli bir radyo spektrum aralığının kullanım haklarına sahip birincil kullanıcılarla aynı radyo spektrum aralığını kullanmak isteyen ikincil kullanıcıların söz konusu radyo spektrum aralığını nasıl ortaklaşa paylaşabileceklerini öneren bilişsel radyo yöntemleri önerilmiştir.

Bilişsel radyo yöntemlerinde ikincil kullanıcılar araya serme yönteminde birincil kullanıcının kullanmadığı radyo spektrum boşluklarını kullanarak, üstüne serme yönteminde birincil kullanıcının başarımlarını artırmak koşuluyla birincil kullanıcıyla işbirliği yaparak ve altına serme yönteminde birincil kullanıcının alıcısında izin vereceği girişim üst sınırını aşmamak koşuluyla iletişim kurabilirler. Bu üç bilişsel radyo yönteminde görüldüğü gibi, ikincil kullanıcıların başarımları birincil kullanıcıların izin verdiği ölçütlere doğrudan bağlıdır.

Bu tez çalışmasında altına sermeli bilişsel radyoda ikincil kullanıcıda kullanılmak üzere otomatik yineleme istemeli karma aktarım protokolleri önerilmiştir. Önerilen protokollerde kullanılan karma aktarım (XD) yönteminde röle hem yarı-çift yönlü (HD) hem de tam-çift yönlü (FD) röle olarak çalışmakta olup, böylece ikincil kullanıcının HD röleli sistemlere göre daha yüksek etkin veri hızı değerlerine ulaşabilmesi amaçlanmıştır. Ancak XD röle sistem üzerinde girişime neden olacağı için sistem güvenilirliğini artırmak amacıyla otomatik yineleme isteme yöntemi de sistem yapısına dahil edilmiştir.

XD rölenin sisteme getirisini inceleyebilmek için aynı koşullar altında HD röleli sistem tasarımlarına da tez kapsamında yer verilmiştir. Bu bakımdan önerilen her bir XD röleli sistem tasarımının etkin veri hızı, verimi (normalize etkin veri hızı) ve paket başarımları, aynı koşullar altında tasarlanan HD röleli sistemler ile kuramsal çıkarımlar ve benzetim yoluyla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda tasarlanan XD röleli sistemlerin, XD rölenin sistemde girişime neden olması nedeniyle HD röleli sistemlere göre paket başarımlarının bir miktar daha kötü olduğu, buna karşılık HD röleli sistem tasarımlarına göre çok daha yüksek etkin veri hızı ve verim değerlerine ulaşabildiği görülmüştür.



HYBRID RELAYING PROTOCOLS WITH AUTOMATIC REPEAT REQUEST IN COGNITIVE WIRELESS COMMUNICATION

SUMMARY

More complex, more reliable and faster wireless communication systems become smaller and cheaper thanks to evolution of wireless communication technology. Besides, customer's demand increases due to wireless communication systems' performance converging to that of wired communication systems. As known, wireless communication systems communicate over a limited radio spectrum which is divided into subbands dedicated to the service providers. However, in current fixed spectrum allocation context in which almost all the spectrum is under license, the leased spectrum subbands are seriously under-utilized. The rapid increase in the number of user's demand necessitates new techniques for efficient use of the radio spectrum. For this purpose, cognitive radio techniques are proposed in the literature. Cognitive radio techniques organize primary users to share their licensed spectrum with unlicensed secondary users. Primary users usually do not use their spectrum band effectively in time, frequency or space. Those primary user's absences are called as spectrum holes. Therefore, these spectrum holes inspire unlicensed secondary users to realize their communications over these holes. In this case, secondary users must fulfill some requirements. First, secondary users must have the ability to sense the presence of primary users on the spectrum. Second, secondary users must have the ability to hear primary user's communication. Third but not necessarily, secondary users must be able to sense the presence of other secondary users if there are any. Cognitive radio techniques can be classified as interweave, overlay and underlay paradigm.

Interweave cognitive radio is the most opportunistic cognitive radio paradigm besides others. Secondary users detect the spectrum holes and communicate over those spectrum holes without causing any harm on primary user's receiver. The newest secondary user in the network assumes all other secondary users as primary user if there are multiple secondary users.

In overlay cognitive radio, secondary user must cooperate with primary user to increase the primary user's performance. Primary user will not share radio spectrum with the secondary user if it can not help improving its performance. Otherwise, secondary user acts as relay to improve primary user's performance by cooperating with it. Secondary user must have the primary user's codework to help. Also, primary user should have the ability to sense secondary user's presence in this paradigm, unlike the other two cognitive radio paradigms.

In underlay cognitive radio, primary user allows secondary user's communication under limited interference in its receiver. Secondary user has to change its transmit power with respect to the primary user's interference limit. As a result, in cognitive radio, secondary user's performance is very dependent on primary user's restrictions.

In this thesis, automatic repeat request (ARQ) based hybrid (XD) relaying protocols are proposed to be used in secondary users of a cognitive radio network. Half duplex (HD) relaying protocols with automatic repeat request are also considered to evaluate XD relaying protocols' gains.

Despite there are different ARQ techniques in the literature, the simplest stop-and-wait ARQ technique is applied in the thesis coverage. According to stop-and-wait ARQ, transmitter sends a packet and stops to wait receiver's response. Receiver sends back acknowledgement (ACK) signal if it successfully receives the transmitter packet. Otherwise, the receiver sends nothing or NACK signal to request second transmission of the same packet.

HD relay receives packets from the transmitter and transmits packet to the receiver in discrete time slots. In HD relayed systems, transmitter transmits a packet to relay in the first phase and relay transmits transmitter's packet to the receiver in the second phase. Despite HD relaying, full duplex (FD) relay receives transmitter's new packet and transmits transmitter's previous packet to the receiver simultaneously. For this reason, FD relayed systems can achieve higher throughputs than HD relayed systems. However, FD relayed systems suffer from self-interference at FD relay and interference at the receiver if transmitter and receiver are close enough to each other. To achieve higher throughputs than HD relayed systems and to reduce the disturbance due to the interference in FD relayed systems, hybrid relaying (XD) technique is considered in the proposed protocols. According to that, XD relayed systems work as FD relayed systems if there is no outage for both transmitter-relay and relay-receiver channels. XD relay work as HD relay if outage occurs in transmitter-relay channel or relay-receiver channel.

In this thesis, to achieve higher rate than HD relayed systems and more reliability than FD relayed systems, XD relayed protocols are proposed. XD relayed systems still suffer from interference like FD relayed systems. So, to achieve more reliable systems with XD relay, stop-and-wait ARQ is involved in the proposed XD relayed protocols. Consequently, all proposed XD relayed protocols work with full duplex relaying unless there is no outage between system's nodes. On the other hand, XD relay works as HD relay if outage occurs in transmitter-relay channel or relay-receiver channel. XD relay will stop FD relaying and try to successfully receive the retransmitted new packet if outage occurs only in transmitter-relay channel. Like that, transmitter stops sending new packet and allows XD relay to re-transmit the previous packet to the receiver if outage occurs only in relay-receiver channel. First XD relay re-transmits previous packet to the receiver and then the transmitter re-transmits the new packet to relay if outage occurs for both transmitter-relay and relay-receiver channels simultaneously.

ARQ-based HD relayed protocols are also considered in the thesis to evaluate the proposed ARQ-based XD relayed protocols' performance in terms of throughput, normalized effective data rate and packet success. Theoretical analysis is performed for both types of protocols and supported via computer simulations.

The thesis is organized as follows. In Section 2, the basic concepts like fading channel models, channel capacity, outage probability, automatic repeat-request technique are revisited. Section 3 deals with basic cooperation methods with different relaying protocols are revisited. Cognitive radio technique is presented in Section 4. New ARQ-based XD relayed protocols are developed in Section 5 and compared with their corresponding ARQ-based HD relayed protocols. The new protocols differ

in ARQ process applied only at the transmitter, only at the relay and at both transmitter and relay. The non-ARQ protocols are also taken as reference schemes. In Section 6, the best ARQ-based XD and HD relayed protocols are applied at the secondary user of an underlay cognitive radio network. As seen from the performance results of Section 5 and 6, XD relayed protocols achieve higher throughput than HD relayed protocols in return of a slight loss in the number of successively transmitted packets.





1. GİRİŞ

İletişim sistemlerinde son kullanıcıya daha kaliteli bir hizmet sunmak her zaman en büyük amaç olmuş, iletişim teknolojilerindeki gelişmeler de her zaman bu amaç doğrultusunda yol izlemiştir. Kullanıcıya kaliteli bir iletişim hizmeti sunmak için iletim gücü, band genişliği gibi kaynakların mümkün olduğunca sınırlanmadan kullanılması gerekir.

Tel ile bağlı iletişim sistemlerinde iletim ortamı olarak adanmış bir hat kullanıldığından, telli iletişim sistemlerinde iletim band genişliği, gürültü, kanal sönümlemesi gibi sınırlayıcı etkenlerin baskınlığı oldukça sınırlıdır. Sözü edilen avantajlar sonucunda tel ile bağlı iletişim sistemlerinde yüksek hızda, yüksek kaliteli iletişim hizmeti sunmak telsiz iletişim sistemlerine göre çok daha kolaydır. Bu bakımdan tel ile bağlı iletişim sistemlerinde telsiz iletişim sistemlerinin karşı karşıya olduğu dar boğaz teşkil eden sınırlar aşılmış ve bulut bilişim gibi yüksek hız ve band genişliği gerektiren sistemlerin önü açılmıştır.

Telsiz iletişim sistemlerinde ise durum daha farklıdır. Öncelikle telsiz iletişim sistemlerinde tel ile bağlı iletişim sistemlerinde olduğu gibi adanmış bir hat üzerinden değil, sayısız telsiz iletişim sistemi kullanıcısıyla paylaşılarak aynı iletim ortamı üzerinden iletişim kurulur. Bunun yanında kullanılan telsiz iletişim kanallarındaki sönümleme, iletişime ayrılmış sınırlı band genişliği ve gürültü gibi iletişim kalitesi üzerinde bozucu etkilere sahip etkenler nedeniyle telsiz iletişim sistemlerinin sistem karmaşıklığı artmakta ve telsiz iletişim kanalları üzerindeki yoğun kullanıcı baskısı nedeniyle yüksek hızlara çıkmak güç hale gelmektedir [1]. Ayrıca, geniş kullanıcı sayısına sahip iletişim sistemlerini, kanalın normal dağılıma yakınsadığı yüksek taşıyıcı frekanslarında çalıştırabilmek günümüz koşullarında olanaklı görünmemektedir.

Diğer taraftan gelişen teknolojiyle telsiz iletişim sistemlerinin boyutça küçülmesi, son kullanıcıya sunulan aygıtların ucuzlaması gibi nedenlerin yanında telsiz iletişim sistemlerinin cep telefonu, bilgisayar gibi uygulamalarının kullanıcıya esneklik ve

mekandan bağımsızlık gibi avantajlar sağlaması nedeniyle telsiz iletişim sistemlerine olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır.

Hızla artan kullanıcı sayısı radyo spektrumunun daha etkin bir şekilde kullanımını gerektirmektedir. Ancak radyo spektrumunun daha etkin kullanılmasına yönelik teknolojiler, kullanıcı sayısındaki hızlı artış karşısında yavaş kalmaktadır. Bunun yanında radyo spektrumunu paylaşımlı kullanan lisanslı servis sağlayıcıların sistemlerini yenilemeleri her zaman mümkün görünmemektedir. Ayrıca lisanslı kullanıcılar radyo spektrumunu her zaman verimli kullanmamakta, radyo spektrumunda zamanda, frekansta ya da uzayda boşluklar bulunmaktadır [2,3]. Söz konusu spektrum boşlukları, ikincil bir kullanıcının iletişim kurmasına olanak verecek bir fırsat olarak görülmüş ve literatürde söz konusu spektrum boşluklarını kullanan, bilişsel radyo yöntemi ortaya çıkmıştır [4].

Bilişsel radyo yöntemleri, radyo spektrumuna erişmek isteyen lisansız kullanıcılarla radyo spektrumunun kullanım hakkına sahip lisanslı kullanıcıların radyo spektrumuna ortak erişimini düzenler. Büyük kullanıcı sayılarına sahip olmaları nedeniyle lisanslı kullanıcıların altyapılarını değiştirmeleri oldukça zordur, bu nedenle radyo spektrumuna erişmek isteyen ikincil kullanıcıların başarımlarını artırmayı hedefleyen çalışmalar literatürde geniş yer tutmaktadır [5-8]. Ancak, bilişsel radyoda ikincil kullanıcıların başarımlarını birincil kullanıcının izin verdiği sınırlara doğrudan bağımlıdır. Bu nedenle bu tez kapsamında bilişsel radyoda ikincil kullanıcıda kullanılmak üzere, hem yüksek verimli iletim yapabilen hem de güvenilirliği yüksek iletişim protokollerinin tasarımı hedeflenmiştir.

Literatürde bilişsel radyo ağının ikincil kullanıcılarında kullanılmak üzere çeşitli işbirlikli sistemler önerilmiştir. Önerilen yarı-çift yönlü (HD) röleli iletişim sistemleri düşük iletim hızı ancak yüksek güvenilirlik sağlarken tam-çift yönlü (FD) röleli iletişim sistemleri düşük güvenilirlik ancak yüksek veri iletim hızı sağlamaktadır [9-14].

Bu nedenle, bu tez kapsamında, başarımlarını bilişsel radyoda birincil kullanıcının izin verdiği ölçütlere bağımlı olan ikincil kullanıcıda kullanılmak üzere hem yüksek veri iletim hızı hem de yüksek güvenilirlik sağlayan iletişim protokolleri önerilmiş, servis kesilme başarımları için kuramsal çıkarımları yapılmış ve bilgisayar benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İkincil kullanıcıda kullanılmak üzere, daha önce sözü

edilen yarı-çift yönlü aktarım ya da tam-çift yönlü aktarım yöntemleri yerine yeni bir karma aktarım (XD) yöntemi önerilmiştir. Önerilen karma aktarım yönteminde röle sistemin hangi bellek durumunda olduğuna göre ya yarı-çift yönlü aktarım ya da tam-çift yönlü aktarım yapmaktadır [15].

Önerilen XD röleli sistemlerin paket iletim başarımlarını artırmak için aynı zamanda otomatik yineleme isteme yöntemi kullanılmıştır [16-18]. Bunun yanında kullanılan XD rölenin getirisini daha iyi inceleyebilmek adına aynı koşullar altında HD röleli protokoller de göz önüne alınmış, servis kesilme başarımı için kuramsal çıkarımlar ve benzetim sonuçları XD röleli protokoller ile karşılaştırılmıştır. Başarım sonuçları ikincil kullanıcıda XD röleli protokol kullanmanın başarılı iletilen paket sayısında küçük bir düşüşe karşılık HD röleli protokol kullanımına göre etkin veri hızında kazanç sağladığını göstermektedir.

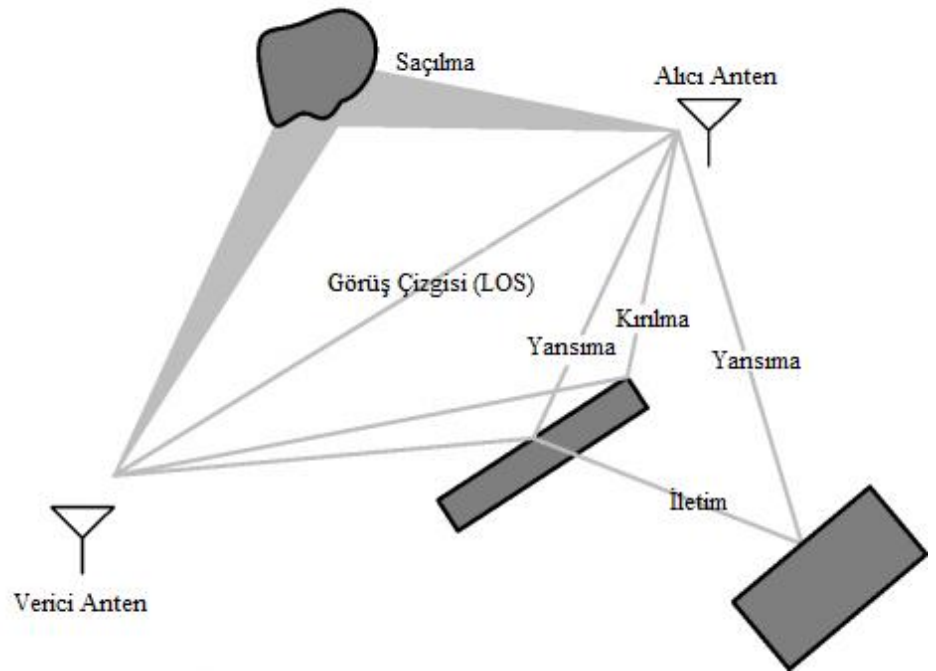


2. TELSİZ İLETİŞİM KANALLARI

2.1 Telsiz İletişim Kanallarının Bileşen Tanımları, Sınıflandırılması ve Modelleri

Tel ile bağlı iletişim sistemlerinde işaret vericiden alıcıya tek bir yol üzerinden iletilirken telsiz iletişim sistemlerinde işaret boşluğa ışınma yolu ile vericiden alıcıya iletilir. Bu da telsiz iletişim sistemlerinde işaretin alıcıya iletilirken daha rastlantısal ve farklı yollarla iletilmesine neden olur.

Telsiz iletişim sistemlerinin başarımları üzerindeki en büyük kısıtlayıcı etkenlerden biri işaretin iletim kanalında maruz kaldığı yol kayıplarıdır. Vericiden iletilen dalga verici anteni ile alıcı anteni arasındaki görüş çizgisi (LOS, Line of Sight) denilen varsayımsal bir doğru üzerinden hiçbir etkiye maruz kalmadan iletebilir ancak verici ve alıcı arasında genellikle farklı yollar da bulunmaktadır. İletilen dalga çevre etkenleri nedeni ile kırılmaya, yansımaya, saçılmaya uğrayarak da alıcıya iletebilir. Söz konusu bu olası yollar Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Verici ve alıcı arasında bulunan olası yollar.

Kırılma, elektromanyetik dalganın çevredeki herhangi bir cismin keskin köşesine çarpması ile meydana gelir. Saçılma ise iletilen elektromanyetik dalganın, dalga boyundan daha küçük nesnelere çarpışması ile oluşur. Elektromanyetik dalganın, dalga boyundan daha büyük bir nesneyle karşılaşması sonucunda ise yansıma meydana gelir [19]. Özellikle kentsel bölgelerde verici ve alıcı arasında görüş çizgisinin bulunması her zaman mümkün değildir. Bu gibi durumlarda verici ve alıcı arasındaki iletişim ancak yansıma, saçılma, kırılma etkilerine maruz kalmış bozulmuş işaretler ile mümkün olmaktadır.

2.1.1 Kanal bileşenlerinin tanımları

2.1.1.1 Çok yollu yayılım

Tel ile bağlı iletişim sistemlerinde işaret alıcıya tel üzerinden tek bir yol ile iletilirken telsiz iletişim sistemlerinde elektromanyetik dalga boşlukta serbest bir şekilde ilerler. Boşlukta ilerleyen dalga çevre etkenleri nedeni ile kırılma, yansıma, saçılma gibi etkilere maruz kalır. Alıcıya görüş çizgisi üzerinden iletilen asıl işaretin yanında kırılma, yansıma, saçılma etkilerine maruz kalmış işaret bileşenleri de iletilir. Alıcıya görüş çizgisi üzerinden iletilen asıl işarete eklenen bu bileşenlere çok yollu işaret bileşenleri, bu duruma da çok yollu yayılım adı verilir. Çok yollu işaret bileşenleri farklı çevresel etkilere maruz kaldıkları için faz, genlik ve zaman değerleri asıl işarete göre farklılık gösterecektir. Bu durumda alıcıya gelen işaret üzerinde bozucu bir etkiye neden olacaktır. Kırılma, yansıma, saçılma yolu ile alıcıya gelen bileşenler, boşlukta verici ve alıcı arasındaki en kısa mesafe olan görüş çizgisi üzerinden iletilen asıl işarete göre alıcıya daha geç geleceklerdir. Bu nedenle maksimum zaman gecikmesi olarak da bilinen çok yollu yayılım iletilen işaretin alıcıdaki ilk ve son görünümü arasındaki zaman farkına denilmektedir ve T_m ile ifade edilir.

2.1.1.2 Doppler yayılımı

Tel ile bağlı iletişim sistemlerinin hareket kabiliyeti oldukça sınırlıyken telsiz iletişim sistemlerinde verici ya da alıcı veya her ikisi birden hareket etme yeteneğine sahip olabilir. Ancak sistem uçlarının birbirlerine göre bağıl hızlarının sıfırdan farklı olması durumunda ise alınan elektromanyetik dalganın merkez frekansında kayma meydana gelecektir. Bu durumda vericiden iletilen işaret ile alıcıda alınan işaretin merkez frekansları farklı olacaktır, bu farka Doppler frekans kayması adı verilir. f_d

Doppler frekans kaymasını, v verici ve alıcının bağıl hızını, λ elektromanyetik dalganın dalga boyunu, c elektromanyetik dalganın yayıldığı ortamdaki yayılma hızını, f_c iletilen elektromanyetik dalganın merkez frekansını, θ ise alıcının vericiye göre bağıl hareketinin yönüne göre elektromanyetik dalganın alıcıya geliş açısını göstermek üzere Doppler frekans kayması denklem 2.1'deki gibi ifade edilir:

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos \theta = \frac{vf_c}{c} \cos \theta. \quad (2.1)$$

Denklem 2.1 ifadesinde de görüldüğü gibi eğer verici ve alıcı bağıl olarak yaklaşıyorsa, yani $\cos \theta$ pozitif değerler alıyorsa Doppler frekans kayması ifadesi de pozitif değerler olacaktır. Ters durumda ise Doppler frekans kayması negatif değerler olacaktır. Doppler frekans kaymasının pozitif ya da negatif yönde büyümesi alıcıya gelen işaret üzerindeki sönmleme etkisini de artıracaktır. Bu durum alıcıya gelen işaretin merkez frekansının, vericiden iletilen işaretin merkez frekansından farklı olmasına neden olacaktır. Bu olaya Doppler yayılımı adı verilir.

2.1.1.3 Uyum band genişliği

Çok yollu yayılım sonucu alıcıya gelen işaretin bileşenleri farklı gecikmelerle alıcıya gelir. Alıcıda işaretin ilk ve son görünümü arasındaki maksimum zaman farkı T_m ile uyum band genişliği B_c arasındaki ilişki denklem 2.2'de gösterilmiştir:

$$B_c = \frac{1}{T_m}. \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'de görüldüğü gibi uyum band genişliği ile maksimum zaman farkı arasında ters orantı mevcuttur.

2.1.1.4 Uyum zamanı

Kanalın darbe yanıtının sabit ya da yüksek ilişkili olduğu zaman aralığına uyum zamanı T_c denir. Dolayısıyla uyum zamanı süresince işaretin iletildiği ortamda kanal karakteristiğinde önemli bir değişim olmadığı kabul edilir. Sönümlemeli kanaldan uyum zamanından daha kısa bir zaman aralığıyla alınan iki işaret de yüksek ilişkili

olacaktır. Uyum zamanı T_c ile Doppler frekans kayması f_d arasındaki ilişki denklem 2.3'te verilmiştir:

$$T_c = \frac{1}{f_d}. \quad (2.3)$$

2.1.2 Sönümlenmeli kanalların sınıflandırılması

Telsiz iletişim sistemlerinde kanalın iletilen işaret üzerindeki bozucu etkileri, işaretin ani genlik ve faz değerlerinde değişime neden olan küçük ölçekli sönümlenme ve yol kaybı ya da zayıflama olarak da bilinen, yeryüzü şekillerinin ya da çok katlı yapıların neden olduğu büyük ölçekli sönümlenme olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir [20].

Büyük ölçekli sönümlenme işaretin geniş alanlarda yayılması sonucu alıcıya gelen işaretin gücünün vericiden çıkan işaretin gücüne oranla zayıflamasını ifade eder. Yüksek yer şekillerinin, çok katlı yapıların ve verici ve alıcı arasındaki mesafenin neden olduğu bu etkiye gölgeleme denir.

Küçük ölçekli sönümlenme ise dört alt başlığa ayrılır. Bu dört küçük ölçekli sönümlenme çeşidi düz sönümlenme, frekans seçici sönümlenme, yavaş sönümlenme ve hızlı sönümlenme olarak adlandırılır. Telsiz iletişim kanallarında küçük ölçekli sönümlenme iki ana nedenle oluşur. Bunlardan ilki çok yollu yayılım etkisi düz sönümlenme ve frekans seçici sönümlenmeye neden olurken Doppler frekans kayması etkisi ise hızlı sönümlenme ve yavaş sönümlenmeye neden olur.

2.1.2.1 Düz sönümlenme

Çok yollu yayılım etkisiyle ortaya çıkan düz sönümlenmeye iki etken neden olur. Bunlardan ilki kullanılan kanalın maksimum zaman gecikmesi T_m 'nin işaretin simge periyodu T_s 'den küçük olmasıdır. İkinci etken ise gönderilen işaretin band genişliği B_s 'nin kanalın uyum band genişliği B_c 'den küçük olmasıdır. Düz sönümlenmeli kanallarda bu nedenlerle kanalın işaret boyunca sabit kazançlı ve doğrusal fazlı olduğu kabul edilir. Ancak çok yollu yapı nedeniyle düz sönümlenmeli kanalların kazancı zamanla değişmekte, dolayısıyla işaretin alıcıdaki gücünde değişimlere neden olmaktadır. İşaret band genişliği B_s 'nin uyum band genişliği B_c 'den çok daha küçük olması nedeniyle kanalda derin sönümlenmelerin görülmesine neden olur. Bu

nedenle düz sönümlenmeli kanallarda, sönümlenmeli olmayan kanallarda görülen hata başarımını yakalayabilmek için işaret çok daha yüksek güçle iletilmelidir.

2.1.2.2 Frekans seçici sönümleme

Çok yollu yayılımın neden olduğu ikinci küçük ölçekli sönümleme çeşidi ise frekans seçici sönümlemedir. Kanalın maksimum zaman gecikmesi T_m işaretin simge periyodu T_s 'den büyük ve işaretin band genişliği B_s 'nin kanalın uyum band genişliği B_c 'den büyük olması durumunda kanal frekans seçici sönümlenmelidir. Kanal band genişliğinin işaret band genişliğinden küçük olması kanalın zaman gecikmesinin simge periyodundan daha büyük olmasına neden olmaktadır. Bu da işaretin farklı frekans bileşenlerinin birbirinden bağımsız sönümlenmelere maruz kalmasına neden olurken aynı zamanda da işaretin zamanda yayılıma uğramasına neden olmaktadır. Bu durum işaretin birçok zayıflamış gecikmiş bileşeninin olmasına neden olur. İşaretin zamanda yayılıma uğramış olması simgeler arası girişime neden olur. Dolayısıyla frekans seçici sönümleme işaret üzerinde düz sönümlemeye kıyasla daha bozucu bir etkiye sahiptir.

2.1.2.3 Yavaş sönümleme

Verici ve alıcının birbirine göre bağıl hareketi nedeniyle ortaya çıkan Doppler frekans kayması f_d 'nin işaret band genişliği B_s 'den daha küçük, dolayısıyla kanalın uyum zamanı T_c 'nin işaret periyodu T_s 'den daha büyük olması nedeniyle kanalın dürtü yanıtı, işaret band genişliğine kıyasla daha yavaş değişecektir. Kanal değişim zamanının simge periyodundan daha büyük olması, verici ve alıcı arasındaki bağıl hareketin kanal üzerinde hiç ya da çok az etki bırakmasına neden olur. Bu durumda yavaş sönümleme meydana gelir ve sönümleme katsayısının birkaç simge periyodu boyunca değişmediği düşünülebilir.

2.1.2.4 Hızlı sönümleme

Verici ve alıcının birbirine göre bağıl hareketi nedeniyle ortaya çıkan Doppler frekans kayması f_d 'nin işaret band genişliği B_s 'den daha büyük, dolayısıyla kanalın uyum zamanı T_c 'nin işaret periyodu T_s 'den daha küçük olması durumunda kanalın dürtü yanıtı, işaret band genişliğine kıyasla daha hızlı değişecektir, yani kanalı darbe yanıtı simge periyodundan daha hızlı değişmektedir. Bu durum da işaretin frekans spektrumunda yayılmasına neden olacak, sonuçta simgeler arası girişim meydana

gelecektir. Hızlı sönümleme, yavaş sönümlemeye göre sistem başarımı üzerinde daha fazla bozucu etkiye sahiptir.

2.1.3 Sönümlenmeli kanal modelleri

2.1.3.1 Rayleigh dağılımı

Telsiz iletişim sistemlerinde verici ve alıcı arasında çoğunlukla görüş çizgisi bulunmamaktadır. Bu durumda verici ve alıcı arasındaki iletişim kırılan, yansıyan ve saçılan işaret bileşenleri ile mümkün olmaktadır. Bu durumda, Rayleigh dağılımı düz sönümlemeye maruz kalmış işaretin alıcıdaki zarfının istatistiksel olarak zamanla değişimini tanımlamak için kullanılır [20]. I ve Q alıcıya gelen işaretin dik bileşenleri olmak üzere verici ve alıcı arasında görüş çizgisi bulunmadığı hallerde çok yönlü bileşenlerin alıcıdaki toplamı,

$$r(t) = I \cos(2\pi f_c t) - Q \sin(2\pi f_c t) \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir. Alıcıya gelen işaretin dik bileşenleri I ve Q denklem 2.5 ve denklem 2.6'da ifade edilmiştir:

$$I = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cos \varphi_i, \quad (2.5)$$

$$Q = \sum_{i=1}^N \alpha_i \sin \varphi_i. \quad (2.6)$$

Burada α_i ve φ_i , i . yola ilişkin genlik ve faz sönümlenmelerini göstermektedir. Elektromanyetik dalganın dağıldığı alandaki çevresel etkenlerin birbirinden bağımsız bir şekilde rastgele dağıldığı düşünüldüğünde, çok yönlü yayılımla alıcıya gelen işaretin bileşen (yol) sayısının sonsuza gittiği kabul edildiğinde işaretin dik bileşenleri I ve Q istatistiksel bağımsız, sıfır ortalamalı, σ^2 varyanslı Gauss dağılımlı olacaktır. Bu durumda alıcıdaki işaretin zarfı Rayleigh dağılımlı olacaktır. Denklem 2.7'de Rayleigh dağılımının olasılık yoğunluk işlevi ifade edilmiştir:

$$P_{Rayleigh}(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, & 0 \leq r \leq \infty \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Rayleigh dağılımının ortalama değeri ve varyansı ise sırasıyla denklem 2.8 ve denklem 2.9’da ifade edilmiştir:

$$r_{ort} = E[r] = \int_0^{\infty} rp(r)dr = \sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_r^2 &= E[r^2] - E^2[r] = \int_0^{\infty} r^2p(r)dr - \sigma^2\frac{\pi}{2} \\ &= 2\sigma^2 - \sigma^2\frac{\pi}{2} = \sigma^2\left(2 - \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (2.9)$$

2.1.3.2 Ricean dağılımı

Verici ve alıcı arasında görüş çizgisi bulunması durumunda ise alıcıdaki işaret, görüş çizgisi üzerinden doğrudan alınan işaret ile rastgele yollardan gelen işaret bileşenlerinin toplamı olacaktır [20]. Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi verici ve alıcı arasında görüş çizgisi yokken kanal Rayleigh dağılımı ile modellenirken, verici ve alıcı arasında görüş çizgisi olması durumunda kanal Ricean dağılımı ile modellenmektedir. Görüş çizgisi üzerinden gelen işaret bileşeni nedeniyle kanalın sönmüleme katsayısı sıfırdan farklı ortalama bir kompleks Gauss rastgele değişkeni olacaktır. Sönümlemenin zarfı Ricean dağılımlı olup olasılık yoğunluk işlevi,

$$P_{Ricean}(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A_0^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{rA_0}{\sigma^2}\right) \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilir. Burada A_0 baskın işaretin maksimum genliğini, $I_0(\cdot)$ 0. derece 1. çeşit Bessel işlevini göstermektedir. Ricean katsayısı K doğrudan gelen işaret bileşeninin gücünün diğer yollardan gelen işaret bileşenlerinin gücüne oranını göstermekte olup denklem 2.11’de ifade edilmiştir:

$$K(dB) = 10 \log_{10} \frac{A_0^2}{2\sigma^2}. \quad (2.11)$$

Doğrudan gelen işaret bileşeni olmaması durumunda ($A_0 = 0$) $K = -\infty$ olacaktır. Bu durumda kanal Rayleigh dağılımlı hale gelmektedir. $K \gg 1$ olması durumunda ise Ricean dağılımı Gauss dağılımına yakınsamaktadır.

2.2 Kanal Sığıası, Servis Kesilme Olasılığı, Etkin Veri Hızı ve Verim

2.2.1 Kanal sığıası

Telsiz iletişim sistemlerinde kanal sönümlenmesi nedeniyle verici ve alıcı düğümler arasında taşınabilecek veri miktarı belli parametrelerle sınırlanmaktadır. Bu iki düğüm arasındaki kanalda birim zamanda taşınabilecek en büyük veri miktarı kanal sığıası (channel capacity) olarak adlandırılır [21]. Shannon tarafından (1948) gösterildiği gibi kanalda taşınabilecek en büyük veri miktarının beklenen değeri denklem 2.12’de ifade edilmiştir:

$$\bar{C} = W \log_2 \left(1 + \frac{P\sigma^2}{N_0W} \right). \quad (2.12)$$

Burada kanal sığıası \bar{C} bit/sn cinsinden olup, W iletim band genişliğini, P vericinin iletim gücünü, N_0 toplamsal beyaz Gauss gürültüsünün tek yönlü güç spektral yoğunluğunu göstermektedir. Verici ve alıcı arasında h ile gösterilen Rayleigh dağılımlı kanalın sönümlenme katsayısı ise $CN(0, \sigma^2)$ olarak alınmıştır. $CN(.,.)$ kompleks Gauss dağılımını göstermekte olup argümanındaki ilk değer ortalamasına, ikinci değer varyansına karşı düşer. Aynı kanalın sığıası, iletim band genişliğine normalize olarak ise denklem 2.13’deki gibi ifade edilir:

$$\bar{R} = \log_2(1 + \bar{\gamma}). \quad (2.13)$$

Burada \bar{R} bit/sn/Hz cinsinden olup, $\bar{\gamma}$ alıcıdaki beklenen ortalama işaret-gürültü oranını (SNR, signal-to-noise ratio) ifade etmektedir. İşaret-gürültü oranı $\bar{\gamma}$ ’nın açık ifadesi ise denklem 2.14’te görülebilir:

$$\bar{\gamma} = \frac{P\sigma^2}{N_0}. \quad (2.14)$$

Rayleigh dağılımlı kanallar farklı zaman aralıklarında istatistiksel olarak birbirinden bağımsız değerler alabilir. Bu da kanalda anlık olarak taşınabilecek maksimum veri miktarının değişmesi anlamına gelir. Kanalın anlık sığıası,

$$R = \log_2(1 + \gamma) = \log_2 \left(1 + \frac{P|h|^2}{N_0} \right) \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir. Burada görüldüğü gibi anlık iletim sığası, alıcıdaki anlık işaret-gürültü oranına, alıcıdaki anlık işaret-gürültü oranı da kanalın sönümlenme katsayısının karesel zarfı $|h|^2$ 'ye bağlıdır. Alıcıdaki anlık işaret-gürültü oranı,

$$\gamma = \frac{P|h|^2}{N_0} \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir.

2.2.2 Servis kesilme olasılığı

İletim hızının, kanalda taşınabilecek maksimum veri miktarının anlık değerini geçmesi durumunda servis kesilme olayı (outage) meydana gelir [Shannon]. Servis kesilme durumunda alıcının vericiden gelen işareti çözmesi mümkün değildir. Vericiden alıcıya R' hızında iletim yapılmaya çalışıldığında servis kesilme olasılığı (probability of service outage),

$$p_{out} = Pr[R' > R] \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir. Anlık kanal sığası ifadesi yerine konulacak olursa,

$$p_{out} = Pr \left[R' > \log_2 \left(1 + \frac{P|h|^2}{N_0} \right) \right] \quad (2.18)$$

ifadesi elde edilir. Denklem 2.18 ifadesinde kanalın sönümlenme katsayısının karesel zarfı $|h|^2$ yalnız bırakılarak,

$$p_{out} = Pr \left[\frac{(2^{R'} - 1)N_0}{P} > |h|^2 \right] \quad (2.19)$$

elde edilir. Rayleigh sönümlenmeli h kanal katsayısının zarfının karesel değeri $|h|^2 = X$ kabul edilerek X 'in olasılık yoğunluk işlevi üstel dağılımlı olarak,

$$p(X) = \frac{1}{\bar{X}} e^{-X/\bar{X}} \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada \bar{X} , X 'in beklenen değeridir. Bu durumda servis dışı kalma olasılığı,

$$p_{out} = \int_A^B p(X) dx \quad (2.21)$$

şeklini alacaktır. Burada integral alt sınırı A , $|h|^2$ sıfırdan daha küçük bir değer alamayacağı için sıfır olacaktır. İntegral üst sınırı B için ise denklem 2.19'un sol tarafındaki değer yerine konulursa,

$$p_{out} = \int_0^{\frac{(2^{R'}-1)N_0}{P}} p(X) dx = \int_0^{\frac{(2^{R'}-1)N_0}{P}} \frac{1}{\bar{X}} e^{-X/\bar{X}} dx \quad (2.22)$$

ifadesi elde edilir. $\bar{X} = E[|\bar{h}|^2] = \sigma^2$ ifadesi denklem 2.22'de yerine konularak,

$$p_{out} = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^{\frac{(2^{R'}-1)N_0}{P}} e^{-X/\sigma^2} dx \quad (2.23)$$

ifadesine ulaşılır. Denklem 2.23'teki integral çözümlenerek servis kesilme olasılığı,

$$p_{out} = 1 - e^{-\frac{(2^{R'}-1)N_0}{\sigma^2 P}} \quad (2.24)$$

şeklinde hesaplanır.

Bilindiği gibi telsiz iletişim sistemlerinde, var olan bütün kullanıcılar iletim kanalı olarak atmosferi paylaşmaktadır. Bu şekilde sınırlı bir kaynağın çok sayıda kullanıcı tarafından kullanılması nedeniyle aynı frekansta iletişim kuran farklı kullanıcılar yeterince yakınlaştıklarında birbirlerinin işaretlerini alabilmektedir. Bu durumda alıcıda, vericiden iletilen işaret bileşenlerinin yanında farklı sistemlerin işaret bileşenleri de görülmektedir. Bu duruma girişim (Interference) adı verilir. Girişim alıcı üzerinde gürültü benzeri bozucu bir etkiye neden olur ve sistem başarımını düşürür. Bu durumda alıcıda girişime neden olan bileşenlerin toplam gücü P_I olmak üzere, alıcıdaki anlık işaret-girişim-ve-gürültü oranı (SINR, Signal-to-Interference-and-Noise Ratio),

$$\gamma_{Int} = \frac{P|h|^2}{P_{Int} + N_0} \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem 2.25 göz önüne alındığında kanalın anlık sığası,

$$R_{Int} = \log_2(1 + \gamma_{Int}) = \log_2\left(1 + \frac{P|h|^2}{P_{Int} + N_0}\right) \quad (2.26)$$

olacaktır. Denklem 2.26, denklem 2.17 ve denklem 2.18'de yerine konularak,

$$p_{out_{Int}} = Pr\left[\frac{(2^{R'} - 1)(P_{Int} + N_0)}{P} > |h|^2\right] \quad (2.27)$$

elde edilir. $|h|^2 = X$, ve $\bar{X} = E[X]$ olmak üzere,

$$p_{out_{Int}} = \int_0^{\frac{(2^{R'} - 1)(P_{Int} + N_0)}{P}} p(X) dx = \int_0^{\frac{(2^{R'} - 1)(P_{Int} + N_0)}{P}} \frac{1}{\bar{X}} e^{-X/\bar{X}} dx \quad (2.28)$$

elde edilir. $\bar{X} = E[|h|^2] = \sigma^2$ ifadesi denklem 2.28'de yerine konularak,

$$p_{out} = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^{\frac{(2^{R'} - 1)(P_{Int} + N_0)}{P}} e^{-X/\sigma^2} dx \quad (2.29)$$

ifadesine ulaşılır. Denklem 2.29'daki integral çözülerek alıcıda P_{Int} gücünde girişim bileşeni görüldüğünde servis kesilme olasılığı,

$$p_{out} = 1 - e^{-\frac{(2^{R'} - 1)N_0}{\sigma^2 P}} \quad (2.30)$$

şeklinde hesaplanır.

2.2.3 Etkin veri hızı ve verim

Telsiz iletişim sistemlerinde verici alıcıya belli bir hızla veri iletmeye çalışır. Ancak bir önceki bölümde de görüldüğü gibi telsiz iletişim kanallarında bazen servis kesilme durumu yaşanabilir. Bu durumda vericiden iletilen paket alıcı tarafından alınamaz. Bu durumda alıcı tarafından alınamayan paket için ayrılan kaynakların sistem başarımına anlamlı bir katkı yapmadığı aşikardır. Alıcı tarafından alınamayan

her bir paket etkin veri hızını (Efficient Data Rate, Throughput, Goodput), yani toplam harcanan zamanda alıcı tarafından alınan toplam başarılı paket sayısı oranını düşürecektir. Servis kesilme olasılığı ile η_{eff} etkin veri hızı arasındaki ilişki, R vericinin iletim hızı, p_{out} sistemin servis kesilme olasılığı olmak üzere,

$$\eta_{eff} = R(1 - p_{out}) \quad (2.31)$$

şeklinde. Bu durumda normalize veri iletim hızı (Normalized Efficient Data Rate), yani sistemin hız açısından verimi η ise “etkin veri hızı/verici veri hızı” oranıyla bulunur. Buna göre sistem verimi,

$$\eta = \frac{R(1 - p_{out})}{R} = 1 - p_{out} \quad (2.32)$$

şeklinde ifade edilir.

2.3 Otomatik Yineleme İsteme

İletişim sistemlerinin en temel amaçlarından birisi bilgiyi hedef birimlere mümkün olduğunca hızlı ve doğru bir şekilde iletmektir. Ancak bu noktada iletişim sistemlerini önceliklerine göre iki gruba ayırmak mümkündür. İlk grup olan hız ve gecikmeye duyarlı iletişim sistemlerinde verinin hedef birime mümkün olduğunca hızlı bir şekilde iletilmesi amaçlanır. Hız ve gecikmeye duyarlı iletişim sistemlerinde verinin hatasız bir şekilde iletilmesi ise ikinci plandadır. İkinci grup olan bilginin güvenilirliğine duyarlı sistemlerde ise bilginin hedef birime hatasız bir şekilde iletilmesi ana amaçtır. Bilginin güvenilirliğine hassas sistemlerde verinin hızlı iletilmesi ikinci plandadır.

İletişim sistemlerinde bilgi güvenilirliğini artırmanın yollarından biri vericiden alıcıya iletilen işaretin alıcı tarafından alınıp alınmadığını kontrol etmek, eğer işaret iletilmediyse aynı işaretin vericiden tekrar göndermektir. Otomatik yineleme isteme kullanan sistemlerde hedef birim eğer vericiden gönderilen paketi almışsa vericiye bir onay paketi (ACK, acknowledgement packet) gönderir. Ters durumda ise vericiye paketin alınmadığına dair bir paket (NACK) gönderecektir. Hedef birimin vericiden gelen paketi alamaması durumunda verici paketi yeniden gönderecektir. Hedef birimden vericiye gönderilen ACK ya da NACK paketinin vericiye

iletilememesi durumunda ise verici paketin iletilemediğini kabul ederek yeniden gönderir.

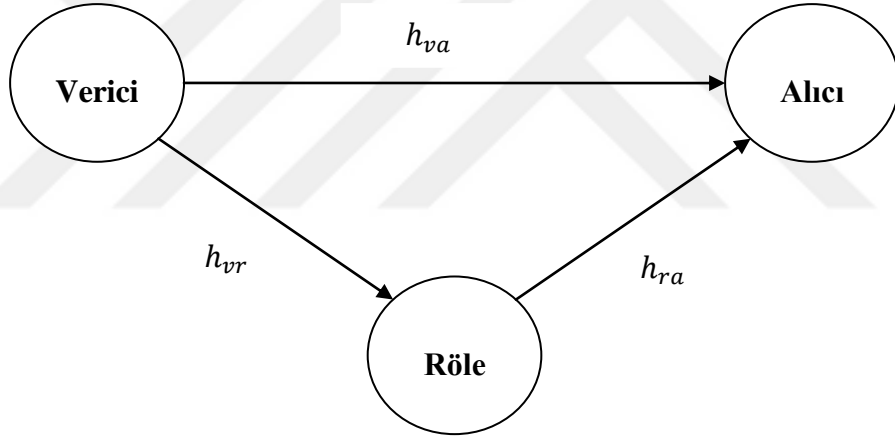
Otomatik yineleme isteme sistemlerinde hata kontrolü simge bazında değil, çerçeve (frame) bazında yapılmaktadır. Bu nedenle yeniden iletim söz konusu olduğunda ilgili çerçeve bir bütün halinde yeniden iletilir. Otomatik yineleme istemeli sistemlerde hedef birimin alıcıya onay paketi göndermesi gönderilen paketin hedef birimde doğru çözüldüğü anlamına gelmediği göz ardı edilmemelidir. Anlık kanal sığıası altındaki hızlarda iletim yapılması verimli bir iletişim için gerek koşulsada yeter koşul değildir.

Otomatik yineleme isteme uygulamalarının literatürde birçok farklı biçimi bulunmaktadır. Bu tez kapsamında yalnızca dur ve bekle otomatik yineleme isteme yöntemi kullanılmıştır. Alıcıdan gönderilen ACK ve NACK geri beslemelerinde hata oluşmadığı varsayılmıştır.



3. TELSİZ İLETİŞİMDE İŞBİRLİĞİ

Telsiz iletişim sistemlerinde uç birimler olan verici ve alıcı arasında sönümlenme nedeniyle her zaman doğrudan iletişim kurmak mümkün olmayabilir. Verici ve alıcının doğrudan iletişim kuramadığı ya da verici ve alıcı arasındaki kanalin sönümlenme etkilerinden oldukça fazla etkilenmeleri durumunda iletişimin kalitesini artırmak için iletişim sistemine yardımcı düğümler eklenebilir. Verici ve alıcı arasındaki iletişime yardımcı olması için bir veya daha fazla yardımcı düğümün iletişim sistemine dahil edildiği sistemler, işbirlikli sistemler olarak adlandırılır. Yardımcı düğümlü (röle) örnek bir işbirlikli sistem Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Verici, alıcı ve bir adet röleden oluşan işbirlikli iletişim sistem modeli.

İşbirlikli iletişim sistemlerinin getirdiği en büyük avantaj sisteme çeşitleme kazancı kazandırmasıdır. İşbirlikli iletişimde düğüm çiftleri arasındaki bağımsız kanallar sayesinde vericiden alıcıya iletilirken paketin başarılı bir şekilde iletilme olasılığı artırılmış olur. Aynı zamanda işbirliği sayesinde alıcıya iletilen paketin bağımsız kanallar üzerinden kopyaları iletilerek sistem başarımını iyileştirme olanağı ortaya çıkmaktadır [19].

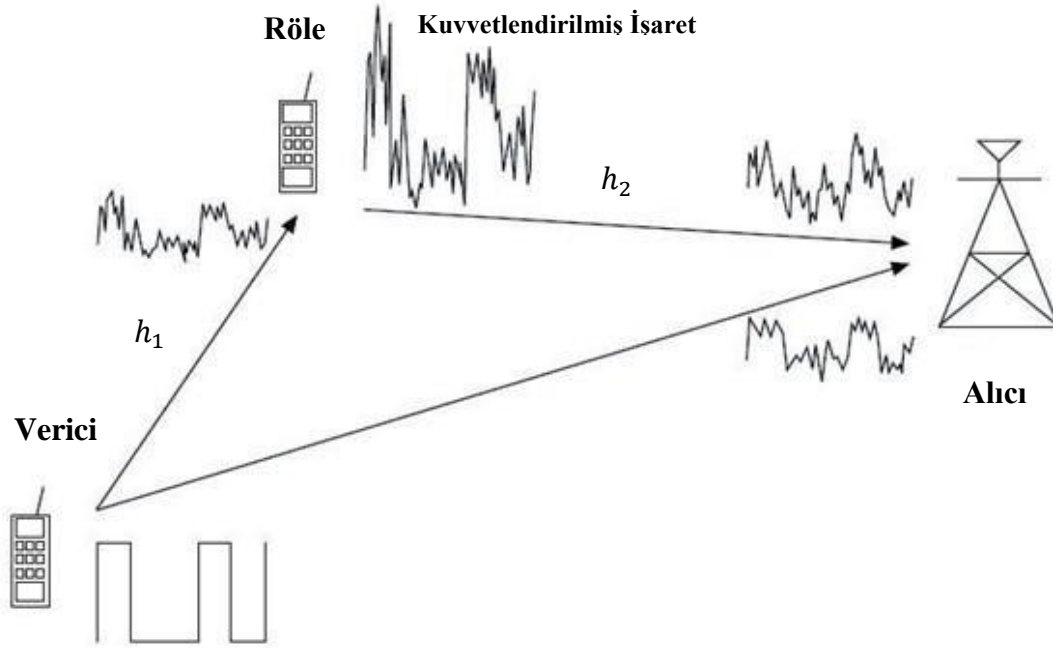
Bu bölümde öncelikle temel işbirliği yöntemleri anlatılacaktır. Daha sonra ise çalışma şekline göre işbirliğine yardımcı olan yardımcı düğümler yani röleler anlatılacaktır.

3.1 İşbirliği Yöntemleri

Bu bölümde temel işbirliği yöntemlerinden kuvvetlendir-ve-aktar (AF, amplify-and-forward) ve çöz-ve-aktar (DF, decode-and-forward) yöntemleri anlatılacaktır. Literatürde daha farklı yöntemler olsa da bu tez kapsamında değerlendirilmediği için bu yöntemlere değinilmemiştir.

3.1.1 Kuvvetlendir-ve-aktar yöntemi

Kuvvetlendir-ve-aktar yöntemi uygulanması en kolay ve en az maliyetli işbirliği yöntemidir. Bu yöntemde sönmleme etkisi nedeniyle vericiden röleye iletilen işaretin hem faz bileşenlerinde hem de genlik bileşenlerinde bozulma meydana gelecektir. Ancak işaret bileşenlerindeki bu bozulmayı düzeltmek amacıyla rölede herhangi bir işlem yapılmaz. Bunun yerine röleye gelen işaret belli bir katsayı ile normalize edip güçlendirilerek alıcıya iletilir. Sistem modeli Şekil 3.2’de görülebilir.



Şekil 3.2: Kuvvetlendir-ve-aktar sistem modeli.

Kuvvetlendir-ve-aktar yöntemiyle çalışan işbirlikli iletişim sistemlerinde bir paketin vericiden alıcıya iletilmesi iki işaretleşme aralığında gerçekleşir. İlk işaretleşme aralığında vericiden iletilen paket aynı anda hem alıcıya hem de röleye iletilir. İkinci işaretleşme aralığında ise röle, ilk işaretleşme aralığında vericiden alınan işareti belli bir katsayı ile güçlendirerek röleye iletir. Bu iki işaretleşme aralığı sonunda alıcı, verici ve röleden gelen işaret bileşenlerinin toplamına göre karar verir [22, 23].

Vericiden röleye ve röleden alıcıya olan kanallar kuvvetlendir-ve-aktar yöntemiyle çalışan işbirlikli sistemlerde tek bir kanal olarak düşünülür. Verici ve röle arasındaki kanal sönümlenme katsayısı $h_1 \sim CN(0, \sigma_1^2)$, röle ve alıcı arasındaki kanal sönümlenme katsayısı $h_2 \sim CN(0, \sigma_2^2)$, röledeki gürültü $n_1 \sim CN(0, N_1)$, alıcıdaki gürültü $n_2 \sim CN(0, N_2)$ olmak üzere, tümü kompleks Gauss dağılımlıdır. $CN(.,.)$ argümanındaki ilk değer ortalamayı, ikinci değer varyansı göstermektedir. Buna göre vericiden röleye ve röleden alıcıya iletişimin sağlandığı kaskat kanalın anlık kanal sığası R_{AF} , P_1 verici gücünü göstermek üzere,

$$R_{AF} = \frac{1}{2} E \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_1 |h_2 g h_1|^2}{N_2 + N_1 |h_2 g|^2} \right) \right] \quad (3.1)$$

şeklinde hesaplanır. Burada P_2 röle gücünü göstermek üzere g ,

$$g = \sqrt{\frac{P_2}{P_1 |h_1|^2 + N_1}} \quad (3.2)$$

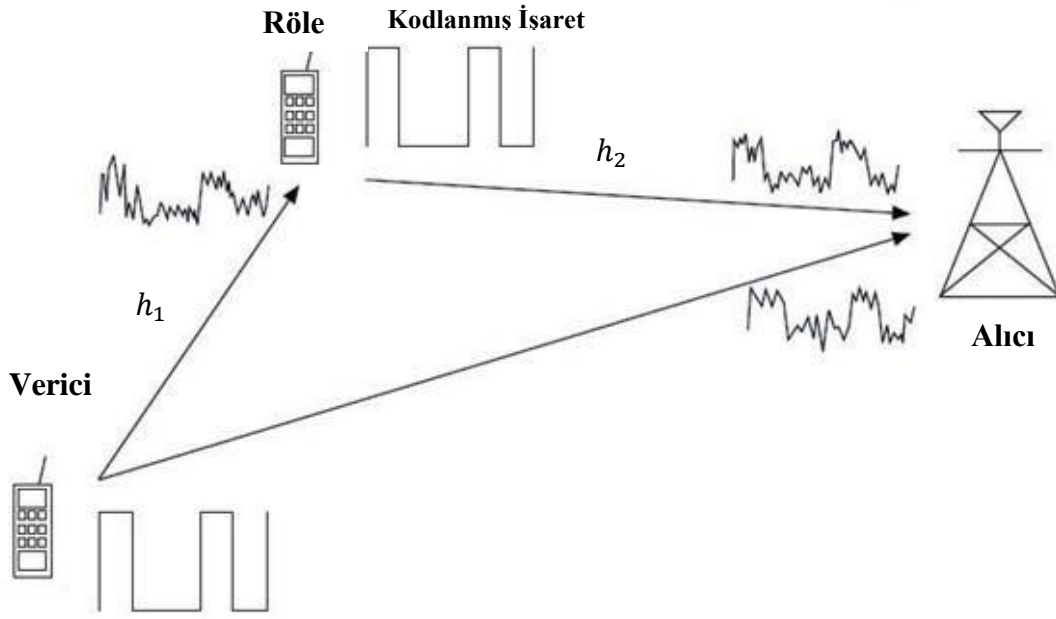
şeklinde hesaplanır [24].

3.1.2 Çöz-ve-aktar yöntemi

Çöz-ve-aktar yöntemi, kuvvetlendir-ve-aktar yöntemine kıyasla daha karmaşık bir yöntem olmakla beraber aynı zamanda uygulanması da daha maliyetlidir. Buna karşın işbirlikli sistemlerde kuvvetlendir-ve-aktar yöntemine kıyasla sistem başarımına daha etkin bir şekilde katkı sağlar. Çöz-ve-aktar yöntemini kullanan işbirlikli sistemlerde röle vericiden aldığı işareti çözer, daha sonra işareti tekrar kodlayarak alıcıya iletir. Sistem modeli Şekil 3.3'te görülebilir.

Çöz-ve-aktar yönteminde, kuvvetlendir-ve-aktar yöntemindeki gibi, vericiden gönderilen paketin alıcıya ulaşması iki işaretleşme aralığında gerçekleşir. İlk işaretleşme aralığında vericiden iletilen paket aynı anda hem röleye hem de alıcıya iletilir. Birinci işaretleşme aralığı sonunda röle vericiden gelen paketi çözer ve tekrar kodlayarak ikinci işaretleşme aralığında alıcıya iletir [22, 23].

Çöz-ve-aktar yöntemini kullanan işbirlikli sistemlerde verici-röle ve röle-alıcı arasındaki kanallar, kuvvetlendir-ve-aktar yöntemindeki gibi kaskat yapıdaki tek bir kanal gibi değil, birbirinden bağımsız iki ayrı kanal olarak ele alınır. Verici ve röle



Şekil 3.3: Çöz-ve-aktar sistem modeli.

arasındaki kanal sönümleme katsayısı $h_1 \sim CN(0, \sigma_1^2)$, röle ve alıcı arasındaki kanal sönümleme katsayısı $h_2 \sim CN(0, \sigma_2^2)$, röledeki gürültü $n_1 \sim CN(0, N_1)$, alıcıdaki gürültü $n_2 \sim CN(0, N_2)$, P_1 verici gücünü, verici-röle ve röle-alıcı arasında iletişimin sağlandığı kanalların sırasıyla anlık kanal sığaları R_{DFVR} ve R_{DFRA} olmak üzere,

$$R_{DFVR} = \frac{1}{2} E \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_1 |h_1|^2}{N_1} \right) \right], \quad (3.3)$$

$$R_{DFRA} = \frac{1}{2} E \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{N_2} \right) \right] \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir [24].

3.2 Yarı-Çift Yönlü Aktarım ve Tam-Çift Yönlü Aktarım

İşbirlikli iletişim sistemlerinde röleler bir uçtan aldıkları veriyi diğer uca iletmekle görevlidirler. Bu bağlamda işbirlikli iletişim sistemlerinde röleler, hem verici hem de alıcı görevi üstlenirler. Bir işbirlikli iletişim sisteminde röle, verici ve alıcı görevlerini ayrık zaman periyotlarında yürütebileceği gibi aynı zaman periyodu içerisinde aynı anda hem verici hem de alıcı olarak da çalışabilirler. Buna göre ayrık zaman periyotlarında ya verici ya da alıcı olarak çalışan röleler yarı-çift yönlü aktarım rölesi (HDR, half-duplex relaying), aynı zaman periyodunda hem verici hem

de alıcı olarak çalışan röleler ise tam-çift yönlü aktarım röleleri (FDR, full-duplex relaying) olarak adlandırılır.

Bu ve bundan sonraki bölümlerde işbirlikli iletişim sistemlerinde rölenin çöz-ve-aktar yöntemini kullandığı ve düğümler arasındaki kanalların Rayleigh dağılımlı olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca bu ve bundan sonraki bölümlerde tezin kapsamı göz önüne alınarak işbirlikli sistemlerin iki atlamalı, uç birimlerden birinin verici ve diğerinin alıcı olduğu tek-yollu iletişim (one-way communication) kurdukları kabul edilecektir.

3.2.1 Yarı-çift yönlü aktarım

Yarı-çift yönlü röleler, yani HD (half-duplex) röleler ayrık zaman periyotlarında ya verici ya da alıcı olarak davranırlar. Bu şekilde çalışmalarını nedeniyle işbirliği yaptıkları sistemin hata başarımlarını iyileştirse de sistemin uçları arasındaki ortalama veri aktarım hızını düşürürler. Bu bakımdan HD röle kullanılan sistemlerde yüksek veri iletim hızlarına ulaşmak maliyetliyen yüksek bilgi güvenilirliğine ulaşmak da nispeten daha kolaydır.

HD röleler ayrık zaman periyotlarında verici ya da alıcı gibi çalışlar. Buna göre, HD röleli işbirlikli bir sistemde belli bir zaman periyodunda rölenin vericiden gelen işareti aldığı kabul edildiğinde ilgili zaman periyodunda röle, alıcı uç düğüm gibi davranmaktadır. Burada röle sistemin ara düğümü gibi değil, son birimi yani alıcı gibi kabul edilir. İlgili zaman aralığında sistemin alıcı düğümü ise sistemin kullandığı protokole göre vericiden gelen işareti alabilir ya da görmezden gelebilir. Bir sonraki periyodunda ise sistemin verici düğümü pasif, yani suskun durumdadır. Verici bu zaman periyodunda yeni bir işaret iletmez. Röle ise bu zaman aralığında verici görevi görecektir. Buna göre bir önceki zaman periyodunda vericiden aldığı işareti bir sonraki zaman aralığında alıcıya iletir. Yarı-çift yönlü rölenin kullanıldığı, tek-yönlü (one-way, one-directional) iletişim yapan işbirlikli sistem modeli Şekil 3.4'te görülebilir.

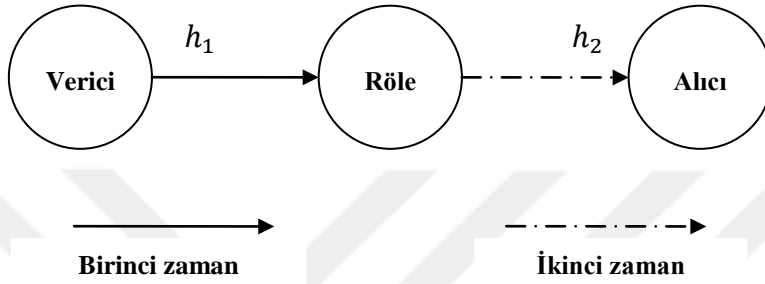
Verici ve röle arasındaki Rayleigh sönümlenmeli kanal $h_1 \sim CN(0, \sigma_1^2)$, vericinin iletmediği işaret $x_S(t)$, röledeki sıfır ortalamalı Gauss dağılımlı toplamsal gürültü $n_1 \sim CN(0, N_1)$ olmak üzere ilk zaman periyodunda rölenin aldığı işaret,

$$y_R(t) = h_1 x_S(t) + n_1 \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilir. Benzer şekilde, röle ve alıcı arasındaki Rayleigh sönümlenmeli kanal $h_2 \sim CN(0, \sigma_2^2)$, rölenin vericiden alıp ilettiği işaret $\hat{x}_S(t)$, alıcıdaki sıfır ortalamalı Gauss dağılımlı toplamsal gürültü $n_2 \sim CN(0, N_2)$ olmak üzere ikinci zaman periyodunda alıcının röleden aldığı işaret,

$$y_D(t) = h_2 \hat{x}_S(t) + n_2 \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 3.4: Yarı-çift yönlü röleli işbirlikli sistem modeli.

Verici iletim gücü P_1 , rölede beklenen ortalama işaret-gürültü oranı $\bar{\gamma}_{SR}$ olmak üzere h_1 kanalında ulaşılabilecek beklenen en büyük veri iletim hızı, yani kanal sığası,

$$\bar{R}_{HD_{SR}} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \bar{\gamma}_{SR}) = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_1^2 P_1}{N_1} \right) \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir. Verici ve röle arasındaki kanalda anlık veri iletim hızı $R_{HD_{SR}}$ 'nin kanal sığası $\bar{R}_{HD_{SR}}$ 'den büyük olması durumunda ise verici ve röle arasında servis kesilme olayı meydana gelecektir. İkinci zaman periyodunda ise, röle iletim gücü P_2 , alıcıda beklenen ortalama işaret-gürültü oranı $\bar{\gamma}_{RD}$ olmak üzere h_2 kanalında ulaşılabilecek en büyük veri iletim hızı, yani kanal sığası,

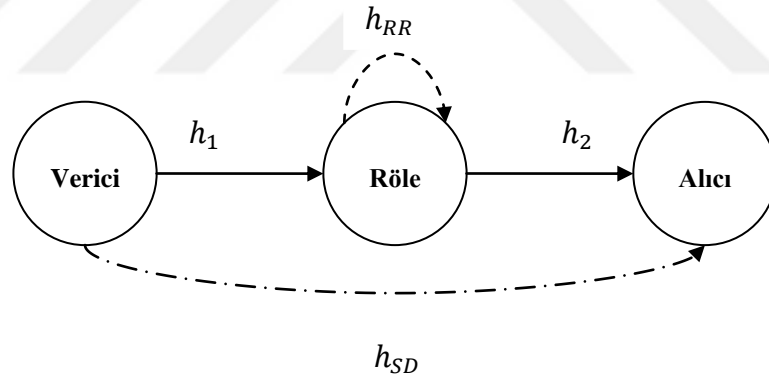
$$\bar{R}_{HD_{RD}} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \bar{\gamma}_{RD}) = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_2^2 P_2}{N_2} \right) \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir [25, 26]. Röle ve alıcı arasındaki kanalda anlık veri iletim hızı $R_{HD_{RD}}$ 'nin kanal sığası $\bar{R}_{HD_{RD}}$ 'den büyük olması durumunda ise verici ve röle arasında servis kesilme olayı meydana gelir. Yarı-çift yönlü röleler toplam iletim süresinin yarısında verici, diğer yarısında ise alıcı durumunda olduğundan denklem

3.7 ve denklem 3.8’de görüleceği gibi kanal sıçması ifadelerinin önüne $1/2$ çarpanı gelmektedir.

3.2.2 Tam-çift yönlü aktarım

Tam-çift yönlü röleler, yani FD (full-duplex) röleler tek zaman periyodu içerisinde aynı anda hem verici hem de alıcı olarak çalışırlar. FD rölelerin bu şekilde çalışması nedeniyle iletişim sisteminin hem vericisi hem de alıcısı her zaman periyodunda aktif haldedir. Bunun sonucunda tam-çift yönlü röleli işbirlikli sistemlerin uçtan uca veri iletim hızları, işbirliğine gereksinim duymadan doğrudan vericiden alıcıya veri iletiminin mümkün olduğu sistemlerin veri iletim hızlarına denktir. FD röleli sistemler veri iletim hızı konusunda HD rölelere göre daha avantajlı olmalarına karşın HD röleli sistemlerde karşılaşılmayan, rölede öz-girişim (SI, self-interference) etkisi nedeniyle HD rölelere kıyasla dezavantajlı durumdadırlar. Ayrıca iki atlamalı sistemlerde eğer verici ve alıcı yeterince yakınsa alıcıda simgelerarası girişim (ISI, intersymbol interference) etkisine de maruz kalınacaktır. Şekil 3.5’te tam-çift yönlü röleli işbirlikli sistem modeli verilmiştir.



Şekil 3.5: Tam-çift yönlü röleli işbirlikli sistem modeli.

Tam-çift yönlü röleli işbirlikli sistemlerde verici röleye yeni bir işaret iletirken röle aynı zamanda bir önceki zaman periyodunda aldığı işareti alıcıya iletir. Buna göre $x_n(t)$ vericinin röleye, $x_{n-1}(t)$ rölenin alıcıya ilettiği işaret, verici ve röle arasındaki kanal sönlüme katsayısı $h_1 \sim CN(0, \sigma_1^2)$, röleden röleye öz-girişime neden olan kanal sönlüme katsayısı $h_{RR} \sim CN(0, \sigma_{RR}^2)$, röledeki toplamsal gürültü örneği $n_1 \sim CN(0, N_1)$ olmak üzere rölenin aldığı işaret,

$$y_R(t) = h_1 x_n(t) + h_{RR} x_{n-1}(t) + n_1 \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilir. Benzer şekilde, röle ve alıcı arasındaki kanal sönmleme katsayısı $h_2 \sim CN(0, \sigma_2^2)$, verici ve alıcı arasında simgelerarası girişime neden olan kanal sönmleme katsayısı $h_{SD} \sim CN(0, \sigma_{SD}^2)$, alıcıdaki toplamsal gürültü örneği $n_2 \sim CN(0, N_2)$ olmak üzere alıcının aldığı işaret,

$$y_D(t) = h_2 x_{n-1}(t) + h_{SD} x_n(t) + n_2 \quad (3.10)$$

şeklinde ifade edilir. Verici iletim gücü P_1 , röle iletim gücü P_2 , rölede ortalama işaret-girişim-ve-gürültü oranı (SINR) $\bar{\gamma}_{SR}$ olmak üzere verici ve alıcı arasındaki kanalda ulaşılabilecek beklenen en büyük veri iletim hızı, yani kanalın ergodik sığıası,

$$\bar{R}_{FDSR} = \log_2(1 + \bar{\gamma}_{SR}) = \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_1^2 P_1}{\sigma_{RR}^2 P_2 + N_1} \right) \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilir. Verici ve röle arasındaki kanalda anlık veri iletim hızı R_{FDSR} 'nin kanal sığıası \bar{R}_{FDSR} 'den büyük olması durumunda ise verici ve röle arasında servis kesilme olayı meydana gelecektir. Alıcıda ortalama işaret-gürültü oranı $\bar{\gamma}_{RD}$ olmak üzere verici ve alıcı arasındaki kanalda ergodik veri iletim hızı, yani kanal sığıası,

$$\bar{R}_{FDRD} = \log_2(1 + \bar{\gamma}_{RD}) = \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_2^2 P_2}{\sigma_{SD}^2 P_1 + N_2} \right) \quad (3.12)$$

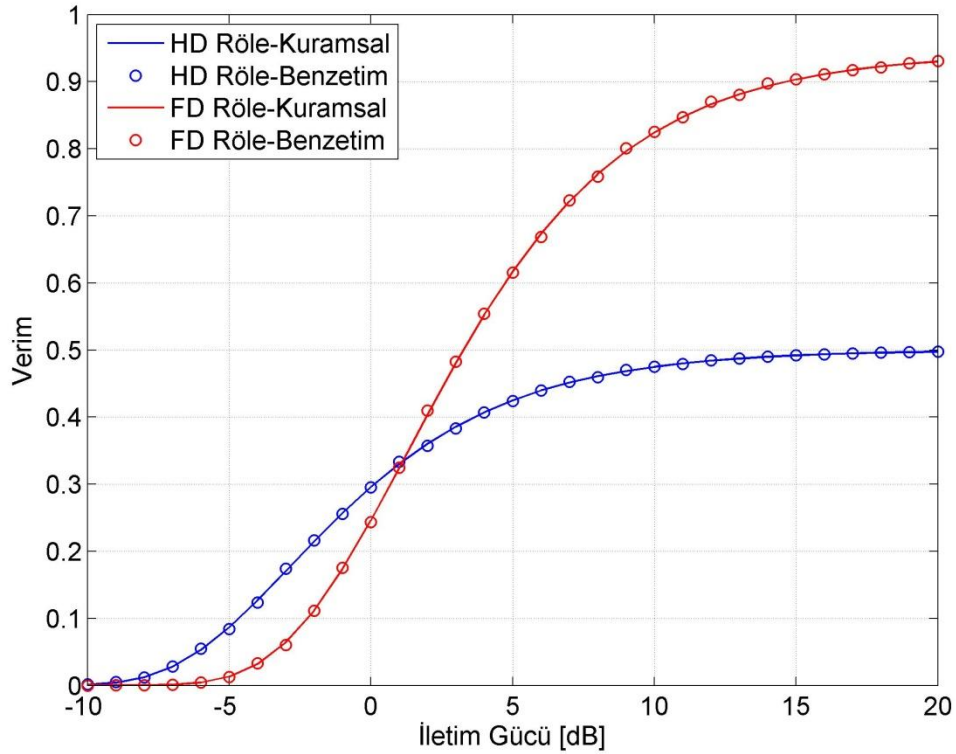
şeklinde ifade edilir [25, 26]. Röle ve alıcı arasındaki kanalda anlık veri iletim hızı R_{HDRD} 'nin kanal sığıası \bar{R}_{HDRD} 'den büyük olması durumunda ise verici ve röle arasında servis kesilme olayı meydana gelir.

FD röleli sistemlerin başarımları öz-girişim ve simgelerarası girişim nedeniyle oldukça kısıtlansa da bu bozucu etkileri oldukça başarılı bir şekilde bastırmak mümkündür [27, 28].

3.2.3 Kuramsal ve benzetim sonuçlarının karşılaştırması

Bu bölümde tek-yönlü HD röleli işbirlikli sistem ile tek-yönlü FD röleli işbirlikli sistemin, sistemler sabit veri hızıyla çalışırken değişen SNR'a karşın sistem verimleri

kuramsal olarak ve benzetim yoluyla karşılaştırılmıştır. Şekil 3.6’da karşılaştırma eğrileri görülebilir.



Şekil 3.6: Tek yönlü HD ve FD röleli sistemlerin verimlerinin karşılaştırılması.

Eğriler çizdirilirken her iki sistem için de verici-röle ve röle-alıcı arası mesafeler birbirine eşit olacak şekilde $d = 0.5$ olarak alınmıştır. Her iki sistemde de verici ve röle veri iletim hızları birbirine eşit ve $R = 2$ bit/sn/Hz olarak kabul edilmiştir. Yol kaybı katsayısı $\alpha = 3.14$ alınmıştır. Ayrıca sistemlerin eşit güç tüketimi yapmaları amacıyla HD röleli sistemin verici ve röle iletim güçleri SNR eksenindeki değerlerde çalışırken FD röleli sistemde aynı anda hem verici hem de röle etkin olduğu için iletim gücü verici ve röle arasında eşit paylaştırılmıştır. Ayrıca, FD röleli sistemde öz-girişim etkisinin sönümlenmeli kanal üzerinden vericiden röleye gelen işarete kıyasla 20 dB ve alıcıdaki simgelerarası girişim etkisinin sönümlenmeli kanal üzerinden alıcıya gelen işarete kıyasla 20 dB daha zayıf olduğu kabul edilmiştir.

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi düşük iletim gücü değerlerinde HD röleli sistem FD röleli sisteme kıyasla daha yüksek verime ulaşabilmektedir. Özellikle düşük güçlerde öz-girişim ve simgelerarası girişim etkileri FD röleli sistem başarımının oldukça olumsuz yönde etkilemektedir. Ancak iletim gücü arttıkça FD röleli sistemlerin HD

röleli sistemlere üstün geldiği görülmektedir. Çok yüksek iletim gücü bölgesinde ise görüleceği gibi HD röleli sistemin alabileceği en yüksek verim değeri 0.5'e oldukça yaklaşabilirken FD röleli sistemin veriminin de alabileceği en büyük değerin 1'e yaklaştığı görülmektedir.



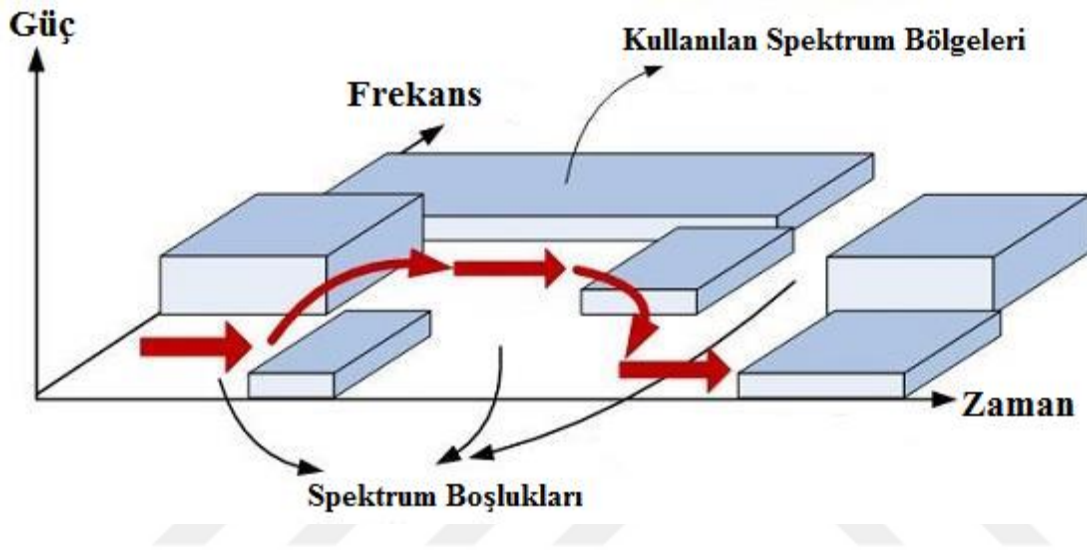
4. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI

Zamanla telsiz iletişim sistemlerinin başarımlarının tel ile bağlı iletişim sistemlerinin başarımlarına yaklaşmasıyla, telsiz iletişim uygulamalarının yaygınlıklarını artırmıştır. Böylece telsiz iletişim uygulamalarını kullanan kullanıcı sayısında oldukça büyük artışlar meydana gelmiştir. Ancak bilindiği gibi telsiz iletişim sistemi kullanıcılarının radyo spektrumunu kullanımları belli şekillerde sınırlandırılmıştır. Buna göre radyo spektrumu belli telsiz iletişim tekniklerinde kullanılmak üzere çeşitli bölgelere, bu bölgeler de mevcut kullanıcıların taleplerine göre ayrılmıştır. Ancak bazı telsiz iletişim uygulamalarında, belli bir radyo spektrum aralığının kullanım hakkını elinde tutan lisanslı birincil kullanıcılar spektrumun tamamını verimli bir şekilde kullanmamaktadır, yani söz konusu ayrılmış radyo spektrum aralığında uzayda, frekansta ya da zamanda spektrum boşlukları bulunmaktadır [29, 30]. Ayrıca kullanıcı sayısının hızlıca artması, spektrum bölgelerinin kullanım hakkını elinde tutan birincil kullanıcıların (PUs, primary users) verimliliklerindeki artışın kullanıcı sayısının artış hızından daha yavaş gelişmesi gibi nedenlerle radyo spektrumunun daha etkin bir şekilde kullanılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu nedenle literatürde, yalnızca lisanslı birincil kullanıcıların erişim izni olan radyo spektrum bölgelerini ikincil kullanıcılarla (SUs, secondary users) paylaşımını düzenleyen teknikler önerilmiştir. Bu teknikler araya serme (interweave), üstüne serme (overlay) ve altına serme (underlay) olmak üzere üç başlığa ayrılır.

Bilişsel radyo ağları birincil kullanıcılara spektrum maliyetlerini azaltma fırsatının yanında, ikincil kullanıcılarla birincil kullanıcının yararına olacak şekilde işbirliği yapılmasına da fırsat vermektedir. Ancak ikincil kullanıcıların spektrumdaki diğer kullanıcıların, radyo spektrumundaki boşlukların, diğer ikincil kullanıcıların farkında olmalarına ve bu bilgilerden faydalanarak iletişim kurmalarına izin verilir. Buna karşın birincil kullanıcıların bu tip bilgilere sahip olması gerekmez. Bu nedenle ikincil kullanıcıların maliyetleri birincil kullanıcılara kıyasla daha fazladır.

4.1 Araya Serme Yöntemi

Araya serme yöntemi radyo spektrumundaki boşlukları kullanma düşüncesiyle geliştirilmiştir. Literatürdeki araştırmalara göre lisanslı birincil kullanıcılar genellikle frekansta, zamanda ya da uzayda radyo spektrumunun tamamını kullanmamaktadır. Araya serme yönteminde ikincil kullanıcı ya da kullanıcılar, lisanslı kullanıcının kullanmadığı radyo spektrum boşluklarını fırsatçı bir şekilde kullanarak iletişim kurar. Şekil 4.1’de olası radyo spektrum boşlukları gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Olası radyo spektrum boşlukları.

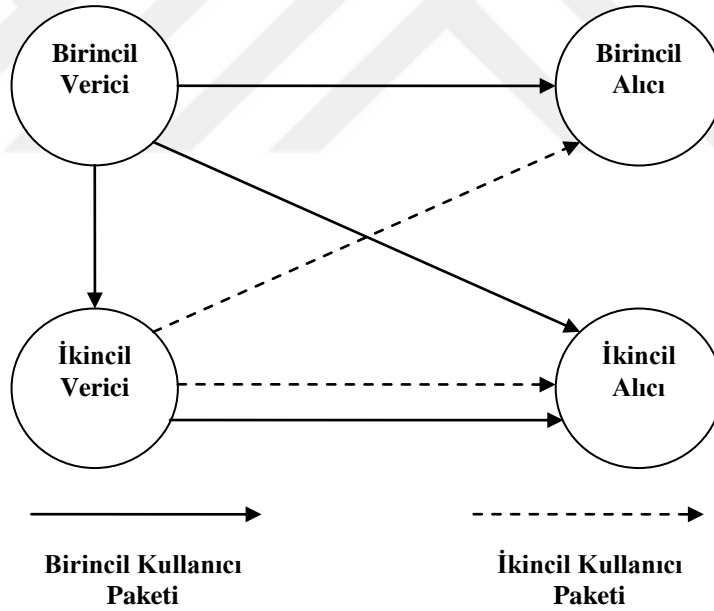
Araya serme yönteminde ikincil kullanıcının sürekli radyo spektrumunu dinleyerek iletim ortamındaki, yani ağdaki (network) birincil kullanıcının varlığını, varsa diğer ikincil kullanıcı veya kullanıcıları ve radyo spektrumundaki boşlukları sezmesi gerekmektedir. Ağdaki kullanıcıların yerlerinin, radyo spektrumunun kullanımının zamanla değişmesi gibi nedenlerle ikincil kullanıcının bütün bu bilgiyi sezmesi ise oldukça zorlu bir iştir. İkincil kullanıcı sezdiği bütün bu bilgileri kullanarak fırsatçı bir şekilde iletişim kurar.

Ağda bir birincil kullanıcı ve bir veya daha çok ikincil kullanıcı varken yeni bir ikincil kullanıcı ağa dahil olduğunda, var olan kullanıcıların herhangi bir değişiklik yapması beklenilmez. Ancak en son katılan ikincil sistem bütün diğer kullanıcıları ve radyo spektrumundaki boşlukları sezerek iletişim kurmak durumundadır. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, araya serme yönteminin kullanıldığı ağlarda, ağda bulunan kullanıcıların hiyerarşik olarak birbirlerine bir üstünlüğü bulunmamaktadır.

Özetlemek gerekirse, araya serme yönteminde ikincil kullanıcının, birincil kullanıcıda herhangi bir şekilde girişime neden olmaması gerekir. Bu nedenle, zamanla radyo spektrum boşluklarında bir değişiklik olduğunda ikincil sistemin bu değişikliği sezmesi ve bu değişikliğe uygun olarak iletişime devam etmesi veya iletişimi kesmesi gerekir. Bu amaçla ikincil sistemin radyo spektrumunu periyodik olarak kontrol etmesi, birincil sistemde herhangi bir girişime neden olmayacak şekilde iletişime devam etmesi gerekir. Bu durumda ikincil kullanıcının vericisinin ve alıcısının oldukça esnek olması gerekmektedir [30].

4.2 Üstüne Serme Yöntemi

Üstüne serme yönteminde ikincil kullanıcının birincil kullanıcıyla işbirliği yaparak birincil sistemin başarımını artırması, eğer artıramıyorsa da düşmeye neden olmadan işbirliğine devam ederek birincil kullanıcıya çeşitleme kazancı sağlaması beklenir. Üstüne sermeli bir bilişsel radyo ağ modeli Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2: Üstüne serme yöntemi.

Üstüne serme yönteminde ikincil kullanıcının birincil kullanıcının durumunu, ağın kanal durum bilgilerini, varsa diğer ikincil kullanıcıların varlığını, radyo spektrumundaki boşlukları sezmesinin yanında birincil kullanıcının kullandığı kod çizelgesi bilgisine de sahip olması gerekir. İkincil kullanıcı birincil kullanıcının kod çizelgesine farklı şekillerde ulaşabilir. Birincil kullanıcı standart aleni bir kod

çizelgesi kullanabileceği gibi ağdan belli aralıklarla kod çizelgesi bilgisini yayınlabilir. Bunun yanında ikincil kullanıcının ağdaki bütün kullanıcıların arasındaki kanalların kanal durum bilgisine (CSI, channel state information) de sahip olması gerekir.

Bu yöntemde ikincil kullanıcının vericisi birincil kullanıcının rölesi gibi davranarak birincil kullanıcıyla işbirliği yapar. İkincil kullanıcı, birincil kullanıcının işaretini kod çizelgesini kullanarak çözer ve tekrar kodlayarak iletir. Böylece birincil kullanıcının alıcısındaki işaret-girişim-ve-gürültü oranı artırılmaya çalışılır. Böylece birincil kullanıcının veri hızı artırılabilir. Bu arada, ikincil kullanıcının vericisi gücünün bir kısmını da kendi alıcısına kendi işaretini iletmek için kullanacaktır. Ancak burada ikincil kullanıcının vericisinin güç paylaşımının dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir. İkincil kullanıcı vericisi iletim gücünü bölerken birincil kullanıcının işaret-girişim-ve-gürültü oranının en azından aynı kaldığına ya da büyüdüğünden emin olunmalıdır.

İkincil kullanıcı birincil kullanıcının iletimine yardım ederken birincil kullanıcının iletişimi ise ikincil kullanıcının alıcısında girişime neden olmaktadır. Bu da ikincil kullanıcının alıcısında işaret-girişim-ve-gürültü oranını düşürmektedir. Ancak ikincil kullanıcının birincil kullanıcının kod çizelgesine sahip olmasıyla ikincil kullanıcının alıcısındaki girişim etkin bir şekilde giderilebilir. Benzer şekilde ikincil kullanıcının iletişimi de birincil kullanıcının alıcısında girişime neden olmaktadır. Ancak daha önce de belirtildiği gibi ikincil kullanıcı, birincil kullanıcının alıcısında SINR'ı en kötü durumda aynı tutmak ön koşuluyla iletişime dahil olduğu için bu girişimin birincil kullanıcının başarımında olumsuz bir etkisi yoktur. Ancak birincil kullanıcı geliştirilerek ikincil kullanıcının kod çizelgesini sezebilir hale getirilmesiyle ikincil kullanıcının birincil kullanıcı alıcısında yaptığı girişimi etkin bir şekilde gidermek mümkündür.

Birincil kullanıcının kod çizelgesinin başka kullanıcılarla paylaşılmasının, birincil kullanıcının iletişimde risk oluşturduğu ise göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle üstüne serme yöntemi genelde radyo, televizyon gibi kod sözcükleri yaygın bilinen iletişim sistemlerinde uygulanmaktadır. Bunun yanında ikincil kullanıcıların sürekli birincil kullanıcıları dinlemesinin ve birincil kullanıcının işaretini çözüp tekrar kodlamasının gerekliliği nedeniyle ikincil kullanıcıların sistem yapıları diğer bilişsel radyo yöntemlerinin gerektirdiğinden daha karmaşık ve daha maliyetlidir [30].

4.3 Altına Serme Yöntemi

Birincil ve ikincil kullanıcıların aynı radyo spektrumunu paylaşarak iletişimde bulunmaları, birbirlerinin alıcıları üzerinde girişime neden olmaktadır. Altına serme yöntemi, birincil kullanıcının alıcısında neden olunabilecek en fazla girişim için bir üst sınır belirleyip ikincil kullanıcıya izin verilmesi esasına dayanır.

Altına serme yönteminde ikincil kullanıcı vericisi ile birincil kullanıcının alıcısı arasındaki kanal sönümlenme katsayısı $h_p \sim CN(0, \sigma_p^2)$, birincil kullanıcının alıcısında neden olduğu girişimi ölçebiliyor olması gerekmektedir. Birincil kullanıcının alıcısında izin verdiği girişim sınırı nedeniyle birincil kullanıcının başarımı düşecektir. Bu yüzden birincil kullanıcı bu sınırı belirlerken kendi başarımını fazla etkilemeyecek şekilde belirlemelidir.

Birincil kullanıcının alıcısında izin verdiği girişim üst sınırı γ_{th} , birincil kullanıcı ile birincil kullanıcının alıcısı arasındaki kanal sönümlenme katsayısı $h_p \sim CN(0, \sigma_p^2)$, birincil kullanıcının alıcısındaki gürültü $n_1 \sim CN(0, N_1)$ olmak üzere birincil kullanıcının vericisi ve alıcısı arasında ulaşılabilecek ergodik kanal sığası,

$$\bar{R}_{PU} = \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_p^2 P_{PU}}{\gamma_{th} + N_1} \right) \quad (4.1)$$

olacaktır. İkincil kullanıcı vericisi ile birincil kullanıcının alıcısı arasındaki kanal sönümlenme katsayısı $h_{SP} \sim CN(0, \sigma_{SP}^2)$ olmak üzere ikincil kullanıcının iletim gücü üst sınırı,

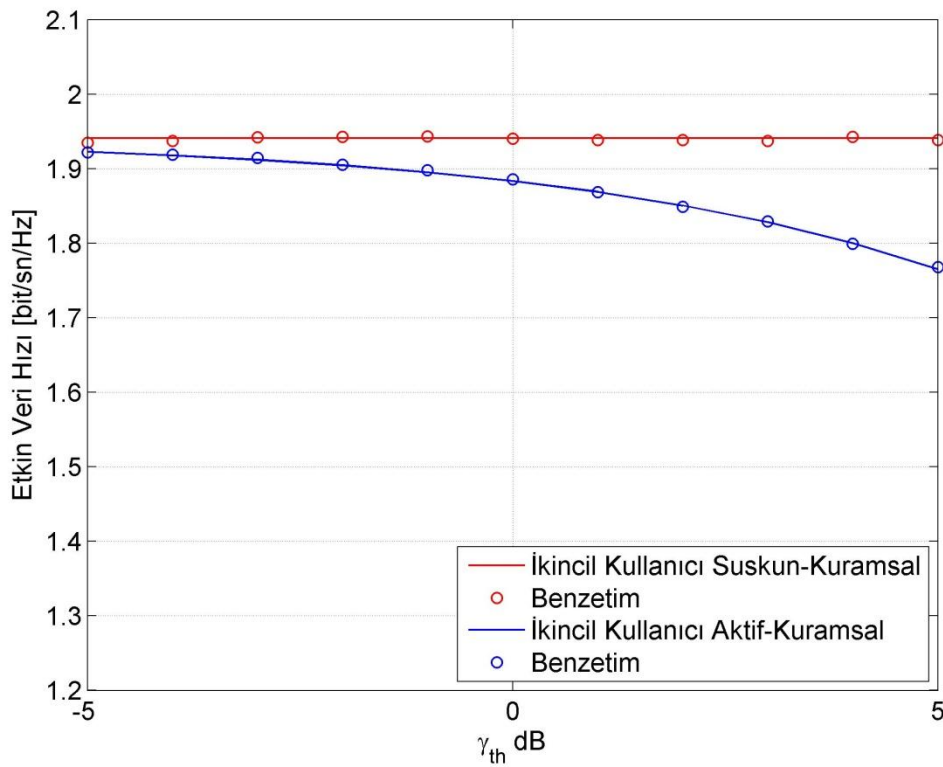
$$\hat{P}_{SU} = \frac{\gamma_{th}}{\sigma_{SP}^2} \quad (4.2)$$

şeklinde hesaplanır. Buna göre, ikincil kullanıcının vericisi ile ikincil kullanıcının alıcısı arasındaki kanal sönümlenme katsayısı $h_s \sim CN(0, \sigma_s^2)$, ikincil kullanıcının alıcısındaki gürültü $n_2 \sim CN(0, N_2)$, birincil kullanıcının ikincil kullanıcının alıcısında neden olduğu girişim γ_{PS} , olmak üzere ikincil kullanıcının vericisi ve alıcısı arasında ulaşılabilecek ergodik kanal sığası,

$$\bar{R}_{SU} = \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_S^2 \hat{P}_{SU}}{\gamma_{PS} + N_2} \right) \quad (4.3)$$

olacaktır [30, 31].

Şekil 4.3'te birincil kullanıcının etkin veri hızı değişiminin değişen girişim sınırına göre değişimi verilmiştir. Birincil kullanıcı verici iletim gücü $P_{PU} = 20$ dB, veri iletim hızı 2 bit/sn/Hz, birincil kullanıcının verici ve alıcısı arasındaki uzaklık $d = 1$, yol kaybı katsayısı $\alpha = 3.14$ alınmıştır.



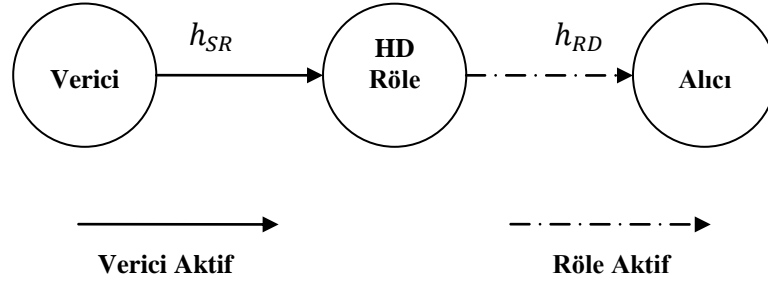
Şekil 4.3: Birincil kullanıcının veri iletim hızının değişen girişim sınırına göre değişimi.

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi birincil kullanıcının alıcısında izin verilen girişim sınırı arttıkça, birincil kullanıcının başarımı düşmektedir. Bu nedenle birincil kullanıcının, kabul edebileceği en büyük hata başarımı kaybına göre girişim sınırı belirlemesi gereklidir.

5. OTOMATİK YİNELEME İSTEMELİ YENİ AKTARIM PROTOKOLLERİ

Bu bölümde bir çeşit karma aktarım (XDR) yöntemi kullanan [Li], otomatik yinelemeli işbirlikli yeni iletişim protokolleri önerilecektir. Buna göre, tek-yönlü iki atlamalı iletişim sisteminde verici-röle ya da röle-alıcı arasında servis kesilme olayı yaşanmadığı sürece yeni önerilen karma (XD) röle, FD röle olarak, servis kesilme olayı yaşandığında ise eğer işaretin yeniden iletim hakkı varsa duruma göre HD röle ya verici ya da alıcı olarak çalışacaktır. Yeni önerilen aktarım yöntemine referans olması için her önerilen protokole karşılık öncelikle yalnızca HD röle kullanılan protokollere de bölüm içerisinde yer verilmiştir. Otomatik yineleme isteme (ARQ) protokollere uygulanırken işaretin yeniden iletim hakkı işareti ileten düğümde bir kez ile sınırlandırılmıştır.

Şekil 5.1’de HD röleli protokollerin, Şekil 5.2’de XD röleli protokollerin sistem modellerine yer verilmiştir.



Şekil 5.1: HD röleli protokollerin sistem modeli.

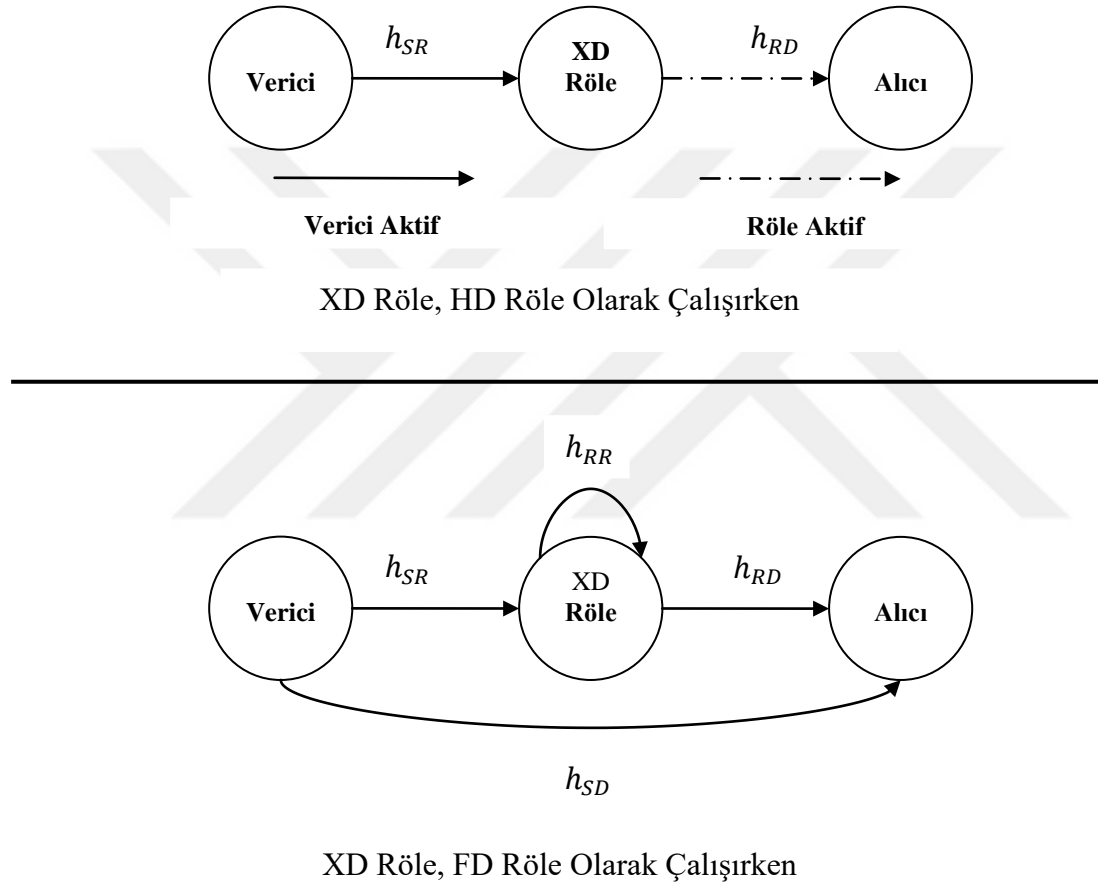
Şekil 5.1’de verilen sistem modeli için önerilen HD röleli protokollerde sistem bellek durumuna göre verici ya da HD röleden biri aktif olarak iletim yapmaktadır. Buna göre vericinin iletim yaptığı bellek durumlarında HD röle alıcı durumda, HD röle iletim yaparken verici ise beklemededir. Bu bölüm alt başlıklarında önerilecek HD röleli protokoller için verici iletim gücü P_1 , HD röle iletim gücü P_2 , HD röledeki gürültü $n_1 \sim CN(0, N_1)$, alıcıdaki gürültü $n_2 \sim CN(0, N_2)$, sistemdeki her bir düğümün veri iletim hızı R olmak üzere verici-HD röle arasındaki $h_{SR} \sim CN(0, \sigma_{SR}^2)$ kanalının

ve HD röle-alıcı arasındaki $h_{RD} \sim CN(0, \sigma_{RD}^2)$ kanalının servis kesilme olasılıkları sırasıyla denklem 2.24'ten yararlanarak,

$$\hat{p}_{SR} = 1 - e^{-\frac{(2^R-1)N_1}{\sigma_{SR}^2 P_1}}, \quad (5.1)$$

$$\hat{p}_{RD} = 1 - e^{-\frac{(2^R-1)N_2}{\sigma_{RD}^2 P_2}} \quad (5.2)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 5.2: XD röleli protokollerin sistem modeli.

Şekil 5.2’de XD röleli protokollerin çalışması iki kısımda ifade edilmiştir. Önerilen XD röleli protokollerde sistemin bellek durumuna göre XD röle ya HD röle olarak ya da FD röle olarak çalışmaktadır. XD röle, HD röle olarak çalışırken sistem bellek durumuna göre ya verici ya da XD röleden biri iletim yapmaktadır. XD röle, FD röle olarak çalışırken hem verici hem de XD röle aynı anda iletim yapmaktadır. Bu bölüm alt başlıklarında önerilecek XD röleli protokoller için XD röle, HD röle olarak

çalışırken denklem 5.1 ve denklem 5.2 elde edilirken kullanılan gösterim kullanılmak üzere verici-XD röle arasındaki kanalın ve röle-alıcı arasındaki kanalın servis kesilme olasılıkları sırasıyla denklem 5.1 ve denklem 5.2'deki gibi ifade edilir.

XD röle, FD röle olarak çalışırken XD rölede öz-girişime neden olan kanal $h_{RR} \sim CN(0, \sigma_{RR}^2)$, alıcıda girişime neden olan vericiden alıcıya olan kanal $h_{SD} \sim CN(0, \sigma_{SD}^2)$ olmak üzere sırasıyla verici-XD röle ve XD röle-alıcı arasında servis kesilme olasılıkları denklem 2.30'dan yararlanılarak,

$$p_{SR} = 1 - e^{-\frac{(2^R-1)(\sigma_{RR}^2 P_2 + N_1)}{\sigma_{SR}^2 P_1}}, \quad (5.3)$$

$$p_{RD} = 1 - e^{-\frac{(2^R-1)(\sigma_{SD}^2 P_1 + N_2)}{\sigma_{RD}^2 P_2}} \quad (5.4)$$

şeklinde elde edilir [14, 31].

Sırasıyla otomatik yineleme isteme kullanılmayan, yalnızca vericiye bir yeniden iletim hakkı veren, yalnızca röleye bir yeniden iletim hakkı veren ve son olarak hem verici hem de röleye birer yeniden iletim hakkı veren protokoller tasarlanmış, verimleri, etkin veri hızları ve sistemde işaretlerin ne kadarının alıcıya iletilmiş olduğunu değerlendirmesini yapmak amacıyla paket verimlilikleri karşılaştırılmıştır.

5.1 Protokol 1

Bu bölümde sırasıyla otomatik yineleme isteme kullanılmayan HD röleli ve XD röleli işbirlikli iletişim sistemlerinin protokol tasarımları yapılmıştır. Daha sonra ise her iki protokolün aynı koşullar altında karşılaştırmalarına yer verilmiştir.

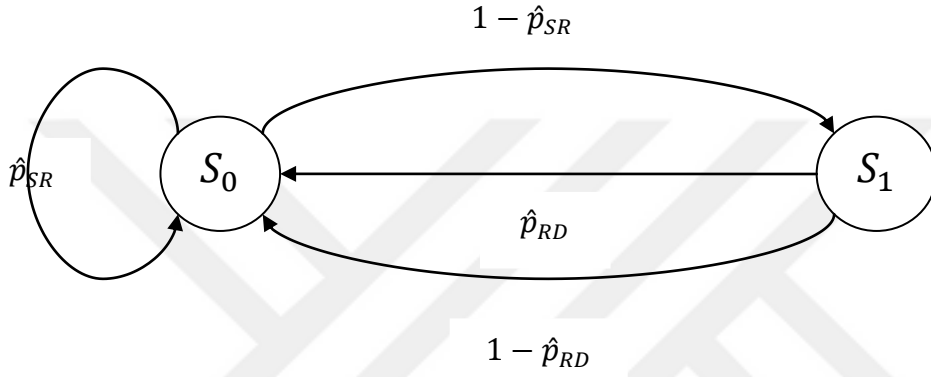
5.1.1 Protokol 1-HD

Bu HD röleli protokolde ne vericide ne de HD rölede otomatik yineleme isteme kullanılmıştır. Şekil 5.3'te Markov zinciri gösterilen iletişim sistemi için aşağıdaki kurallar geçerlidir.

S_0 : Başlangıç durumudur. Sıradaki zaman aralığında verici yeni bir paketi HD röleye iletacaktır. İletim sonrası olası durumlar; verici-HD röle arasındaki kanalda \hat{p}_{SR} olasılıkla servis kesilme olayı olması durumunda paketin HD röleye iletilmemesi ve verici-HD röle arasındaki kanalda $1 - \hat{p}_{SR}$ olasılıkla

servis kesilme olayı olmaması durumunda paketin HD röleye iletilmesi olarak verilebilir.

S_1 : Vericinin paketi HD röle tarafından başarılı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında HD röle vericiden aldığı paketi alıcıya iletacaktır. İletim sonrası olası durumlar; HD röle-alıcı arasındaki kanalda \hat{p}_{RD} olasılıkla servis kesilme olayı olması durumunda paketin alıcıya iletilmemesi ve HD röle-alıcı arasındaki kanalda $1 - \hat{p}_{RD}$ olasılıkla servis kesilme olayı olmaması durumunda paketin alıcıya iletilmesi olarak verilebilir.



Şekil 5.3: Protokol 1-HD için Markov zinciri.

Şekil 5.3'te görüldüğü gibi, sistem S_0 bellek durumundayken verici aktif, HD röle ise pasif olarak alıcı durumundadır. Bu durum vericinin bir paketi HD röleye iletilinceye kadar devam edecektir. Bir paketin vericiden HD röleye iletilmesi durumunda sistem belleği S_1 durumuna geçecek, verici susacak ve HD röle bir önceki zaman aralığında vericiden aldığı paketi alıcıya iletmeye çalışacaktır. İzleyen zaman aralığında sistem S_1 bellek durumundan S_0 bellek durumuna dönecektir.

Şekil 5.3'te verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin S_0 ve S_1 durumlarında olma olasılıkları,

$$p(S_0) = \hat{p}_{SR}p(S_0) + p(S_1), \quad (5.5)$$

$$p(S_1) = (1 - \hat{p}_{SR})p(S_0) \quad (5.6)$$

şeklinde ifade edilir. Sistemin S_0 ve S_1 bellek durumlarında olma olasılıkları toplamı,

$$p(S_0) + p(S_1) = 1 \quad (5.7)$$

şeklindedir. Denklem 5.5, denklem 5.6 ve denklem 5.7 birlikte çözülerek sistemin her bir bellek durumunda kalma olasılığı,

$$p(S_0) = \frac{1}{2 - \hat{p}_{SR}}, \quad (5.8)$$

$$p(S_1) = \frac{1 - \hat{p}_{SR}}{2 - \hat{p}_{SR}} \quad (5.9)$$

olur. Bu durumda, denklem 2.31 ve denklem 2.32'den yararlanarak etkin veri hızı ve verim,

$$\eta_{eff_{1-HD}} = R[(1 - \hat{p}_{RD})p(S_1)] = R \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD} + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}}{2 - \hat{p}_{SR}}, \quad (5.10)$$

$$\eta_{1-HD} = \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD} + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}}{2 - \hat{p}_{SR}} \quad (5.11)$$

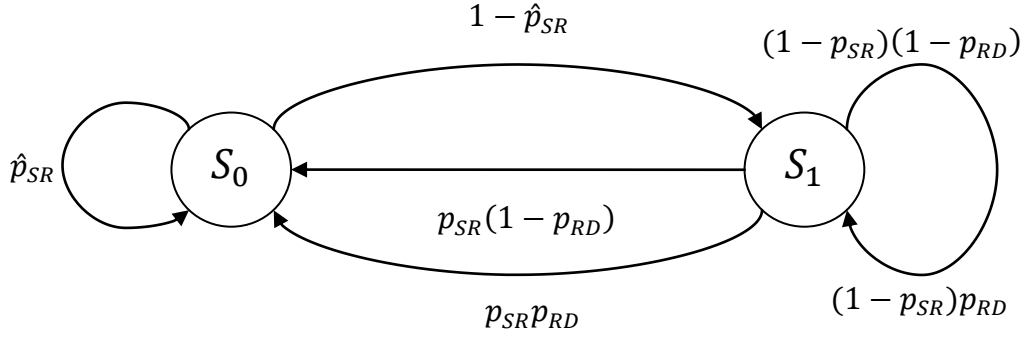
şeklinde ifade edilir [14, 31].

5.1.2 Protokol 1-XD

Bu XD röleli protokolde ne vericide ne de XD rölede otomatik yineleme isteme kullanılmıştır. Şekil 5.4'te Markov zinciri gösterilen iletişim sistemi için aşağıdaki kurallar geçerlidir.

S_0 : Başlangıç durumudur. Sıradaki zaman aralığında verici yeni bir paketi XD röleye iletacaktır. İletim sonrası olası durumlar; verici-XD röle arasındaki kanalda \hat{p}_{SR} olasılıkla servis kesilme olayı olması durumunda paketin XD röleye iletilmemesi ve verici-XD röle arasındaki kanalda $1 - \hat{p}_{SR}$ olasılıkla servis kesilme olayı olmaması durumunda paketin XD röleye iletilmesi olarak verilebilir.

S_1 : Sıradaki zaman aralığında XD röle vericiden aldığı paketi alıcıya iletirken verici de yeni bir paketi XD röleye iletacaktır. İletim sonrası olası durumlar; verici yeni paketi XD röleye iletirken XD rölenin eski paketi alıcıya iletmesi, verici yeni paketi XD röleye iletirken XD rölenin eski paketi alıcıya iletememesi, XD rölenin eski paketi alıcıya iletirken vericiden iletilen yeni paketin XD röleye iletilmemesi ve vericinin de XD rölenin de paketlerini iletememesi olarak verilebilir.



Şekil 5.4: Protokol 1-XD için Markov zinciri.

Şekil 5.4'te görüldüğü gibi, sistem S_0 bellek durumundayken XD röle, alıcı HD röle olarak çalışmaktadır. Bu durum XD röle, vericiden iletilen bir paketi alıncaya kadar devam edecektir. XD röle işareti aldığı anda sistem belleği S_1 durumuna geçecektir ve XD röle, FD röle olarak çalışacaktır. Buna göre verici yeni bir paketi XD röleye iletirken XD röle de bir önceki zaman aralığında vericiden aldığı paketi alıcıya iletecektir. Sistem S_1 durumundayken verici yeni paketi XD röleye iletmediği sürece sistem belleği S_1 durumunda kalmaya devam edecektir. Bu durumda XD röle, sistem S_1 bellek durumunda kaldıkça FD röle olarak çalışacaktır. Ancak verici yeni bir paketi XD röleye iletirken başarısız olması durumunda sistem S_0 bellek durumuna dönecektir.

Şekil 5.4'te verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin S_0 ve S_1 durumlarında olma olasılıkları,

$$p(S_0) = \hat{p}_{SR}p(S_0) + p_{SR}p(S_1), \quad (5.12)$$

$$p(S_1) = (1 - \hat{p}_{SR})p(S_0) + (1 - p_{SR})p(S_1) \quad (5.13)$$

şeklinde ifade edilir. Sistemin S_0 ve S_1 bellek durumlarında olma olasılıkları toplamı,

$$p(S_0) + p(S_1) = 1 \quad (5.14)$$

şeklinde olup, denklem 5.12, denklem 5.13 ve denklem 5.14 birlikte çözümlerse sistemin her bir bellek durumunda kalma olasılığı,

$$p(S_0) = \frac{p_{SR}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR}}, \quad (5.15)$$

$$p(S_1) = \frac{1 - \hat{p}_{SR}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR}} \quad (5.16)$$

olur. Etkin veri hızı ve verim,

$$\begin{aligned} \eta_{eff_{1-XD}} &= R[(1 - p_{SR})(1 - p_{RD})p(S_1) + p_{SR}(1 - p_{RD})p(S_1)] \\ &= R \frac{1 - \hat{p}_{SR} - p_{RD} + \hat{p}_{SR}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR}}, \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\eta_{1-XD} = \frac{1 - \hat{p}_{SR} - p_{RD} + \hat{p}_{SR}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR}} \quad (5.18)$$

şeklindedir [14, 31].

5.1.3 Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD'nin karşılaştırılması

Her iki protokolün kuramsal ve benzetim sonuçları karşılaştırılırken her iki sistemin verici-röle ve röle-alıcı arası uzaklıkları birbirine eşit olacak şekilde $d = 0.5$, yol kaybı katsayısı $\alpha = 3.14$ alınmıştır. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 çizdirilirken her iki iletim sisteminin maksimum iletim güçleri 10 dB ile sınırlandırılmış olup, Protokol 1-XD sistemi S_0 bellek durumundayken, yalnızca verici aktif olduğu için bu iletim gücünün tamamını kullanmakta, S_1 bellek durumundayken ise verici ve XD rölede eşit paylaşılmaktadır. Ayrıca Protokol 1-XD sisteminde sırasıyla XD röledeki öz-girişim ve alıcıdaki girişim, XD rölede gelen ve alıcıya gelen işaret güçlerinden 20 dB daha zayıf olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Şekil 5.5'te Protokol 1-HD'nin ve Protokol 1-XD'nin paket verimliliklerinin, sistem veri hızıyla değişimleri bilgisayar benzetimlerinden yararlanarak karşılaştırılmıştır.

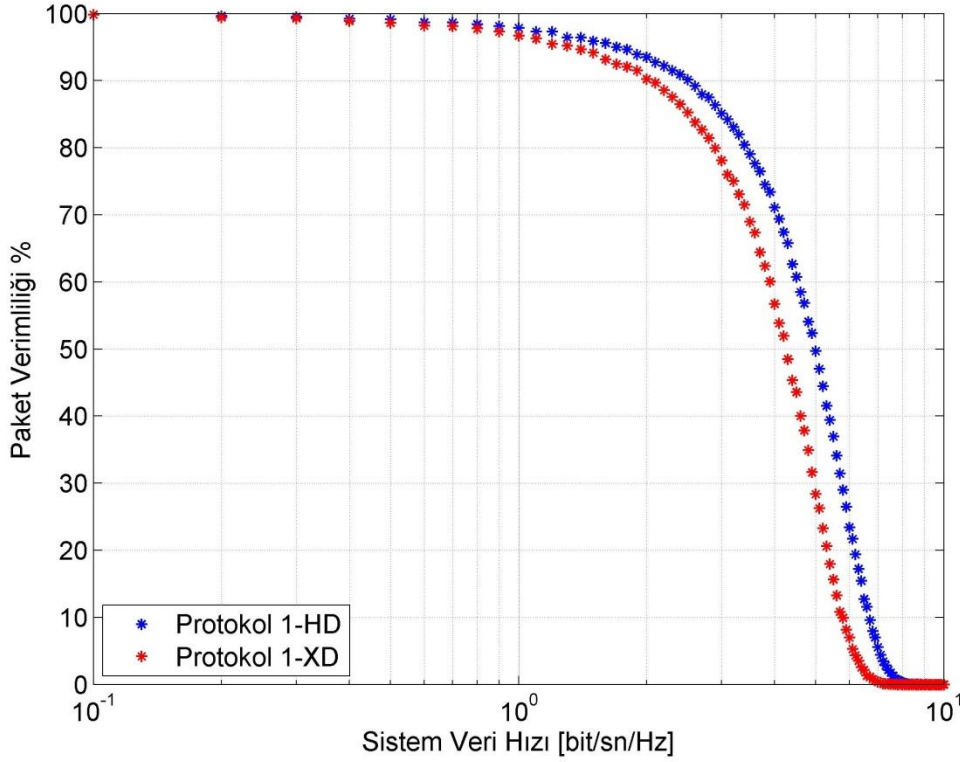
Burada paket verimliliği,

$$\text{paket verimliliği} = \frac{\text{alıcıya iletilen paket sayısı}}{\text{paket sayısı}} \quad (5.19)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Şekil 5.6'da ise Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD'nin verimlerinin, sistem veri hızına göre değişimleri karşılaştırılmıştır. Burada verim,

denklem 2.32'nin sözlü ifadesi olan, "birim zamanda alıcıya iletilen paket sayısı" olarak verilebilir.

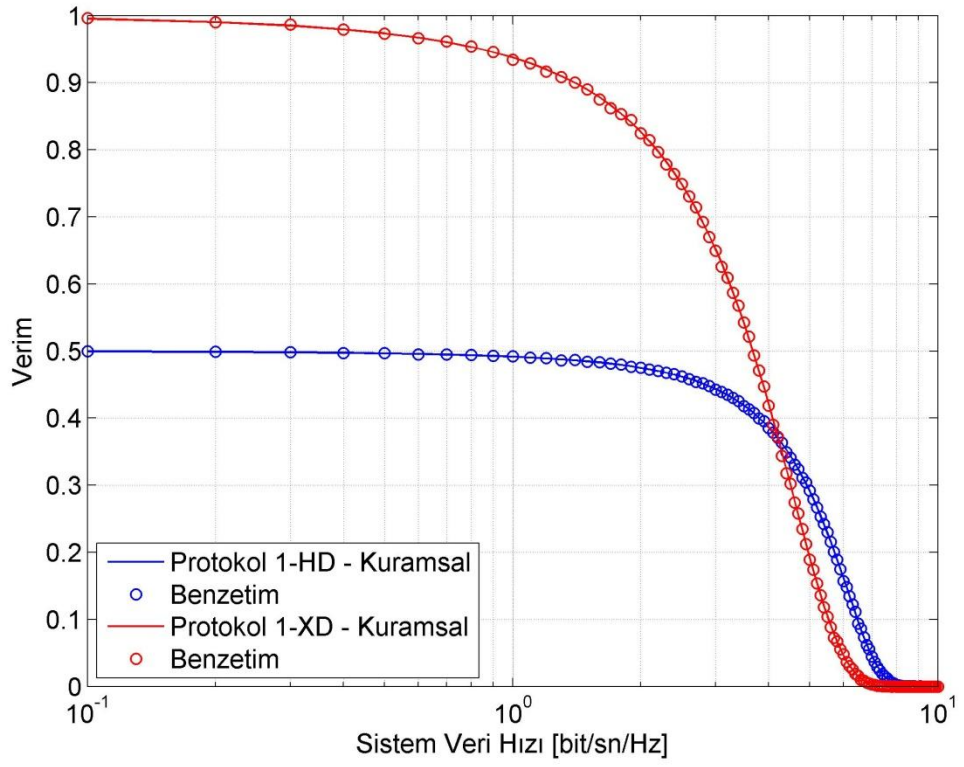
Şekil 5.7'de her iki protokolde de her bir düğümün veri hızı 2 bit/sn/Hz alınarak etkin veri hızlarının, iletim gücüyle değişimlerinin kuramsal ve benzetim sonuçlarına yer verilmiştir.



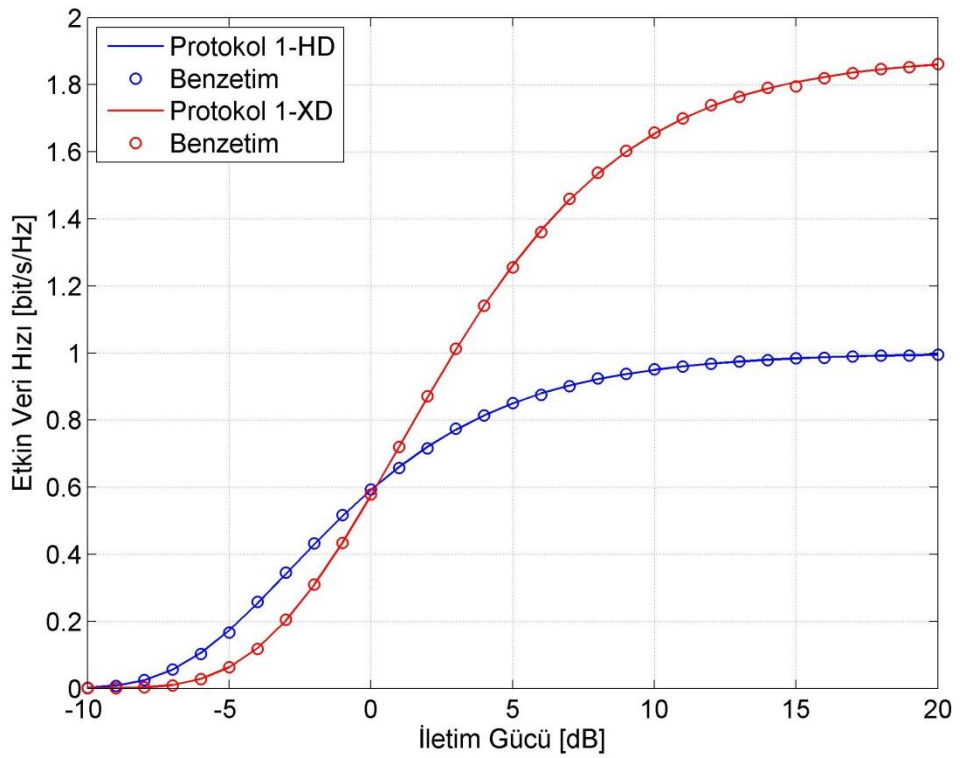
Şekil 5.5: Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD paket verimliliği karşılaştırması.

Şekil 5.5'te görüldüğü gibi Protokol 1-HD paket verimliliği konusunda Protokol 1-XD'ye göre daha başarılı çalışmaktadır. Ancak burada Protokol 1-HD'nin girişime maruz kalmadığı unutulmamalıdır. Şekil 5.6'ya bakıldığında ise sistem veri hızı ekseninde Protokol 1-XD'nin veriminin genellikle Protokol 1-HD'den daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca, Protokol-1B'nin S_1 bellek durumundayken girişime maruz kaldığı göz ardı edilmemelidir.

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 beraber değerlendirildiğinde HD röle XD röle ile değiştirildiğinde girişim nedeniyle bir miktar paket kaybına neden olursa da sistemin veri iletim hızının oldukça iyileştirilebildiği görülmektedir.



Şekil 5.6: Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD Verim Karşılaştırması



Şekil 5.7: Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD etkin veri hızı karşılaştırması.

Şekil 5.7’de görüldüğü gibi, iletim gücü arttıkça Protokol 1-XD, Protokol 1-HD’ye göre daha yüksek etkin veri hızlarına ulaşabilmektedir. Şekil 5.5’te yatay ekseninde veri hızının 2 bit/sn/Hz olduğu andaki değerler ile ve Şekil 5.7’de yatay ekseninde iletim gücünün 10 dB olduğu andaki değerler beraber değerlendirildiğinde, Protokol 1-XD’nin Protokol 1-HD’ye göre ~%5 daha düşük paket verimliliğine ulaşırken, etkin veri hızında ise ~%65 kazanç sağladığı görülmektedir.

5.2 Protokol 2

Bu bölümde sırasıyla yalnızca vericinin bir yeniden iletim hakkı olan HD röleli ve XD röleli otomatik yineleme istemeli işbirlikli iletişim sistemlerinin protokol tasarımları yapılmıştır. Daha sonra ise her iki protokolün aynı koşullar altında karşılaştırmalarına yer verilmiştir.

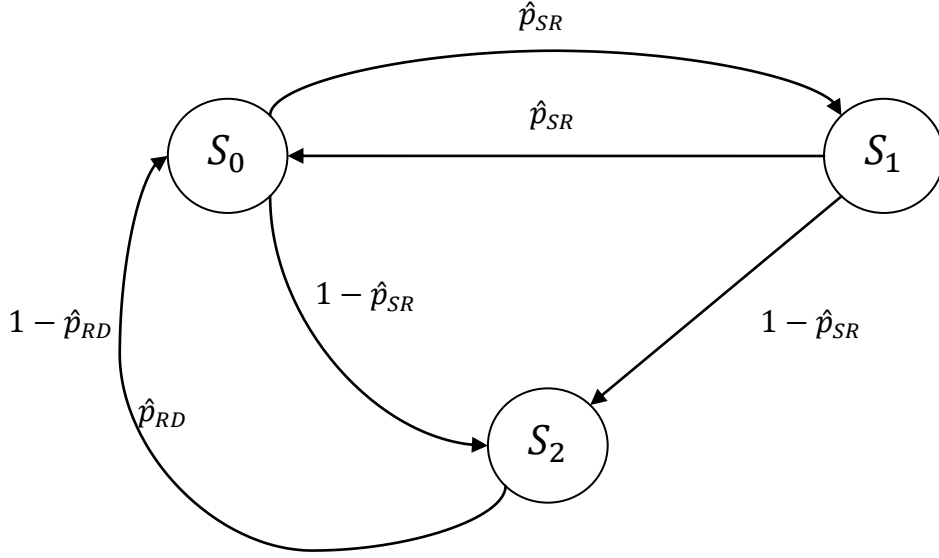
5.2.1 Protokol 2-HD

Bu HD röleli protokolde yalnızca vericide otomatik yineleme isteme kullanılmıştır. Şekil 5.8’de Markov zinciri gösterilen iletişim sistemi için aşağıdaki kurallar geçerlidir.

S_0 : Protokol 1-HD’de verilen S_0 bellek durumu ile aynıdır.

S_1 : Paketin ilk iletiminde verici-HD röle arasındaki kanalda servis kesilme olayı olmuştur. HD röle, vericinin paketini alamamış, vericiye NACK paketi göndermiştir. Bu durumda izleyen zaman aralığında verici aynı paketi yeniden HD röleye iletacaktır. İletim sonrası olası durumlar; verici-HD röle arasındaki kanalda \hat{p}_{SR} olasılıkla servis kesilme olayı olması durumunda paketin HD röleye iletilmemesi ve verici-HD röle arasındaki kanalda $1 - \hat{p}_{SR}$ olasılıkla servis kesilme olayı olmaması durumunda paketin HD röleye iletilmesi olarak verilebilir.

S_2 : Protokol 1-HD’de verilen S_1 bellek durumu ile aynıdır.



Şekil 5.8: Protokol 2-HD için Markov zinciri.

S_0 ve S_1 bellek durumlarında verici aktif durumdayken HD röle de alıcı durumundadır. S_0 bellek durumunda yeni bir paket ilk defa iletilirken, verici-HD röle arasındaki kanalda servis kesilmesi yaşandığında izleyen zaman aralığında sistem belleği S_1 durumuna geçmektedir. Bu durumda bir önceki zaman aralığında vericiden iletmeye çalışılan pakete bir yeniden iletim hakkı daha verilmekte, verici aynı paketi yeniden HD röleye iletmektedir. Yeniden servis kesilmesi yaşanması durumunda sistem belleği S_0 durumuna dönecek, yeni bir paket iletmeye çalışılacaktır. S_0 bellek durumunda bir paket ilk defa iletilirken ya da S_1 bellek durumunda bir paket yeniden iletilirken verici-HD röle arasındaki kanalda servis kesilmesi olmadığında ise sistem S_2 bellek durumuna geçecektir. Bu durumda izleyen zaman aralığında verici susacak, HD röle vericiden aldığı paketi alıcıya iletmeye çalışacaktır. İzleyen zaman aralığında ise sistem S_0 bellek durumuna dönecektir.

Şekil 5.8’de verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin S_0 , S_1 ve S_2 durumlarında olma olasılıkları,

$$p(S_0) = \hat{p}_{SR}p(S_1) + p(S_2), \quad (5.20)$$

$$p(S_1) = \hat{p}_{SR}p(S_0), \quad (5.21)$$

$$p(S_2) = (1 - \hat{p}_{SR})p(S_0) + (1 - \hat{p}_{SR})p(S_1) \quad (5.22)$$

şeklinde ifade edilir. Sistemin S_0 , S_1 ve S_2 bellek durumlarında olma olasılıkları toplamı denklem 5.23'te verilmiştir:

$$p(S_0) + p(S_1) + p(S_2) = 1. \quad (5.23)$$

Denklem 5.20, denklem 5.21, denklem 5.22 ve denklem 5.23 birlikte çözülerek sistemin S_0 , S_1 ve S_2 bellek durumlarında kalma olasılıkları,

$$p(S_0) = \frac{1}{(2 - \hat{p}_{SR})(1 + \hat{p}_{SR})}, \quad (5.24)$$

$$p(S_1) = \frac{\hat{p}_{SR}}{(2 - \hat{p}_{SR})(1 + \hat{p}_{SR})}, \quad (5.25)$$

$$p(S_2) = \frac{1 - \hat{p}_{SR}}{2 - \hat{p}_{SR}} \quad (5.26)$$

olur. Bu durumda etkin veri hızı ve verim sırasıyla,

$$\eta_{eff_{2-HD}} = R[(1 - \hat{p}_{RD})p(S_2)] = R \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD} + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}}{2 - \hat{p}_{SR}}, \quad (5.27)$$

$$\eta_{2-HD} = \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD} + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}}{2 - \hat{p}_{SR}} \quad (5.28)$$

şeklinde ifade edilir [14, 31].

5.2.2 Protokol 2-XD

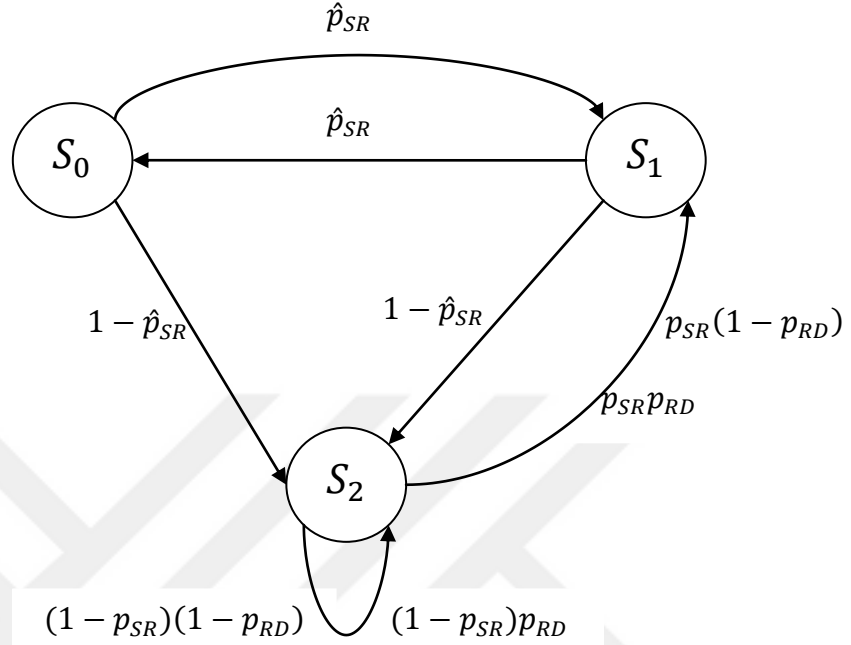
Bu XD röleli protokolde yalnızca vericide otomatik yineleme isteme kullanılmıştır. Şekil 5.9'da Markov zinciri gösterilen iletişim sistemi için aşağıdaki kurallar geçerlidir.

S_0 : Protokol 1-XD'de verilen S_0 bellek durumu ile aynıdır.

S_1 : Paketin ilk iletiminde verici-XD röle arasındaki kanalda servis kesilme olayı olmuştur. XD röle, vericinin paketini alamamış, vericiye NACK paketi göndermiştir. Bu durumda izleyen zaman aralığında verici aynı paketi yeniden XD röleye iletacaktır. İletim sonrası olası durumlar; verici-XD röle arasındaki kanalda \hat{p}_{SR} olasılıkla servis kesilme olayı olması durumunda paketin XD röleye iletilmemesi ve verici-röle arasındaki kanalda $1 - \hat{p}_{SR}$

olasılıkla servis kesilme olayı olmaması durumunda paketin XD röleye iletilmesi olarak verilebilir.

S_2 : Protokol 1-XD'de verilen S_1 bellek durumu ile aynıdır.



Şekil 5.9: Protokol 2-XD için Markov zinciri.

Şekil 5.9'da Markov zinciri görülen Protokol 2-XD için, sistem S_0 ve S_1 bellek durumlarındayken XD röle, alıcı HD röle olarak çalışmaktadır. Bu durum verici bir paketi XD röleye iletinceye kadar devam edecektir. S_0 ve S_1 bellek durumlarında verici iletim yaparken XD röle de alıcı durumundadır. S_0 bellek durumunda yeni bir paket ilk defa iletilirken, verici-XD röle arasındaki kanalda servis kesilmesi yaşandığında izleyen zaman aralığında sistem belleği S_1 durumuna geçmektedir. Bu durumda bir önceki zaman aralığında vericiden iletmeye çalışılan pakete bir yeniden iletim hakkı daha verilmekte, verici aynı paketi yeniden XD röleye iletmektedir. Yeniden servis kesilmesi yaşanması durumunda sistem belleği S_0 durumuna dönecek, yeni bir paket iletmeye çalışılacaktır. S_0 bellek durumunda bir paket ilk defa iletilirken ya da S_1 bellek durumunda bir paket yeniden iletilirken verici-XD röle arasındaki kanalda servis kesilmesi olmadığında ise sistem S_2 bellek durumuna geçecektir ve XD röle, FD röle olarak çalışacaktır. Buna göre verici yeni bir paketi XD röleye iletirken XD röle de bir önceki zaman aralığında vericiden aldığı paketi alıcıya iletacaktır. Sistem S_2 durumundayken verici yeni paketi XD

röleye iletebildiği sürece sistem belleği S_2 durumunda kalmaya devam edecektir. Bu durumda XD röle, sistem S_2 bellek durumunda kaldıkça FD röle olarak çalışacaktır. Ancak verici yeni bir paketi XD röleye iletirken başarısız olunması durumunda sistem S_1 bellek durumuna dönecek, verici paketi tekrar XD röleye iletmeye çalışacaktır. S_1 bellek durumunda yeniden iletilen paket başarılı bir şekilde iletilirse sistem S_2 bellek durumuna, başarısız olunursa S_0 bellek durumuna geçecektir.

Şekil 5.9'da verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin S_0 , S_1 ve S_2 durumlarında olma olasılıkları,

$$p(S_0) = \hat{p}_{SR}p(S_1), \quad (5.29)$$

$$p(S_1) = \hat{p}_{SR}p(S_0) + p_{SR}p(S_2), \quad (5.30)$$

$$p(S_2) = (1 - \hat{p}_{SR})p(S_0) + (1 - \hat{p}_{SR})p(S_1) + (1 - p_{SR})p(S_2) \quad (5.31)$$

şeklinde ifade edilir. Sistemin S_0 , S_1 ve S_2 bellek durumlarının toplamı,

$$p(S_0) + p(S_1) + p(S_2) = 1 \quad (5.32)$$

olmak üzere denklem 5.29, denklem 5.30, denklem 5.31 ve denklem 5.32 birlikte çözümlenerek sistemin her bir bellek durumunda kalma olasılıkları,

$$p(S_0) = \frac{\hat{p}_{SR}p_{SR}}{(1 + \hat{p}_{SR})(1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR})}, \quad (5.33)$$

$$p(S_1) = \frac{p_{SR}}{(1 + \hat{p}_{SR})(1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR})}, \quad (5.34)$$

$$p(S_2) = \frac{1 - \hat{p}_{SR}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR}} \quad (5.35)$$

olur. Etkin veri hızı ve verim ifadeleri,

$$\begin{aligned} \eta_{eff_{2-XD}} &= R[(1 - p_{SR})(1 - p_{RD})p(S_2) + p_{SR}(1 - p_{RD})p(S_2)] \\ &= R[(1 - p_{RD})p(S_2)] = R \frac{1 - \hat{p}_{SR} - p_{RD} + \hat{p}_{SR}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR}}, \end{aligned} \quad (5.36)$$

$$\eta_{2-XD} = \frac{1 - \hat{p}_{SR} - p_{RD} + \hat{p}_{SR}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR}} \quad (5.37)$$

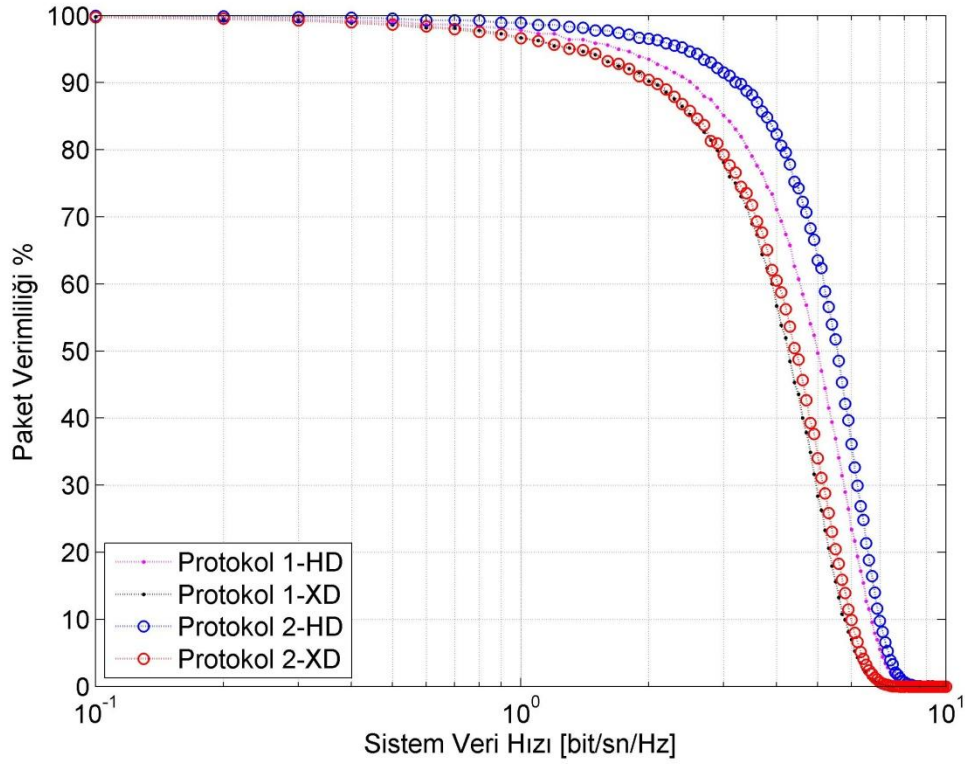
şeklindedir [14, 31].

5.2.3 Protokol 2-HD ve Protokol 2-XD'nin karşılaştırılması

Protokol 1-HD'nin etkin veri hızı ve veri ifadeleri denklem 5.10, denklem 5.11 ve Protokol 2-HD'nin etkin veri hızı ve verim ifadeleri, denklem 5.27, denklem 5.28 göz önüne alındığında, Protokol 1-HD'ye vericide otomatik yineleme isteme yönteminin uygulanmasının sistemin etkin veri hızı ve verimi üzerinde olumlu ya da olumsuz bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Verimde kazanç olmadığı gibi, sistem karmaşıklığı artmaktadır. Benzer şekilde, Protokol 1-XD'nin etkin veri hızı ve verim ifadeleri denklem 5.17, denklem 5.18 ve Protokol 2-XD'nin etkin veri hızı ve verim ifadeleri denklem 5.36, denklem 5.37 göz önüne alındığında, Protokol 1-XD'nin vericisinde otomatik yineleme isteme yönteminin uygulanmasının sistemin etkin veri hızı ve verimi üzerinde bir etkisi olmadığı görülmektedir. Protokol 1-HD'den Protokol 2-HD'ye geçişte olduğu gibi, Protokol 1-XD'den Protokol 2-XD'ye geçişte de sistem veriminde kazanç sağlanamadığı gibi sistem karmaşıklığı artmaktadır.

Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD sistemlerinin vericilerine otomatik yineleme isteme yöntemi uygulanarak elde edilen Protokol 2-HD ve Protokol 2-XD sistemlerinin etkin veri hızları ve verimlerinde bir değişim olmadığından, etkin veri hızları ve verimleri Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de elde edilen sonuçlar ile aynı olacaktır. Bu durumda Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD vericilerine otomatik yineleme isteme yönteminin uygulanmasının getirdiği kazancı incelemek için bu bölümde yalnızca, denklem 5.19'da verilen paket verimliliği karşılaştırmalarına yer verilmiştir. Şekil 5.10'da söz konusu dört protokolün paket verimliliklerinin sistem veri hızıyla değişimleri bilgisayar benzetimlerinden yararlanarak karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi sistem vericilerine otomatik yineleme isteme yönteminin uygulanması Protokol 2-HD ve Protokol 2-XD'nin verimlerini, Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD'ye göre artırmasa da paket verimliliklerinin anlamlı bir şekilde arttığı görülmektedir.



Şekil 5.10: Protokol 1-HD, Protokol 1-XD, Protokol 2-HD ve Protokol 2XD paket verimliliği karşılaştırması.

5.3 Protokol 3

Bu bölümde sırasıyla yalnızca rölenin bir yeniden iletim hakkı olan HD röleli ve XD röleli otomatik yineleme istemeli işbirlikli iletişim sistemlerinin protokol tasarımları yapılmıştır. Daha sonra ise her iki protokolün aynı koşullar altında karşılaştırmalarına yer verilmiştir.

5.3.1 Protokol 3-HD

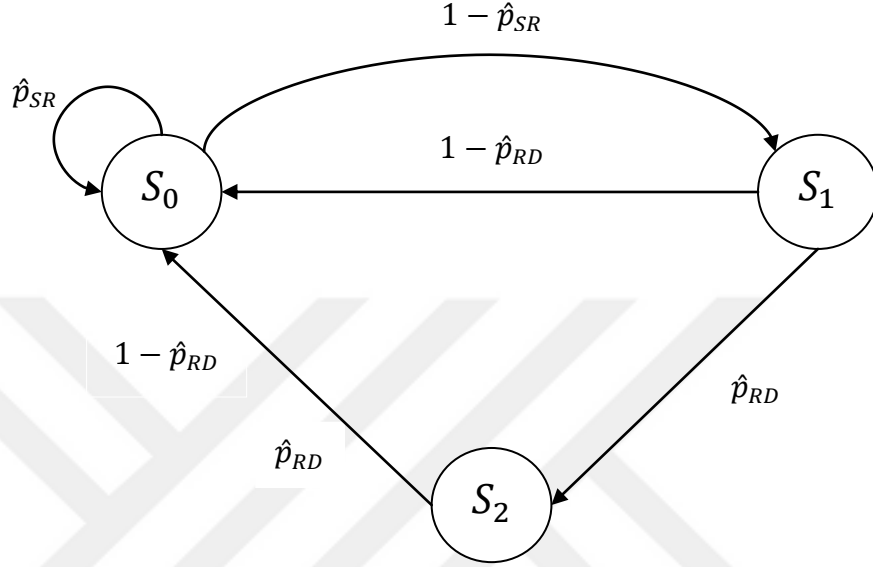
Bu HD röleli protokolde yalnızca HD rölede otomatik yineleme isteme kullanılmıştır. Şekil 5.11’de Markov zinciri görülen iletişim sistemi için aşağıdaki kurallar geçerlidir.

S_0 : Protokol 1-HD’de verilen S_0 bellek durumu ile aynıdır.

S_1 : Protokol 1-HD’de verilen S_1 bellek durumu ile aynıdır.

S_2 : Paketin HD röleden alıcıya iletiminde servis kesilme olayı olmuştur. Alıcı, HD röleden iletilen paketi alamamış, HD röleye NACK paketi göndermiştir. Bu durumda izleyen zaman aralığında HD röle aynı paketi

yeniden alıcıya iletacaktır. İletim sonrası olası durumlar; HD röle-alıcı arasındaki kanalda \hat{p}_{RD} olasılıkla servis kesilme olayı olması durumunda paketin alıcıya iletilmemesi ve HD röle-alıcı arasındaki kanalda $1 - \hat{p}_{RD}$ olasılıkla servis kesilme olayı olmaması durumunda paketin alıcıya iletilmesi olarak verilebilir.



Şekil 5.11: Protokol 3-HD için Markov zinciri.

Sistem S_0 bellek durumundayken verici iletim yaparken, HD röle ise alıcı durumundadır. Bu durum vericinin bir paketi HD röleye iletilinceye kadar devam edecektir. Bir paketin vericiden HD röleye iletilmesi durumunda sistem belleği S_1 durumuna geçecek, verici susacak ve HD röle bir önceki zaman aralığında vericiden aldığı paketi alıcıya iletmeye çalışacaktır. İzleyen zaman aralığında sistem belleği, HD röle paketi başarılı bir şekilde alıcıya iletebilirse S_1 bellek durumundan S_0 bellek durumuna, servis kesilme olayı olursa S_2 bellek durumuna geçecektir. S_2 bellek durumunda röle paketi yeniden ileticek ve izleyen zaman aralığında sistem belleği S_0 durumunda olacaktır.

Şekil 5.11’de verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin S_0 , S_1 ve S_2 durumlarında olma olasılıkları,

$$p(S_0) = \hat{p}_{SR}p(S_0) + (1 - \hat{p}_{RD})p(S_1) + p(S_2), \quad (5.38)$$

$$p(S_1) = (1 - \hat{p}_{SR})p(S_0), \quad (5.39)$$

$$p(S_2) = \hat{p}_{RD}p(S_1) \quad (5.40)$$

olmak üzere bu bellek durumlarının toplamı

$$p(S_0) + p(S_1) + p(S_2) = 1 \quad (5.41)$$

şeklindedir. Denklem 5.38, denklem 5.39, denklem 5.40 ve denklem 5.41 birlikte çözümlenerek sistemin her bir bellek durumunda kalma olasılığı,

$$p(S_0) = \frac{1}{2 + \hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}}, \quad (5.42)$$

$$p(S_1) = \frac{1 - \hat{p}_{SR}}{2 + \hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}}, \quad (5.43)$$

$$p(S_2) = \frac{\hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}}{2 + \hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}} \quad (5.44)$$

şeklinde ifade edilir. Bu durumda Protokol 3-HD'nin etkin veri hızı ve verim ifadeleri sırasıyla,

$$\begin{aligned} \eta_{eff_{3-HD}} &= R[(1 - \hat{p}_{RD})p(S_1) + (1 - \hat{p}_{RD})p(S_2)] \\ &= R \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD}^2 + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}^2}{2 + \hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}}, \end{aligned} \quad (5.45)$$

$$\eta_{3-HD} = \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD}^2 + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}^2}{2 + \hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}} \quad (5.46)$$

şeklindedir [14, 31].

5.3.2 Protokol 3-XD

Bu XD röleli protokolde XD rölede otomatik yineleme isteme kullanılmıştır. Şekil 5.12'de Markov zinciri gösterilen iletişim sistemi için aşağıdaki kurallar geçerlidir.

S_0 : Protokol 1-XD'de verilen S_0 bellek durumu ile aynıdır.

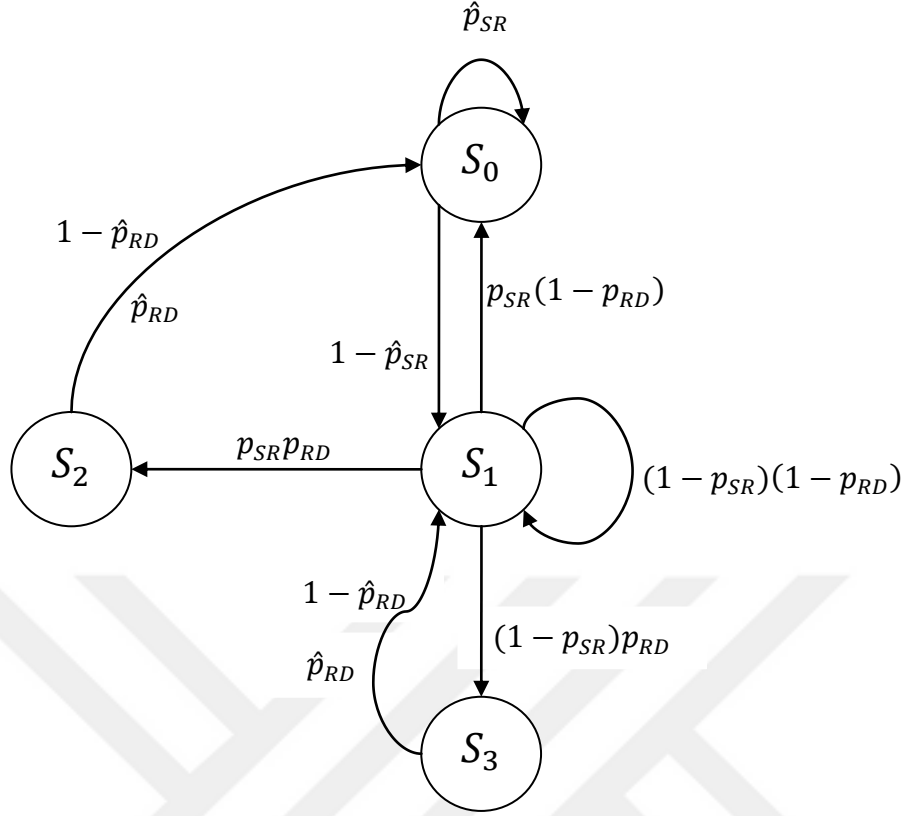
S_1 : Protokol 1-XD'de verilen S_1 bellek durumu ile aynıdır.

S_2 : Hem verici hem de XD röle paketlerini iletememiştir. Sıradaki zaman aralığında verici susacak, XD röle yeniden iletim yapacaktır. İzleyen zaman

aralığında XD röle aynı paketi yeniden alıcıya iletacaktır. İletim sonrası olası durumlar; XD röle-alıcı arasındaki kanalda \hat{p}_{RD} olasılıkla servis kesilme olayı olması durumunda paketin alıcıya iletilmemesi ve XD röle-alıcı arasındaki kanalda $1 - \hat{p}_{RD}$ olasılıkla servis kesilme olayı olmaması durumunda paketin alıcıya iletilmesi olarak verilebilir.

S_3 : Vericinin paketi XD röle tarafından alınmış, XD rölenin paketi alıcıya iletilmemiştir. Bu durumda izleyen zaman aralığında XD röle, vericiden gelen yeni paketi bellekte saklayacak, eski paketi yeniden iletacaktır. İletim sonrası olası durumlar; XD röle-alıcı arasındaki kanalda \hat{p}_{RD} olasılıkla servis kesilme olayı olması durumunda paketin alıcıya iletilmemesi ve XD röle-alıcı arasındaki kanalda $1 - \hat{p}_{RD}$ olasılıkla servis kesilme olayı olmaması durumunda paketin alıcıya iletilmesi olarak verilebilir.

Şekil 5.12’de görüldüğü gibi, sistem S_0 bellek durumundayken XD röle, alıcı HD röle olarak çalışmaktadır. Bu durum XD röle, vericiden iletilen bir paketi alıcaya kadar devam edecektir. XD röle işareti aldığı anda sistem S_1 bellek durumuna geçecektir ve XD röle FD röle olarak çalışacaktır. Buna göre verici yeni bir paketi XD röleye iletirken XD röle de bir önceki zaman aralığında vericiden aldığı paketi alıcıya iletacaktır. Sistem S_1 bellek durumundayken verici yeni paketi XD röleye, XD röle de eski paketi alıcıya iletmediği sürece sistem S_1 bellek durumunda kalmaya devam edecektir. XD röle eski paketi alıcıya iletirken verici yeni paketi XD röleye iletmediğinde sistem S_0 bellek durumuna, yani başlangıç durumuna dönecektir. Hem verici hem de XD röle paketlerini iletmediğinde sistem S_2 bellek durumuna geçecektir. Bu durumda izleyen zaman aralığında eski paket XD röleden alıcıya yeniden iletmeye çalışılacak, sıradaki zaman aralığında XD röle belleği boş olduğu için sistem başlangıç durumu S_0 bellek durumuna dönecektir. Sistem S_1 bellek durumundayken XD röle, vericiden iletilen yeni paketi almış, alıcı XD röleden iletilen eski paketi alamamışsa S_3 bellek durumuna geçecektir. S_3 bellek durumunda XD röle vericiden iletilen yeni paketi belleğinde saklayacak, eski paketi alıcıya yeniden iletacaktır. XD röle belleğinde yeni paket bulunduğundan, tekrar iletim sonrası sistem S_1 bellek durumuna geçecektir.



Şekil 5.12: Protokol 3-XD için Markov zinciri.

Şekil 5.12’de verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin S_0 , S_1 , S_2 ve S_3 durumlarında olma olasılıkları,

$$p(S_0) = \hat{p}_{SR}p(S_0) + p_{SR}(1 - p_{RD})p(S_1) + p(S_2), \quad (5.47)$$

$$p(S_1) = (1 - \hat{p}_{SR})p(S_0) + (1 - p_{SR})(1 - p_{RD})p(S_1) + p(S_3), \quad (5.48)$$

$$p(S_2) = p_{SR}p_{RD}p(S_1), \quad (5.49)$$

$$p(S_3) = (1 - p_{SR})p_{RD}p(S_1) \quad (5.50)$$

şeklinde ifade edilir. S_0 , S_1 , S_2 ve S_3 durumlarında olma olasılıkları toplamları,

$$p(S_0) + p(S_1) + p(S_2) + p(S_3) = 1 \quad (5.51)$$

olup denklem 5.47, denklem 5.48, denklem 5.49, denklem 5.50 ve denklem 5.51 birlikte çözümlenerek sistemin her bir bellek durumunda kalma olasılıkları,

$$p(S_0) = \frac{p_{SR}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}}, \quad (5.52)$$

$$p(S_1) = \frac{1 - \hat{p}_{SR}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}}, \quad (5.53)$$

$$p(S_2) = \frac{p_{SR}p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{SR}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}}, \quad (5.54)$$

$$p(S_3) = \frac{p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD} - p_{SR}p_{RD} + \hat{p}_{SR}p_{SR}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}} \quad (5.55)$$

olur. Bu durumda Protokol 3-XD'nin etkin veri hızı ve verimi sırasıyla,

$$\begin{aligned} \eta_{eff_{3-XD}} &= R[(1 - p_{SR})(1 - p_{RD})p(S_1) + p_{SR}(1 - p_{RD})p(S_1) \\ &\quad + (1 - \hat{p}_{RD})p(S_2) + (1 - \hat{p}_{RD})p(S_3)] \\ &= R \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD}p_{RD} + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}}, \end{aligned} \quad (5.56)$$

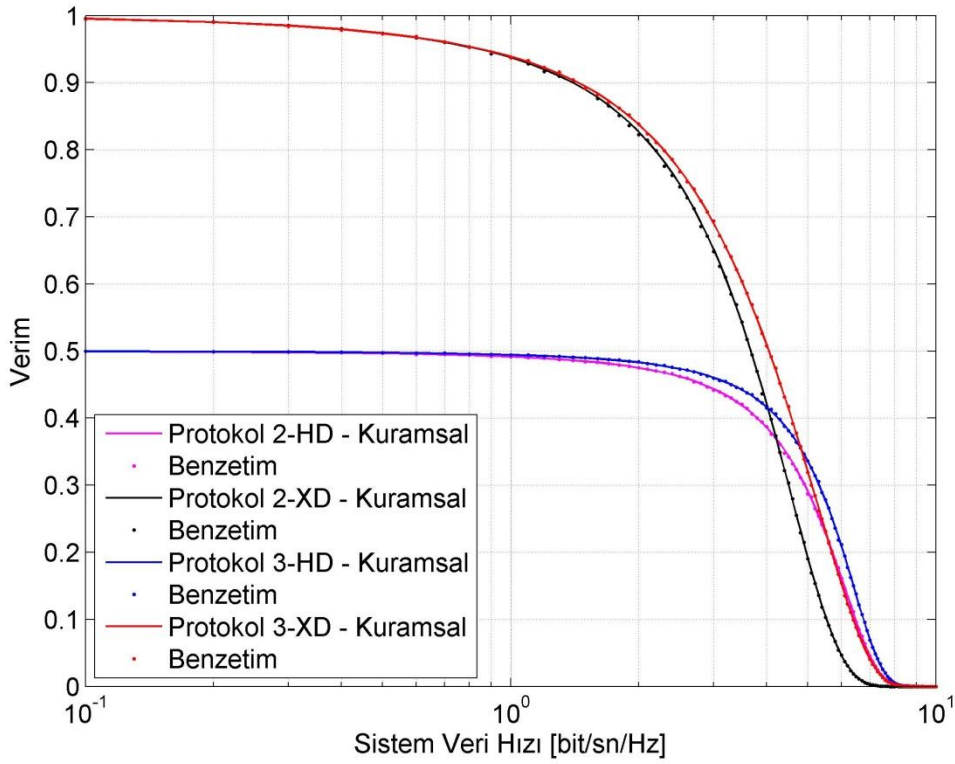
$$\eta_{3-XD} = \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD}p_{RD} + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}} \quad (5.57)$$

şeklindedir [14, 31].

5.3.3 Protokol 3-HD ve Protokol 3-XD'nin karşılaştırılması

Protokol 3 çeşitlerinin anlatıldığı bölümde görüldüğü gibi otomatik yineleme isteme yöntemi yalnızca vericiye uygulandığında sistem hızları değişmemektedir. Ancak Şekil 5.10 incelendiğinde, otomatik yineleme isteme yönteminin uygulanmasıyla sistemde uçtan uca iletilebilen paket oranında artış elde edildiği görülmektedir. Otomatik yineleme isteme yöntemi yalnızca röleye uygulandığında sistem veri hızları da değişmektedir. Bu nedenle bu bölümde Protokol 3-HD ve Protokol 3-XD'nin verim ve etkin veri hızı eğrilerinin yanında Protokol 2-HD ve Protokol 2-XD'nin verim ve etkin veri hızı değerlendirmelerine de yer verilmiştir.

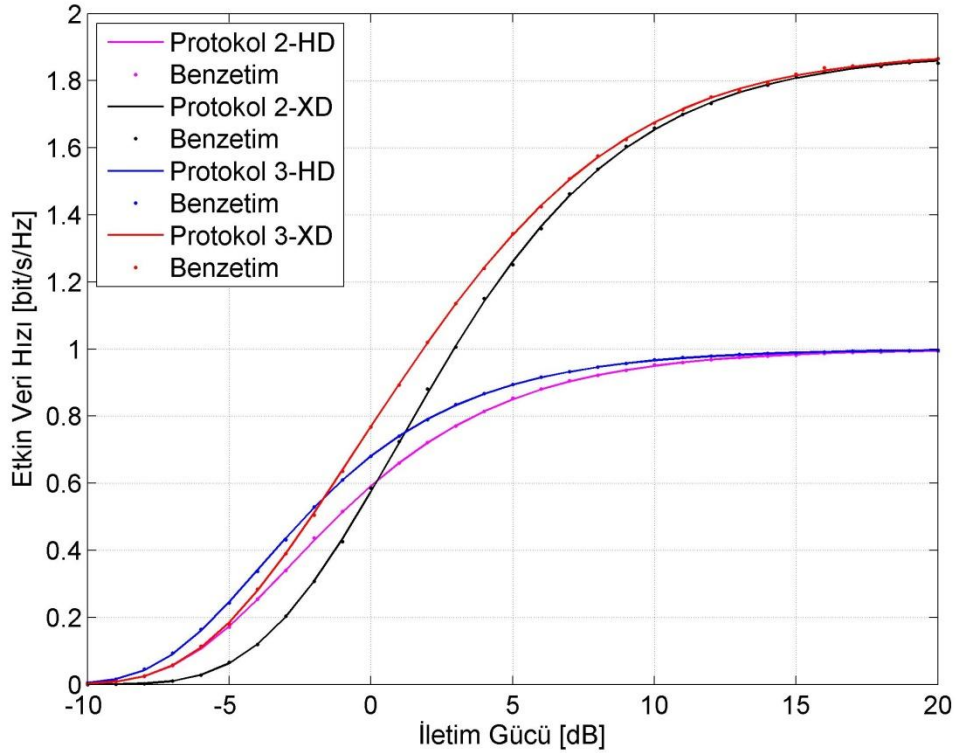
Söz konusu dört protokolün kuramsal ve benzetim sonuçları karşılaştırılırken dört sistemin verici-röle ve röle-alıcı arası uzaklıkları birbirine eşit olacak şekilde $d = 0.5$, yol kaybı katsayısı $\alpha = 3.14$ alınmıştır. Şekil 5.13'deki sonuçlar elde edilirken her iletim sisteminin maksimum iletim güçleri 10 dB ile sınırlandırılmış olup, Protokol



Şekil 5.13: Protokol 2-HD, Protokol 2-XD, Protokol 3-HD ve Protokol 3-XD verimlerinin karşılaştırılması.

2-XD ve Protokol 3-XD sistemlerinde yalnızca bir düğüm iletim yaparken bu iletim gücünün tamamı kullanılmakta, her iki düğüm de iletim yaparken verici ve XD rölede eşit paylaşılmaktadır. Ayrıca Protokol 2-XD ve Protokol 3-XD sistemlerinde sırasıyla XD röledeki öz-girişim ve alıcıdaki girişim, XD röleye gelen ve alıcıya gelen işaret güçlerinden 20 dB daha zayıf olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Şekil 5.13'te bu dört protokolün verimlerinin, sistem veri hızına göre değişimleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.10'da sisteme otomatik yineleme isteme uygulamanın sistemin paket verimliliğini artırdığı görülmüştü. Otomatik yineleme isteme yöntemini verici yerine röleye uygulayınca Şekil 5.13'te görüldüğü gibi sistem veriminde de artış sağlanmaktadır. Şekil 5.13'te düşük veri iletim hızlarında Protokol 3-XD'nin Protokol 3-HD'ye göre oldukça avantajlı olduğu görülmektedir. Ancak veri iletim hızı arttıkça her iki protokolün de verimlerinde düşme görülmektedir. Protokol 3-XD'de XD röle bellek durumuna göre FD röle olarak da çalıştığından Protokol 3-XD'nin veriminde yüksek veri iletim hızlarında daha hızlı düşüş görülmektedir.

Şekil 5.14'te söz konusu dört protokolde de her bir düğümün veri hızı 2 bit/sn/Hz alınarak etkin veri hızlarının, iletim gücüyle değişimlerinin kuramsal ve benzetim sonuçlarına yer verilmiştir. Şekil 5.14'te yükselen iletim gücüyle beraber protokollerin ulaşabildiği veri iletim hızları arttığı görülmektedir. Ancak Protokol 3-HD'de HD rölenin ayrık zamanlarda verici ya da alıcı olarak çalışması nedeniyle ulaşılabilen veri iletim hızı, Protokol 3-XD'nin ulaşabildiği veri iletim hızının oldukça altında kalmaktadır.



Şekil 5.14: Protokol 2-HD, Protokol 2-XD, Protokol 3-HD ve Protokol 3-XD etkin veri hızları karşılaştırması.

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te görüldüğü gibi, otomatik yineleme isteme yöntemi verici yerine röleye uygulandığında sistem verimlilikleri ve etkin veri hızları artırılabilir.

5.4 Protokol 4

Bu bölümde hem vericinin hem de rölenin birer yeniden iletim hakkı olan HD röleli ve XD röleli otomatik yineleme istemeli işbirlikli iletişim sistemlerinin protokol

tasarımları yapılmıştır. Daha sonra ise her iki protokolün aynı koşullar altında karşılaştırmalarına yer verilmiştir.

5.4.1 Protokol 4-HD

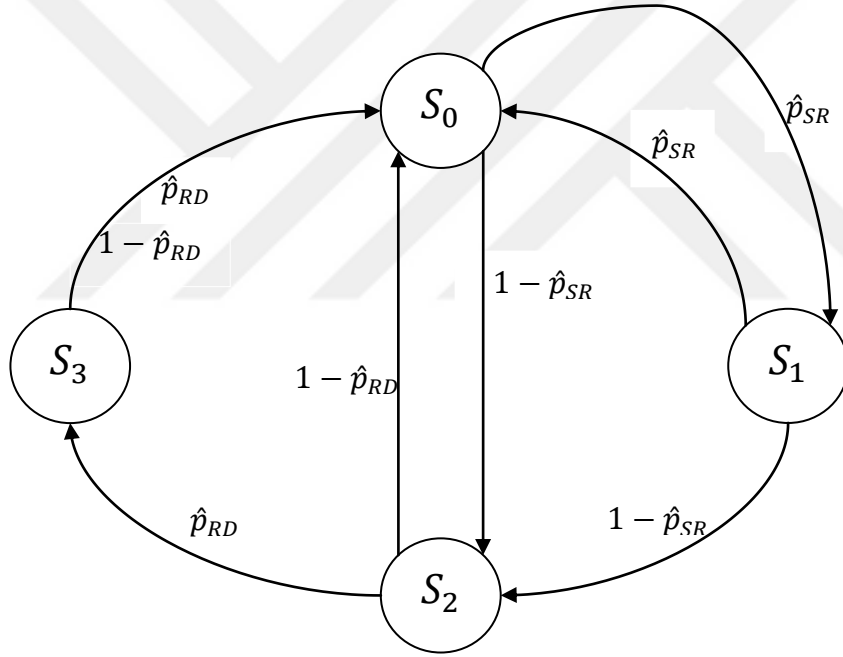
Bu HD röleli protokolde hem vericide hem de rölede otomatik yineleme isteme kullanılmıştır. Şekil 5.15'te Markov zinciri gösterilen iletişim sistemi için aşağıdaki kurallar geçerlidir.

S_0 : Protokol 1-HD'de verilen S_0 bellek durumu ile aynıdır.

S_1 : Protokol 2-HD'de verilen S_1 bellek durumu ile aynıdır.

S_2 : Protokol 2-HD'de verilen S_2 bellek durumu ile aynıdır.

S_3 : Protokol 3-HD'de verilen S_2 bellek durumu ile aynıdır.



Şekil 5.15: Protokol 4-HD için Markov zinciri.

S_0 ve S_1 bellek durumlarında verici aktif durumdayken HD röle de alıcı durumundadır. S_0 bellek durumunda yeni bir paket ilk defa iletilirken, verici-HD röle arasındaki kanalda servis kesilmesi yaşandığında izleyen zaman aralığında sistem belleği S_1 durumuna geçmektedir. Bu durumda bir önceki zaman aralığında vericiden iletmeye çalışılan pakete bir yeniden iletim hakkı daha verilmekte, verici aynı paketi yeniden HD röleye iletmektedir. Yeniden servis kesilmesi yaşanması durumunda sistem belleği S_0 durumuna dönecek, yeni bir paket iletmeye

çalışılacaktır. S_0 ya da S_1 bellek durumlarında bir paket iletilirken verici-HD röle arasındaki kanalda servis kesilmesi olmadığında ise sistem S_2 bellek durumuna geçecektir. Bu durumda izleyen zaman aralığında verici susacak, HD röle vericiden aldığı paketi alıcıya iletmeye çalışacaktır. İzleyen zaman aralığında sistem belleği, HD röle paketi başarılı bir şekilde alıcıya iletebilirse S_2 bellek durumundan S_0 bellek durumuna, servis kesilme olayı olursa S_3 bellek durumuna geçecektir. S_3 bellek durumunda HD röle paketi tekrar iletilecek ve izleyen zaman aralığında sistem belleği S_0 durumunda olacaktır.

Şekil 5.15'te verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin S_0 , S_1 , S_2 ve S_3 durumlarında olma olasılıkları,

$$p(S_0) = \hat{p}_{SR}p(S_1) + (1 - \hat{p}_{RD})p(S_2) + p(S_3), \quad (5.58)$$

$$p(S_1) = \hat{p}_{SR}p(S_0), \quad (5.59)$$

$$p(S_2) = (1 - \hat{p}_{SR})p(S_0) + (1 - \hat{p}_{SR})p(S_1), \quad (5.60)$$

$$p(S_3) = \hat{p}_{RD}p(S_2) \quad (5.61)$$

şeklinde ifade edilir. Protokol 4-HD'nin S_0 , S_1 , S_2 ve S_3 bellek durumlarında olma olasılıkları toplamı,

$$p(S_0) + p(S_1) + p(S_2) + p(S_3) = 1 \quad (5.62)$$

olup, denklem 5.58, denklem 5.59, denklem 5.60, denklem 5.61 ve denklem 5.62 birlikte çözülerek sistemin her bir bellek durumunda kalma olasılığı,

$$p(S_0) = \frac{1}{(1 + \hat{p}_{SR})(2 + \hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD})}, \quad (5.63)$$

$$p(S_1) = \frac{\hat{p}_{SR}}{(1 + \hat{p}_{SR})(2 + \hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD})}, \quad (5.64)$$

$$p(S_2) = \frac{1 - \hat{p}_{SR}}{2 + \hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}}, \quad (5.65)$$

$$p(S_3) = \frac{\hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}}{2 + \hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}} \quad (5.66)$$

olur. Sistemin veri hızı R olmak üzere sistemin etkin veri hızı,

$$\begin{aligned}\eta_{eff_{4-HD}} &= R[(1 - \hat{p}_{RD})p(S_2) + (1 - \hat{p}_{RD})p(S_3)] \\ &= R \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD}^2 + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}^2}{2 + \hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}},\end{aligned}\quad (5.67)$$

$$\eta_{4-HD} = \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD}^2 + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}^2}{2 + \hat{p}_{RD} - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}} \quad (5.68)$$

şeklinde [14, 31].

5.4.2 Protokol 4-XD

Bu XD röleli protokolde hem vericide hem de XD rölede otomatik yineleme isteme kullanılmıştır. Şekil 5.16'da Markov zinciri gösterilen iletişim sistemi için aşağıdaki kurallar geçerlidir.

S_0 : Protokol 1-XD'de verilen S_0 bellek durumu ile aynıdır.

S_1 : Protokol 2-XD'de verilen S_1 bellek durumu ile aynıdır.

S_2 : Protokol 2-XD'de verilen S_2 bellek durumu ile aynıdır.

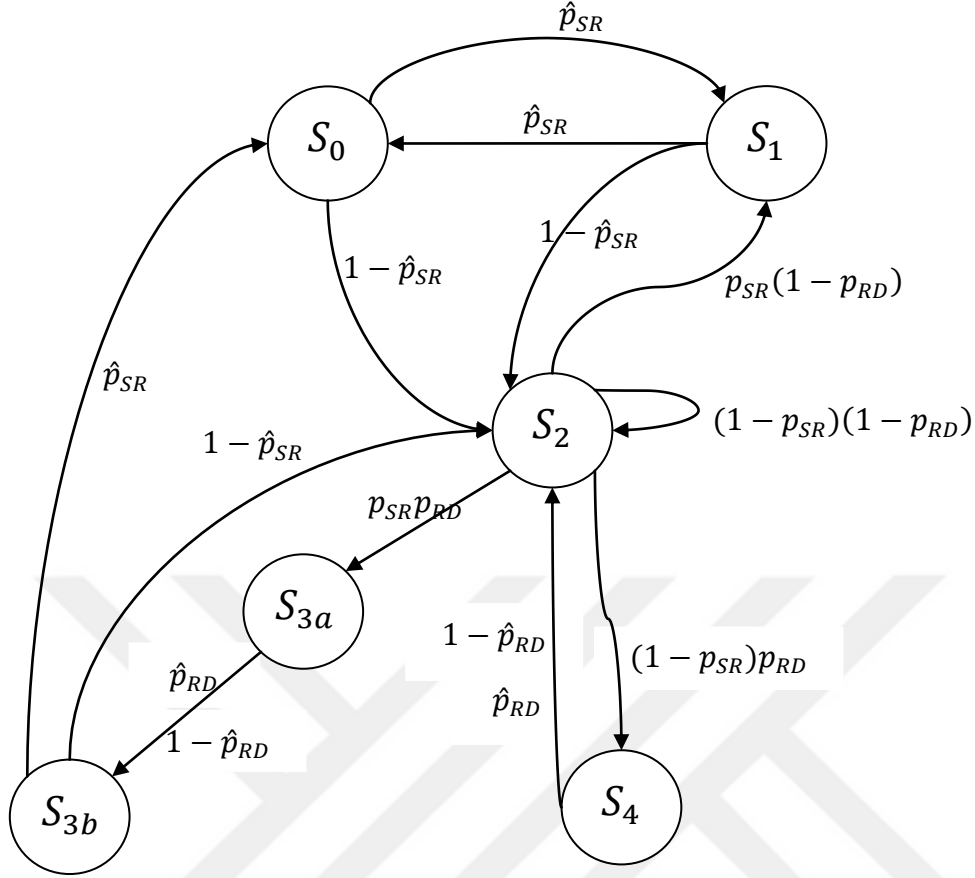
S_{3a} : Hem verici hem de röle paketlerini iletememiştir. Sıradaki zaman aralığında verici susacak, röle HD olarak yeniden iletim yapacaktır. İzleyen zaman aralığında röle aynı paketi yeniden alıcıya iletacaktır. İletim sonrası olası durumlar; röle-alıcı arasındaki kanalda \hat{p}_{RD} olasılıkla servis kesilme olayı olması durumunda paketin alıcıya iletilmemesi ve röle-alıcı arasındaki kanalda $1 - \hat{p}_{RD}$ olasılıkla servis kesilme olayı olmaması durumunda paketin alıcıya iletilmesi olarak verilebilir. İletim sonrası sistem belleği vericinin yeniden iletim yapacağı S_{3b} bellek durumuna geçecektir.

S_{3b} : Hem verici hem de röle paketlerini iletememiş, izleyen zaman aralığında röle yeniden iletim yapmıştır. Sıradaki zaman aralığında röle, alıcı HD röle olarak çalışacak, verici yeniden iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar; verici-röle arasındaki kanalda \hat{p}_{SR} olasılıkla servis kesilme olayı olması durumunda paketin alıcıya iletilmemesi ve verici-röle arasındaki kanalda $1 - \hat{p}_{SR}$ olasılıkla servis kesilme olayı olmaması durumunda paketin alıcıya iletilmesi olarak verilebilir.

S_4 : Protokol 3-XD'de verilen S_3 bellek durumu ile aynıdır.

Şekil 5.16'da görüldüğü gibi, sistem S_0 ve S_1 bellek durumlarındayken XD röle, alıcı HD röle olarak çalışmaktadır. Bu durum XD röle, vericiden iletilen bir paketi alıncaya kadar devam edecektir. S_0 ve S_1 bellek durumlarında verici aktif durumdayken XD röle de alıcı durumundadır. S_0 bellek durumunda yeni bir paket ilk defa iletilirken, verici-XD röle arasındaki kanalda servis kesilmesi yaşandığında izleyen zaman aralığında sistem belleği S_1 durumuna geçmektedir. Bu durumda pakete bir yeniden iletim hakkı daha verilmekte, verici aynı paketi yeniden XD röleye iletmektedir. Yeniden servis kesilmesi yaşanması durumunda sistem belleği S_0 durumuna dönecektir. S_0 bellek durumunda bir paket ilk defa iletilirken ya da S_1 bellek durumunda bir paket yeniden iletilirken verici-XD röle arasındaki kanalda servis kesilmesi olmadığında ise sistem S_2 bellek durumuna geçecektir ve XD röle, FD röle olarak çalışacaktır. Buna göre verici yeni bir paketi XD röleye iletirken XD röle de bir önceki zaman aralığında vericiden aldığı paketi alıcıya iletacaktır. Sistem S_2 durumundayken verici yeni paketi XD röleye ve XD röle eski paketi alıcıya iletmediği sürece sistem belleği S_2 durumunda kalacaktır. Ancak verici yeni paketi XD röleye iletirken başarılı, XD röle eski paketi alıcıya iletirken başarısız olunması durumunda sistem S_4 bellek durumuna geçecek, XD röle yeni paketi bellekte saklarken eski paketi tekrar alıcıya iletmeye çalışacaktır. İzleyen zaman aralığında sistem S_2 bellek durumuna geçecektir. Sistem S_2 bellek durumundayken XD röle eski paketi alıcıya iletirken başarılı, verici yeni paketi XD röleye iletirken başarısız olunması durumunda sistem S_1 bellek durumuna dönecek, verici paketi tekrar XD röleye iletmeye çalışacaktır. S_1 bellek durumunda yeniden iletilen paket başarılı bir şekilde XD röleye iletilirse sistem S_2 bellek durumuna, başarısız olunursa S_0 bellek durumuna geçecektir.

Sistem S_2 bellek durumundayken hem verici hem de röle paketlerini iletmezse paketler ayırık zaman aralıklarında yeniden iletilecektir. Buna göre izleyen zaman aralığında sistem belleği S_{3a} durumuna geçecek, yalnızca röle yeniden iletim yapacaktır. Bu durumu izleyen zaman aralığında ise sistem belleği S_{3b} durumuna geçecek, verici yeniden iletim yapacaktır. Vericiden iletilen paket röleye iletilebilirse sistem S_2 bellek durumuna, iletilemezse S_0 bellek durumuna geçecektir.



Şekil 5.16: Protokol 4-XD için Markov zinciri.

Şekil 5.16’da verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin S_0 , S_1 , S_2 , S_{3a} , S_{3b} ve S_4 durumlarında olma olasılıkları,

$$p(S_0) = \hat{p}_{SR}p(S_1) + \hat{p}_{SR}p(S_{3b}), \quad (5.69)$$

$$p(S_1) = \hat{p}_{SR}p(S_0) + p_{SR}(1 - p_{RD})p(S_2), \quad (5.70)$$

$$p(S_2) = (1 - \hat{p}_{SR})p(S_0) + (1 - \hat{p}_{SR})p(S_1) + (1 - \hat{p}_{SR})p(S_{3b}) \\ + (1 - p_{SR})(1 - p_{SR})p(S_2) + p(S_4), \quad (5.71)$$

$$p(S_{3a}) = p_{SR}p_{RD}p(S_2), \quad (5.72)$$

$$p(S_{3b}) = p(S_{3b}), \quad (5.73)$$

$$p(S_4) = (1 - p_{SR})p_{RD}p(S_2) \quad (5.74)$$

şeklinde ifade edilir. Sistemin her bir bellek durumunda olma olasılıklarının toplamı,

$$p(S_0) + p(S_1) + p(S_2) + p(S_{3a}) + p(S_{3b}) + p(S_4) = 1 \quad (5.75)$$

şeklinde ifade edilir. Buna göre denklem 5.69, denklem 5.70, denklem 5.71, denklem 5.72, denklem 5.73, denklem 5.74 ve denklem 5.75 birlikte çözülerek sistemin her bir bellek durumunda kalma olasılıkları,

$$p(S_0) = \frac{\hat{p}_{SR}p_{SR}}{(1 + \hat{p}_{SR})(1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD})}, \quad (5.76)$$

$$p(S_1) = \frac{p_{SR} - p_{SR}p_{RD} + \hat{p}_{SR}^2 p_{SR}p_{RD}}{(1 + \hat{p}_{SR})(1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD})}, \quad (5.77)$$

$$p(S_2) = \frac{1 - \hat{p}_{SR}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}}, \quad (5.78)$$

$$p(S_{3a}) = \frac{p_{SR}p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{SR}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}}, \quad (5.79)$$

$$p(S_{3b}) = \frac{p_{SR}p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{SR}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}}, \quad (5.80)$$

$$p(S_4) = \frac{p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD} - p_{SR}p_{RD} + \hat{p}_{SR}p_{SR}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}} \quad (5.81)$$

olur. Bu durumda Protokol 4-XD'nin etkin veri hızı ve verim ifadeleri sırasıyla,

$$\begin{aligned} \eta_{eff4-XD} &= R[(1 - p_{SR})(1 - p_{RD})p(S_2) + p_{SR}(1 - p_{RD})p(S_2) \\ &\quad + (1 - \hat{p}_{RD})p(S_{3a}) + (1 - \hat{p}_{RD})p(S_4)] \\ &= R \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD}p_{RD} + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}}, \end{aligned} \quad (5.82)$$

$$\eta_{4-XD} = \frac{1 - \hat{p}_{SR} - \hat{p}_{RD}p_{RD} + \hat{p}_{SR}\hat{p}_{RD}p_{RD}}{1 - \hat{p}_{SR} + p_{SR} + p_{RD} - \hat{p}_{SR}p_{RD}} \quad (5.83)$$

şeklinde olur [14, 31].

5.4.3 Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'nin karşılaştırılması

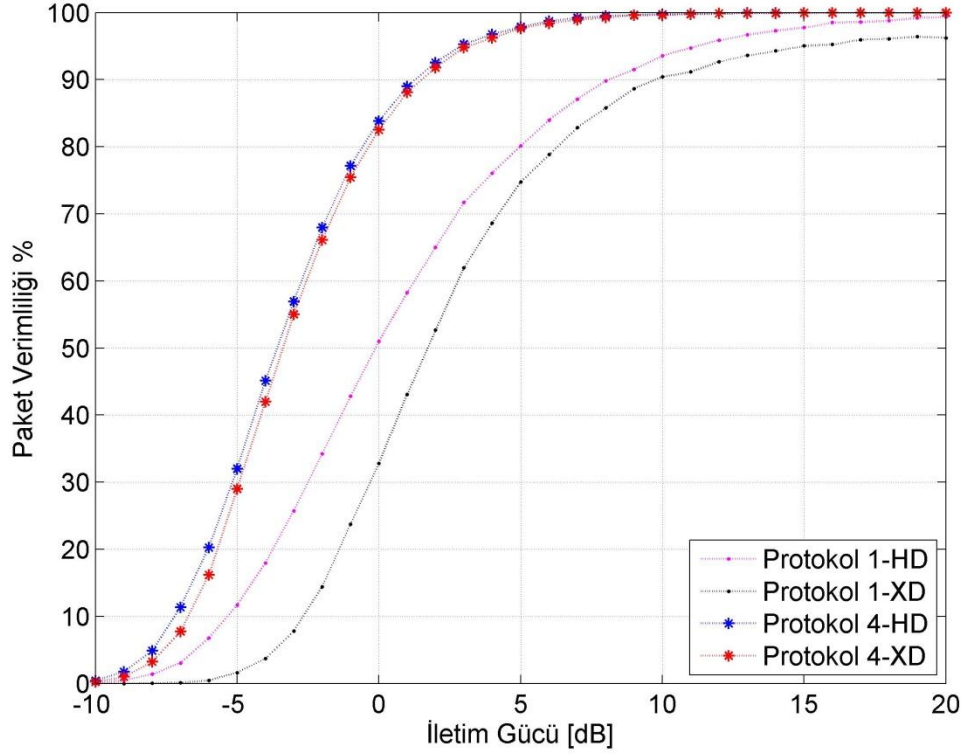
Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD'nin vericilerine bir yeniden iletim hakkı verilerek Protokol 2-HD ve Protokol 2-XD yöntemleri geliştirilirken olduğu gibi Protokol 3-

HD ve Protokol 3-XD'nin vericilerine bir yeniden iletim hakkı verilerek Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD geliştirildiğinde, Protokol 4-HD'nin Protokol 3-HD'ye ve Protokol 4-XD'nin Protokol 3-XD'ye göre etkin veri hızı ve verim ifadelerinde bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Bu nedenle Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'nin etkin veri hızı ve verim eğrileri Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'teki Protokol 3-HD ve Protokol 3-XD etkin veri hızı ve verim eğrileri gibi olacaktır. Bu durumda vericiye otomatik yineleme isteme yönteminin uygulanmasının sistem başarımları üzerindeki etkisini anlamak için paket verimliliğine bakmak gerekmektedir. Şekil 5.17'de verici ve röleye birer yeniden iletim hakkı tanınmasının sistem paket verimliliğine katkısını görmek için Protokol 1-HD, Protokol 1-XD, Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'nin değişen iletim gücüne karşın paket verimlilikleri karşılaştırılmalarına yer verilmiştir. Bütün sistemlerin her bir düğümünün veri iletim hızı 2 bit/sn/Hz, yol kaybı katsayısı $\alpha = 3.14$, verici-röle ve röle-alıcı arası uzaklıklar birbirine eşit olacak şekilde 0.5 alınmıştır. Protokol 3-XD ve Protokol 4-XD sistemlerinin XD röleleri HD röle olarak çalışırken yatay ekseninde gösterilen iletim gücünün tamamını, FD röle olarak çalışırken verici ve XD röle iletim gücünü eşit olacak şekilde paylaşarak çalışmaktadır.

0 dB iletim gücü değerinde Şekil 5.17'de görüldüğü gibi, Protokol 1-HD'nin verici ve HD rölesine birer yeniden iletim hakkı verilerek elde edilen Protokol 4-HD protokolüyle sistemin paket verimliliği ~%65'ten ~%85 seviyesine çıkarılabilmektedir. XD röleli Protokol 1-XD ve Protokol 4-XD arasındaki değişim ise daha dikkat çekicidir. Protokol 4-XD ile paket verimliliği Protokol 1-XD'ye göre ~%35'ten ~%85 seviyelerine çıkmaktadır.

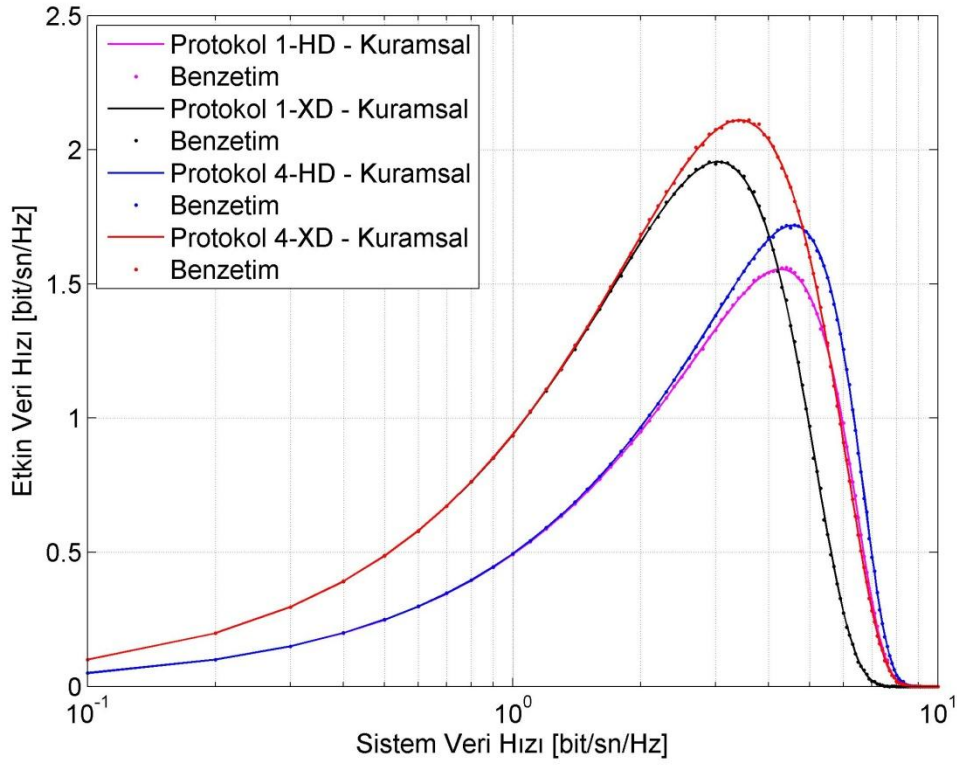
Şekil 5.18'de HD röleli ve XD röleli sistemlerin verici ve rölelerine otomatik yineleme isteme uygulandığında Protokol 1-HD, Protokol 1-XD, Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD sistemlerinin değişen veri iletim hızlarına göre etkin veri hızlarının değişimi karşılaştırılmıştır. Söz konusu dört protokolün kuramsal ve benzetim sonuçları karşılaştırılırken dört sistemin verici-röle ve röle-alıcı arası uzaklıkları birbirine eşit olacak şekilde $d = 0.5$, yol kaybı katsayısı $\alpha = 3.14$ alınmıştır. Şekil 5.18 elde edilirken her iletim sisteminin maksimum iletim güçleri 10 dB ile sınırlandırılmış olup, Protokol 1-XD ve Protokol 4-XD'de yalnızca bir düğüm iletim yaparken bu iletim gücünün tamamı kullanılmakta, her iki düğüm de iletim yaparken verici ve XD rölede iletim gücü eşit paylaşılmaktadır. Ayrıca Protokol 1-XD ve

Protokol 4-XD sistemlerinde sırasıyla XD röledeki öz-girişim ve alıcıdaki girişim, XD röleye gelen ve alıcıya gelen işaret güçlerinden 20 dB daha zayıf olacak şekilde sınırlandırılmıştır.



Şekil 5.17: Protokol 1-HD, Protokol 1-XD, Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD paket verimliliği karşılaştırması.

Şekil 5.18'de görüldüğü gibi Protokol 1-HD ve Protokol 1-XD'nin hem vericilerine hem de rölelerine bir yeniden iletim hakkı verilerek geliştirilen Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'de daha yüksek etkin veri hızlarına ulaşılmıştır. Veri iletim hızı ~ 4.5 bit/sn/Hz'ken Protokol 1-HD ile ulaşılabilen etkin veri hızının tepe noktası ~ 1.6 bit/sn/Hz iken Protokol 4-HD ile ~ 1.75 bit/sn/Hz değerlerine ulaşılabilmektedir. Benzer şekilde veri iletim hızı ~ 3 bit/sn/Hz'ken Protokol 1-XD ile ulaşılabilen etkin veri hızının tepe noktası ~ 1.9 bit/sn/Hz iken Protokol 4-XD ile ~ 2.1 bit/sn/Hz değerlerine ulaşılabilmektedir. Görüldüğü gibi Protokol 4-HD tepe veri iletim hızına ulaştığı noktada ancak ~ 40 gibi bir verimle çalışırken, Protokol 4-XD tepe veri iletim hızına ulaştığı noktada ~ 60 verimle çalışmaktadır.

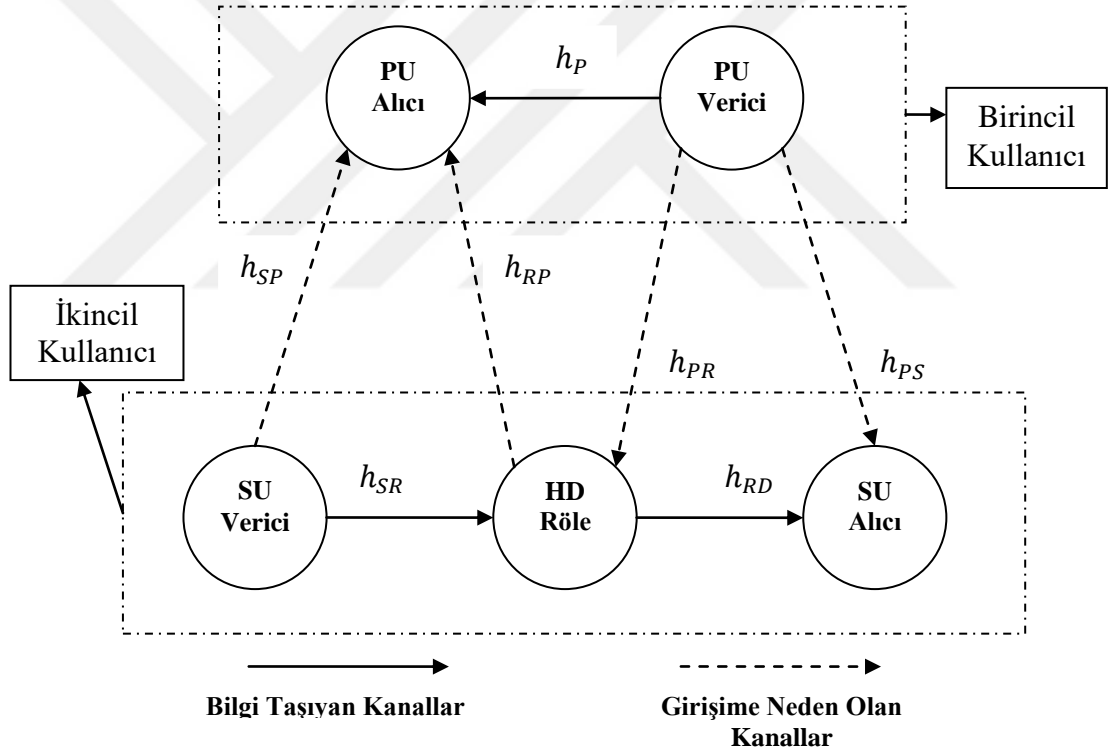


Şekil 5.18: Protokol 1-HD, Protokol 1-XD, Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD etkin veri hızı karşılaştırması.

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 değerlendirildiğinde Protokol 4-XD'nin, hem HD röleli sistemler kadar yüksek güvenilirlikli hem de HD röleli sistemlere göre daha hızlı bir iletişim protokolü olduğu görülmektedir.

6. OTOMATİK YİNELEME İSTEMELİ KARMA AKTARIM PROTOKOLÜNÜN ALTINA SERMELİ BİLİŞSEL RADYOYA UYGULANMASI

Bu bölümde, önceki bölümde önerilen ve diğer protokollere etkin veri hızı bakımından üstün, paket verimliliği bakımından denk olan Protokol 4-XD protokolü ikinci kullanıcıda kullanılarak altına sermeli bilişsel radyoya uygulanacaktır. Ayrıca önerilen karma aktarım yönteminin getirisini belirleyebilmek için Protokol 4-HD protokolü de aynı koşullar altında incelenecektir.



Şekil 6.1: İkincil kullanıcıda Protokol 4-HD'yi uygulayan altına sermeli bilişsel radyo sistem modeli.

Şekil 6.1'de Protokol 4-HD'nin ikincil kullanıcıda altına sermeli bilişsel radyoya uygulaması verilmiştir. Birincil kullanıcının her zaman aralığında vericisi ve alıcısı iletişim halindeyken ikincil kullanıcının bulunduğu bellek durumuna göre ya verici ve rölesi ya da rölesi ve alıcısı iletişim halindedir. Bu durumda Protokol 4-HD S_0 ya

da S_1 bellek durumundayken birincil kullanıcı ikincil kullanıcının rölesi üzerinde girişime neden olacaktır. Benzer şekilde ikincil kullanıcının vericisi de birincil kullanıcının alıcısı üzerinde girişime neden olacaktır. Protokol 4-HD S_2 ya da S_3 durumundayken birincil kullanıcı ikincil kullanıcının alıcısında girişime neden olacaktır. Bu durumda ikincil kullanıcının rölesi de birincil kullanıcının alıcısında girişime neden olacaktır. Altına sermeli bilişsel radyoda ikincil kullanıcının, birincil kullanıcının alıcısında neden olabileceği girişim sınırlandırılmıştır ancak birincil kullanıcı düğümleri ile ikincil kullanıcı düğümleri arasındaki her bir kanal birbirlerinden bağımsız sönmüleme katsayılarına sahip olduğundan ikincil kullanıcının verici ve rölesinin iletim gücü üst sınırları da birbirlerinden bağımsız olacaktır. Bu nedenle ikincil kullanıcının verici-röle ve röle-alıcı arasındaki kanallarda ulaşabileceği ergodik sığa ayrı ayrı değerlendirilmelidir.

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi birincil kullanıcının vericisi ve alıcısı arasındaki kanal $h_P \sim CN(0, \sigma_P^2)$, Protokol 4-HD’nin vericisi ve rölesi arasındaki kanal $h_{SR} \sim CN(0, \sigma_{SR}^2)$, Protokol 4-HD’nin rölesi ve alıcısı arasındaki kanal $h_{RD} \sim CN(0, \sigma_{RD}^2)$ olmak üzere bu kanallar üzerinden birincil kullanıcı ve ikincil kullanıcı kendi iletişimlerini gerçekleştirmektedirler. Birincil kullanıcının vericisinin Protokol 4-HD’nin rölesinde ve alıcısında girişime neden olan kanallar sırasıyla $h_{PR} \sim CN(0, \sigma_{PR}^2)$ ve $h_{PS} \sim CN(0, \sigma_{PS}^2)$, Protokol 4-HD’nin vericisinin ve rölesinin birincil kullanıcının alıcısında girişime neden olan kanallar $h_{SP} \sim CN(0, \sigma_{SP}^2)$ ve $h_{RP} \sim CN(0, \sigma_{RP}^2)$ şeklindedir. Birincil kullanıcının alıcısında izin verdiği girişim üst sınırı γ_{th} olmak üzere Protokol 4-HD’nin vericisinin S_0 ve S_1 bellek durumlarında ve rölesinin S_2 ve S_3 bellek durumlarında iletim gücü üst sınırları sırasıyla,

$$\hat{P}_S = \frac{\gamma_{th}}{\sigma_{SP}^2}, \quad (6.1)$$

$$\hat{P}_R = \frac{\gamma_{th}}{\sigma_{RP}^2} \quad (6.2)$$

olacaktır. Birincil kullanıcının iletim gücü P_p olmak üzere, birincil kullanıcının vericisinin Protokol 4-HD’nin rölesinde neden olduğu girişimin beklenen değeri,

$$\bar{\gamma}_{PR} = \sigma_{PR}^2 P_p \quad (6.3)$$

olur. Buna göre, Protokol 4-HD S_0 ya da S_1 bellek durumundayken rölesindeki gürültü $n_R \sim CN(0, N_R)$ olmak üzere Protokol 4-HD sisteminde verici röle arasındaki h_{SR} kanalının ergodik sığası,

$$\bar{R}_{SR} = \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_{SR}^2 \hat{P}_S}{\bar{\gamma}_{PR} + N_R} \right) \quad (6.4)$$

şeklindedir. Benzer şekilde birincil kullanıcının Protokol 4-HD'nin alıcısında neden olduğu girişimin beklenen değeri,

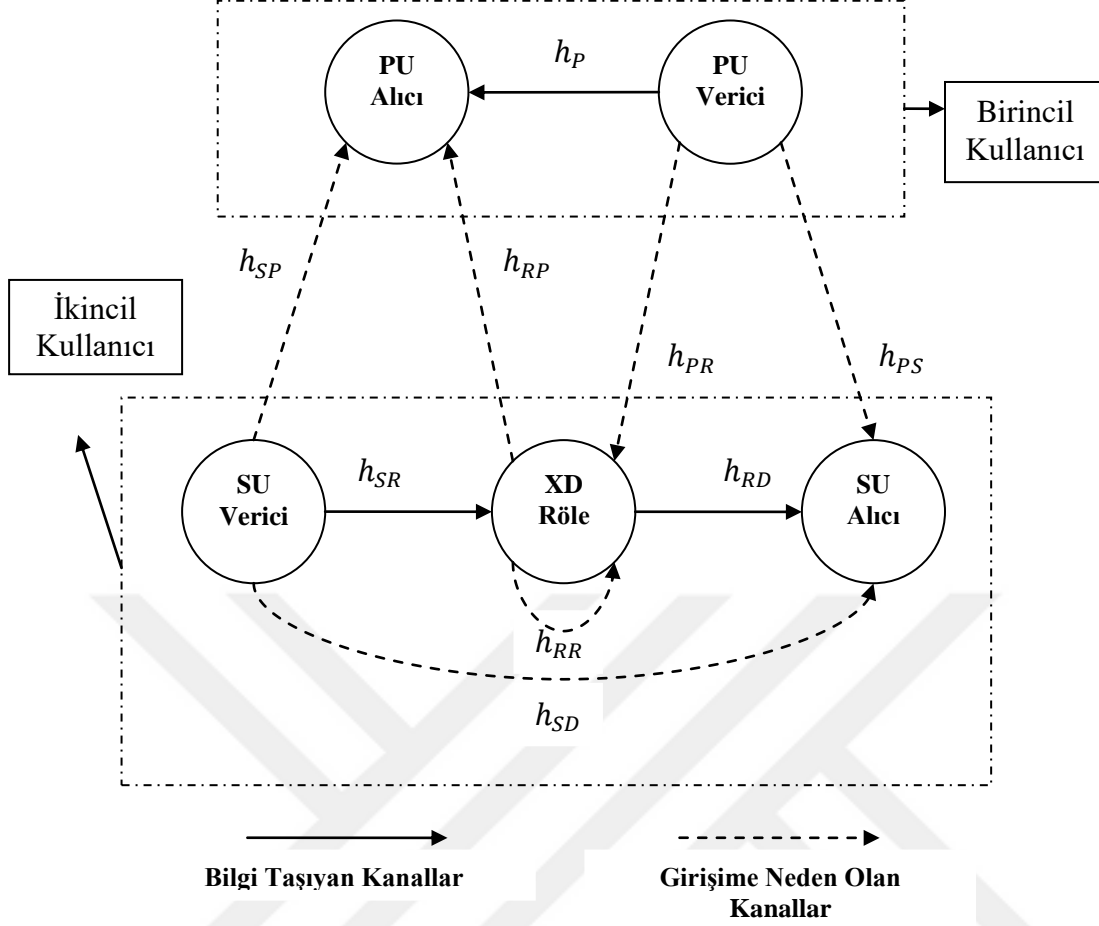
$$\bar{\gamma}_{PS} = \sigma_{PS}^2 P_p \quad (6.5)$$

şeklinde olup, Protokol 4-HD S_2 ya da S_3 bellek durumundayken alıcısındaki gürültü $n_S \sim CN(0, N_S)$ olmak üzere Protokol 4-HD sisteminde röle alıcı arasındaki h_{SR} kanalının ergodik sığası,

$$\bar{R}_{RD} = \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_{RD}^2 \hat{P}_R}{\bar{\gamma}_{PS} + N_S} \right) \quad (6.6)$$

şeklindedir [31].

Şekil 6.2'de Protokol 4-XD'nin ikincil kullanıcıda altına sermeli bilişsel radyoya uygulanışı verilmiştir. Birincil kullanıcının verici ve alıcısı her zaman aralığında iletişim halindeyken bulunduğu bellek durumuna göre ikincil kullanıcının yalnız vericisi, yalnız rölesi ya da her ikisi birden iletim halinde olabilir. Protokol 4-XD S_0 , S_1 ya da S_{3b} bellek durumlarından birindeyken ikincil kullanıcının yalnızca vericisi birincil kullanıcının alıcısı üzerinde girişime neden olacaktır. Bu durumda birincil kullanıcının vericisi de yalnızca ikincil kullanıcının rölesinde girişime neden olacaktır. Benzer şekilde Protokol 4-XD S_{3a} ya da S_4 bellek durumlarından birindeyken birincil kullanıcı alıcısında girişime ikincil kullanıcının rölesi neden olurken birincil kullanıcı da ikincil kullanıcının alıcısında girişime neden olacaktır. Protokol 4-XD S_2 bellek durumundayken birincil kullanıcı üzerinde ikincil kullanıcının hem vericisi hem de rölesi girişime neden olacaktır. Bu durumda birincil kullanıcının vericisi de aynı anda ikincil kullanıcının rölesi ve alıcısında girişime neden olacaktır. Bu nedenle ikincil kullanıcının verici-röle ve röle-alıcı arasındaki kanallarda ulaşabileceği ergodik sığa, sistemin bulunduğu bellek durumuna göre ayrı ayrı değerlendirilmelidir.



Şekil 6.2: İkincil kullanıcıda Protokol 4-XD'yi uygulayan altına sermeli bilişsel radyo sistem modeli.

Protokol 4-HD'nin verici-röle ve röle-alıcı arasındaki ergodik sığaları denklem 6.4 ve denklem 6.6 elde edilirken kullanılan aynı gösterilim kullanılmak üzere, Protokol 4-XD S_0 , S_1 ya da S_{3b} bellek durumlarında birindeyken ikincil kullanıcının verici-röle arasındaki kanalın ergodik sığası denklem 6.4 idafesiyle aynı olacaktır. Benzer şekilde Protokol 4-XD S_{3a} ya da S_4 bellek durumlarından birindeyken ikincil kullanıcının röle-alıcı arasındaki kanalın ergodik sığası denklem 6.6 ile aynı olacaktır. Protokol 4-XD S_2 bellek durumundayken, ikincil kullanıcının verici ve rölesinin birincil kullanıcının alıcısında eşit girişime neden olduğu varsayımı altında, ikincil kullanıcının verici ve rölesinin iletim gücü üst sınırları sırasıyla,

$$\hat{P}_{SFD} = \frac{\gamma_{th}}{2\sigma_{SP}^2}, \quad (6.7)$$

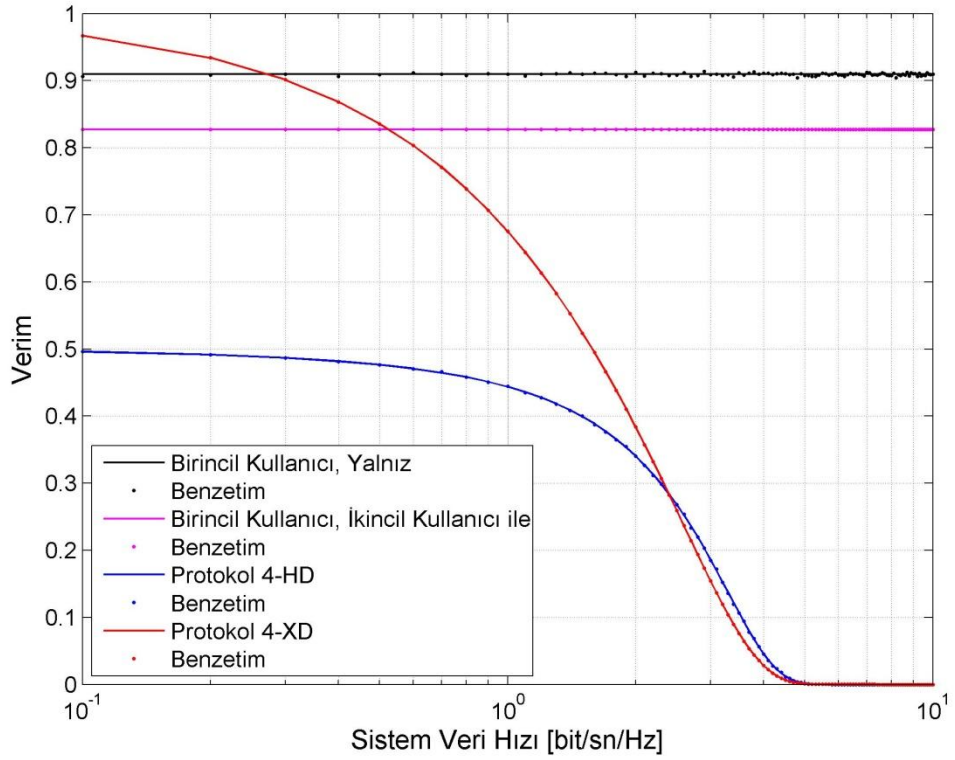
$$\hat{P}_{RFD} = \frac{\gamma_{th}}{2\sigma_{RP}^2} \quad (6.8)$$

olacaktır. İkincil kullanıcının rölesinde öz-girişime neden olan kanal $h_{RR} \sim CN(0, \sigma_{RR}^2)$, alıcısında vericisinin girişime neden olan kanal $h_{SD} \sim CN(0, \sigma_{SD}^2)$ olmak üzere, verici-röle ve röle-alıcı arasındaki kanalların ergodik sığaları sırasıyla,

$$\bar{R}_{SRFD} = \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_{SR}^2 \hat{P}_S}{\sigma_{RR}^2 \hat{P}_R + \bar{\gamma}_{PR} + N_R} \right) \quad (6.9)$$

$$\bar{R}_{RDFD} = \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_{RD}^2 \hat{P}_R}{\sigma_{SD}^2 \hat{P}_S + \bar{\gamma}_{PS} + N_S} \right) \quad (6.10)$$

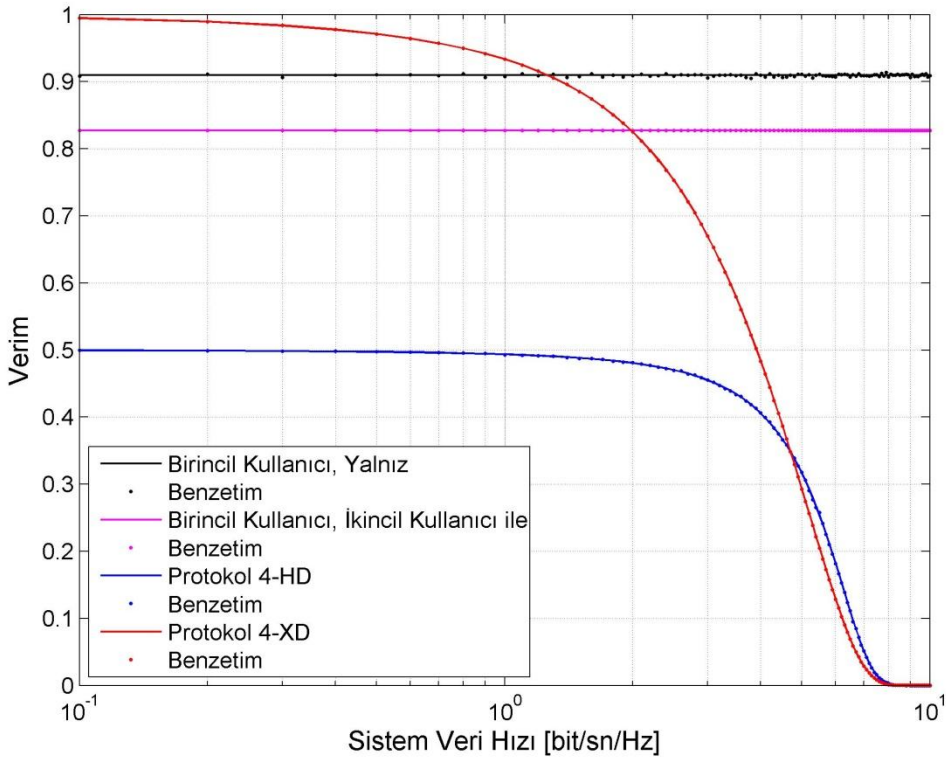
şeklindedir [31].



Şekil 6.3: Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'nin bilişsel radyoda verimlerinin değişen sistem veri hızı için karşılaştırılması-1.

Şekil 6.3'te yatay eksen ikincil kullanıcıların her bir düğümünün veri iletim hızını göstermek üzere, yalnız çalışırken birincil kullanıcının, ikincil kullanıcı ile çalışırken birincil kullanıcının, birincil kullanıcı ile çalışırken ikincil kullanıcı Protokol 4-HD'nin, birincil kullanıcı ile çalışırken ikincil kullanıcı Protokol 4-XD'nin verim

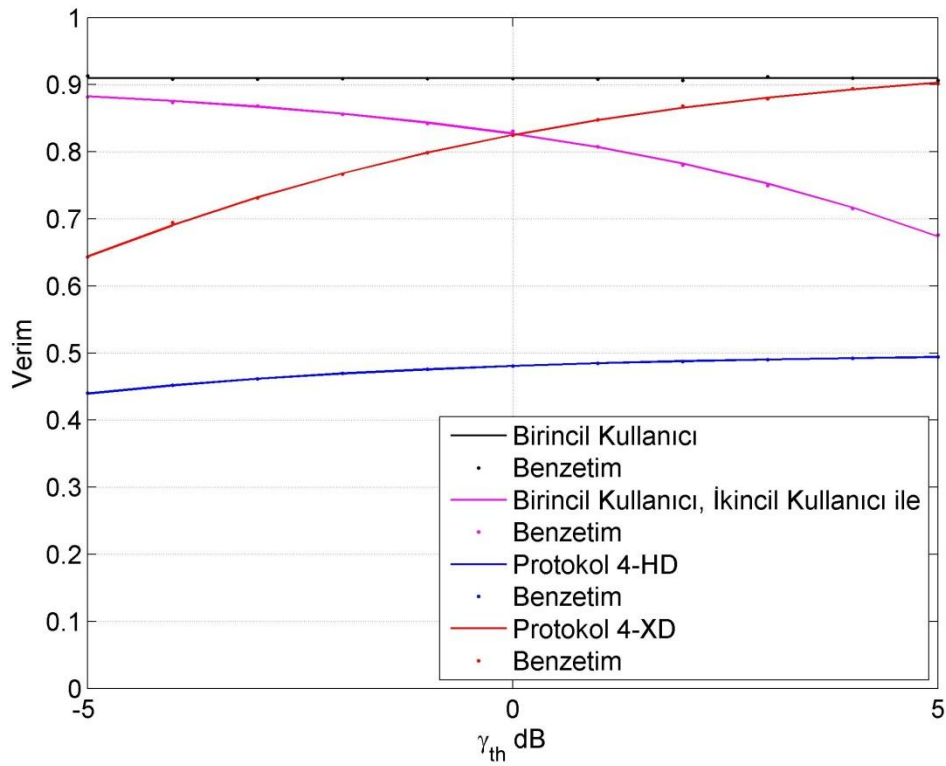
sonuçlarına yer verilmiştir. Burada birincil kullanıcının veri iletim hızı 2 bit/sn/Hz, iletim gücü 15 dB, birincil kullanıcının alıcısında izin verdiği girişim 0 dB, birincil kullanıcının vericisi ve alıcısı arasındaki, birincil kullanıcının alıcısı ve ikinci kullanıcının vericisi, birincil kullanıcının alıcısı ve ikinci kullanıcının rölesi arasındaki uzaklıklar birbirine eşit olup $d_P = d_{SP} = d_{RP} = 1$, ikinci kullanıcının verici-röle ve röle-alıcı uzaklıkları birbirine eşit olup $d_{SR} = d_{RD} = 0.5$, yol kaybı katsayısı $\alpha = 3.14$ alınmıştır. Birincil kullanıcının vericisinin ikinci kullanıcının rölesinde ve alıcısında girişime neden olmayacak kadar uzakta olduğu kabul edilmiştir. Protokol 4-XD'de XD röledeki öz-girişim ve alıcıdaki girişim, XD röleye gelen ve alıcıya gelen işaret güçlerinden 20 dB daha zayıf olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Şekil 6.4, Şekil 6.3'le aynı koşullar altında elde edilmiş olup yalnızca ikinci kullanıcının verici-röle ve röle-alıcı uzaklıkları $d_{SR} = d_{RD} = 0.25$ alınmıştır.



Şekil 6.4: Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'nin bilişsel radyoda verimlerinin değişen sistem veri hızı için karşılaştırılması-2.

Önceki bölümde Şekil 5.17'de Protokol 4-XD'nin Protokol 4-HD kadar yüksek paket verimliliği değerlerine ulaşabildiği görülmüştü. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 beraber değerlendirildiğinde ikinci kullanıcının verimlerinin, ikinci kullanıcının düğümleri

birbirine yaklaştırıldığında arttığı görülmektedir. Ayrıca, Protokol 4-XD'nin veriminin yüksek veri hızı değerlerine kadar Protokol 4-HD'den daha iyi olduğu görülmektedir. Protokol 4-HD'nin veriminin Protokol 4-XD'nin veriminden en yüksek olduğu noktada ~ 0.05 gibi bir fark bulunmasına karşın, düşük veri hızı değerlerinde Protokol 4-XD'nin veriminin Protokol 4-HD'ye göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Veri hızı ekseninin büyük kısmında Protokol 4-XD'nin Protokol 4-HD'ye üstünlüğü göz önüne alındığında, ikincil kullanıcının veriminin yüksek olması istenen sistemlerde Protokol 4-XD'nin Protokol 4-HD'ye göre daha iyi bir seçenek olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5: Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'nin bilişsel radyoda verimlerinin değişen girişim üst sınırı için karşılaştırılması.

Şekil 6.5'teki sonuçlar elde edilirken birincil sistemin iletim gücü 15 dB, birincil kullanıcının ve ikincil kullanıcıların her bir düğümünün veri iletim hızı 2 bit/sn/Hz, birincil kullanıcının vericisi ve alıcısı arasındaki, birincil kullanıcının alıcısı ve ikincil kullanıcıların vericisi, birincil kullanıcının alıcısı ve ikincil kullanıcıların rölesi arasındaki uzaklıklar birbirine eşit olup $d_P = d_{SP} = d_{RP} = 1$, ikincil kullanıcıların verici-röle ve röle-alıcı uzaklıkları birbirine eşit olup $d_{SR} = d_{RD} = 0.25$ yol kaybı katsayısı $\alpha = 3.14$ alınmıştır. Ayrıca Protokol 4-XD'de XD röledeki öz-

girişim ve alıcıdaki girişim, XD röleye gelen ve alıcıya gelen işaret güçlerinden 20 dB daha zayıf olacak şekilde sınırlandırılmıştır.

Şekil 6.5'te görüldüğü gibi girişim üst sınırı arttıkça birincil kullanıcının verimi düşmektedir. Buna karşın ikincil kullanıcılar Protokol 4-HD ve Protokol 4-XD'nin verimleri artmaktadır. Ancak Protokol 4-XD'nin veriminde oldukça kayda değer bir artış görülmektedir. Bu durum ikincil kullanıcının yüksek verimli olması istenilen durumlarda Protokol 4-XD'nin daha tercih edilir olduğunu göstermekle beraber, XD rölenin başarımının girişim nedeniyle hassas olduğunu da göstermektedir.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında altına sermeli bilişsel radyoda ikincil kullanıcıda kullanılmak üzere işbirlikli otomatik yineleme istemeli, yarı-çift yönlü ve tam-çift yönlü aktarım yöntemlerini bir arada kullanan bir karma aktarım rölesinin kullanıldığı protokoller önerilmiştir. Bölüm 2’de telsiz iletişim kanallarının sığıması, telsiz iletişim sistemlerinde servis kesilmesi kavramları tanımlanmış ve otomatik yineleme isteme yöntemlerinden söz edilmiştir. Bölüm 3’teyse literatürde yer alan işbirlikli iletişimde klasik aktarım yöntemleri gözden geçirilmiştir. Bölüm 4’te de bilişsel radyo tekniği tanıtılmıştır.

Bölüm 5’te XD röleli, tek-yönlü işbirlikli telsiz iletişim sistemleri için otomatik yineleme isteme kullanılmayan, yalnız vericide otomatik yineleme isteme kullanılan, yalnız rölede otomatik yineleme isteme kullanılan ve hem vericide hem de rölede otomatik yineleme isteme kullanılan üç farklı protokol önerilmiştir. Önerilen protokollerin değişen iletim gücü ve değişen veri iletim hızları karşılığında verimleri, etkin veri iletim hızları ve paket verimlilikleri kuramsal olarak hesaplanıp otomatik yineleme istemeli HD röleli protokollerle karşılaştırmalar yapılmıştır.

Önerilen protokoller içerisinde Protokol 4-XD’nin hem yüksek verimle hem de yüksek veri iletim hızıyla çalışmasının yanında paket verimliliği bakımından HD röleli Protokol 4-HD’ninkine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bölüm 5’te önerilen protokoller birlikte yorumlanacak olursa, aynı koşullar altında önerilen sistemlerde sisteme otomatik yineleme isteme uygulanmasının XD röleli sistemlerin başarımlarını HD röleli sistemlerin başarımlarına oranla daha etkin bir şekilde arttırdığı görülmektedir. Şekil 5.17’de 0 dB iletim gücünde XD röleli sistemlerin paket verimliliklerinin otomatik yineleme isteme kullanılmayan durumdaki ~%35 seviyesinden hem verici hem rölede otomatik yineleme isteme kullanılan durumda ~%85 seviyesine çıkarak Protokol 4-HD’nin paket verimliliğine hemen hemen denk olduğu gösterilmiştir.

Bölüm 6’da Bölüm 5’te önerilen Protokol 4-XD ve Protokol 4-HD altına sermeli bilişsel radyonun ikincil kullanıcıya uygulanmıştır. Bölüm 6’da belirtildiği üzere

bilişsel radyoda, ikincil kullanıcının kullanabileceği iletim gücünün birincil kullanıcının izin verdiği girişim üst sınırına bağlı olduğu bir iletişim çevresinde, ikincil kullanıcıda Protokol 4-HD yerine Protokol 4-XD kullanılarak hem değişen veri iletim hızına karşın hem de değişen girişim üst sınırı kısıtları altında daha yüksek verim değerlerine, dolayısıyla daha yüksek etkin veri iletim hızlarına ulaşıldığı görülmektedir. Bölüm 5'te daha ayrıntılı olarak görüldüğü gibi önerilen XD röleli sistemler, yüksek veri iletim hızı ya da düşük iletim gücü bölgelerinde HD röleli sistemlere göre daha düşük verimle çalışmaktadır. Ancak söz konusu bölgelerde HD rölenin veriminin de çok düşük olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışması boyunca elde edilen bütün kuramsal çıkarımlar en genel halleriyle verilmiş olup, bilgisayar benzetimleri ilgili bölümlerde belirtilen varsayımlar altında yapılmıştır. Ancak gündelik hayat uygulamalarında yapılan varsayımların her zaman geçerli olmayacağı açıktır. Bu nedenle farklı ortam koşulları için benzetimlerin yeniden yapılarak yorumlanması gerekmektedir. Elde edilecek sonuçlara göre önerilen protokoller üzerinde iyileştirmeler yapılabilir.

Tezde önerilen XD röleli protokollerin en hızlı ya da en güvenilirlikli olmak gibi mutlak bir iddiası olmamakla beraber HD röleli sistemlere göre daha hızlı, FD röleli sistemlere göre daha yüksek güvenilirlikli sistemler oldukları söylenebilir.

Tez kapsamında önerilen XD röleli protokollerin literatürdeki farklı yaklaşımlarla geliştirilmesi mümkün görünmektedir. Öncelikle protokoller için önerilen karma aktarım yönteminde XD röle vericiden işareti alır almaz FD röle olarak çalışmaktadır. Burada XD rölenin düşük SNR ya da yüksek veri hızı değerlerinde HD röle olarak çalışacağı bir seçim yöntemi geliştirerek önerilen sistemlerin başarımlarının artırılabilmesi öngörülebilir. Ayrıca XD röle FD röle olarak çalışırken, iletim gücünün verici ve röle arasında farklı paylaşım yöntemleri ile paylaşılması durumunda sistem başarımlarının ne olacağı konusuna da bu tez kapsamında değinilmemiştir. Bunun dışında önerilen protokoller tek-yönlü yapıda olup bu protokollerin iki-yönlü sistemlere uygulanması halinde başarımlarının ne olacağı da araştırılması gereken bir başka konu olarak görünmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Haykin, S.** (2001). *Communication Systems*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [2] **Buddhikot, M.** (2007). *Understanding Dynamic Spectrum Access: Models, Taxonomy and Challenges*, New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Ireland: Dublin, April 17-20.
- [3] **Kolodzy, P.** (2001). *Next generation communications: Kickoff meeting*, Proceedings of Defense Advanced Research Projects Agency, Arlington, USA: Arlington, October 17.
- [4] **Mitola, J. & Maguire, G.** (1999). *Cognitive radio: Making software radios more personal*, *IEEE Pers. Commun.*, 6 (4), 13-18.
- [5] **Han, Y., Pandharipande, A., & Ting, S.** (2009). *Cooperative Decode-and-Forward Relaying for Secondary Spectrum Access*, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8 (10), 4945-4950.
- [6] **Li, Y., Peng, M., & Wang, W.** (2012). *Spectrum Sharing in Cognitive Two-Way Relay Networks*, *Globecom 2012 – Wireless Communications Symposium*, (pp. 4911-4915), France: Paris, April 28-31.
- [7] **Yu, R., Zhang, Y., Yi, L., Xie, S., Song, L., & Guizani, M.** (2012). *Secondary Users Cooperation in Cognitive Radio Networks: Balancing Sensing Accuracy and Efficiency*, *IEEE Wireless Communications*, 19 (2), 30-37.
- [8] **Li, Q., Ting, H., Pandharipande, A., & Han, Y.** (2011). *Cognitive Spectrum Sharing With Two-Way Relaying Systems*, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60 (3), 1233-1240.
- [9] **Li, Y., Wang, T., Peng, M., & Wang, W.** (2014). *On the outage probability of cognitive two way relaying based on superposition coding*, *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, South Korea: Seoul, May 18-21.
- [10] **Hong, H., Xiao, L., Yan, Y., Xu, X., & Wang, J.** (2014). *Outage performance for cognitive two-way relaying networks with underlay spectrum sharing*, *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, South Korea: Seoul, May 18-21.
- [11] **Mafra, S.B., Alves, H., Costa, D.B., Souza, R.D., & Fernandez, E.M.G.** (2015). *On the performance of cognitive full-duplex relaying under spectrum sharing constraints*, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*.
- [12] **Mafra, S.B., Souza, R.D., Rebelatto, J.L., Fernandez, E.M.G., & Alves, H.** (2013). *Cooperative overlay secondary transmissions exploiting*

primary retransmissions, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking.

- [13] **Baranwal, T., Michalopoulos, D., & Schober, R.** (2013). Outage Analysis of Multihop Full Duplex Relaying, IEEE Communications Letters, 17 (1), 63-66.
- [14] **Alves H., Souza, R.D., & Fraidenraich, G.** (2014). Outage, Throughput and Energy Efficiency Analysis of Some Half and Full Duplex Cooperative Relaying Schemes, Transactions On Emerging Telecommunications Technologies, 25 (11), 1114-1125.
- [15] **Li, S., Zhou, M., Wu, J., Song, L., Li, Y., & Li, H.** (2017). On the Performance of X-Duplex Relaying, IEEE Transactions On Wireless Communications, 16 (3), 1868-1880.
- [16] **Chen, Q. & Gursoy, M.C.** (2011). Goodput Maximization in Cooperative Networks with ARQ, 45th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), USA: Baltimore March 23-25.
- [17] **Chen, Q. & Gursoy, M.C.** (2011). Energy Efficiency and Goodput Analysis in Two-Way Wireless Relay Networks, 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), USA: Hawaii, July 31-August 4.
- [18] **Chen, Q. & Gursoy, M.C.** (2012). Spectrum and Energy Efficiency in Two-Way Multi-Relay Networks with Selective Relay, Military Communications Conference, 2012 - MILCOM 2012, USA: Florida October 29-November 1.
- [19] **Proakis, J.G. & Salehi, M.** (2002). Communication Systems Engineering, Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall.
- [20] **Sklar, B.** (1997). Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I: Characterization, IEEE Communications Magazine, 35 (7), 90-100.
- [21] **Shannon, C.E.** (1948). The Mathematical Theory of Communication, Bell Syst. Tech. J., 27, 379-432, 623-656.
- [22] **Nosratinia, A., Hunter, T.E., & Hedayet, A.** (2004). Cooperative Communication in Wireless Networks, IEEE Commun. Magazine, 42 (10), 74-80.
- [23] **Garg, J., Mehta, P., & Gupta, K.** (2013). A Review on Cooperative Communication Protocols in Wireless World, International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN), 5 (2), 107-126.
- [24] **Rankov, B. & Wittneben, A.** (2007). Spectral Efficient Protocols for Half-Duplex Fading Relay Channels, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 25 (2), 379-389.
- [25] **Laneman, J.N., Tse, D.N.C., & Wornell, G.W.** (2004). Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior, IEEE Transactions on Information Theory, 50 (12), 3062-3080.

- [26] **Laneman, J.N. & Wornell, G.W.** (2003). Distributed Space–Time-Coded Protocols for Exploiting Cooperative Diversity in Wireless Networks, *IEEE Transactions on Information Theory*, 49 (10), 2415-2425.
- [27] **Kim, D., Lee, H., & Hong, D.** (2015). A Survey of In-Band Full-Duplex Transmission: From the Perspective of PHY and MAC Layers, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17 (4), 2017-2046.
- [28] **Liu, G., Yu, F.R., Ji, H., Leung, V.C.M., & Li, X.** (2015). In-Band Full-Duplex Relaying: A Survey, Research Issues and Challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17 (2), 500-524.
- [29] **Renk, T., Kloeck, C., & Jondral, F.K.** (2007). A Cognitive Approach to the Detection of Spectrum Holes in Wireless Networks, *Consumer Communications and Networking Conference, USA: Las Vegas* January 11-13.
- [30] **Biglieri, E., Goldsmith, A.J., Greenstein, L.J., Mandayam, N.B., & Poor, H.V.** (2013). *Principles of Cognitive Radio*, Cambridge University Press.
- [31] **Kramer, G., Gastpar, M., & Piyush Gupta, T.** (2005). Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks, *IEEE Transactions On Information Theory*, 51 (9), 3037-3063.



ÖZGEÇMİŞ

VESİKALIK
FOTO

Ad-Soyad : Murat BARAN
Doğum Tarihi ve Yeri : Burdur – 19.01.1989
E-posta : murat_baran@windowlive.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Eletronik Fakültesi, Telekomünikasyon Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013'ten bu yana özel sektörde çalışıyor.

